

# L'optimisation topologique pour la fabrication additive : méthodes et limites

## Topology optimization of additively manufactured structures: methods and limits

Ahmed Ait Ouchaoui<sup>1,2</sup>, Mohammed Nassraoui<sup>3</sup>, Bouchaib Radi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ecole Nationale Supérieure de l'électricité et de mécanique, Université Hassan 2, Casablanca, Maroc, [ahmed.aitouchaoui-etu@etu.univh2c.ma](mailto:ahmed.aitouchaoui-etu@etu.univh2c.ma)

<sup>2</sup> Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan 2, Casablanca, Maroc, [ahmed.aitouchaoui-etu@etu.univh2c.ma](mailto:ahmed.aitouchaoui-etu@etu.univh2c.ma)

<sup>3</sup> Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan 2, Casablanca, Maroc, [mohammed.nassraoui@univh2c.ma](mailto:mohammed.nassraoui@univh2c.ma)

<sup>4</sup> Laboratoire de l'Ingénierie, Management Industriel et Innovation (IMII), Faculté des sciences Technologies, Université Hassan 1, Settat, Maroc, [Bouchaib.radi@yahoo.fr](mailto:Bouchaib.radi@yahoo.fr)

**RÉSUMÉ.** L'optimisation topologique pour la fabrication additive est un domaine en évolution rapide qui possède un immense potentiel pour révolutionner les processus de conception. Les concepteurs peuvent explorer des géométries et des structures complexes qui étaient auparavant inaccessibles en tirant parti des capacités de la fabrication additive. De plus, l'intégration des contraintes de fabrication additive dans les méthodes d'optimisation topologique permet la création de conceptions optimisées qui sont non seulement esthétiquement agréables, mais aussi fonctionnellement supérieures. Cet article se penche sur la différence entre les méthodes d'optimisation topologique les plus fréquemment employées et les contraintes inhérentes à la fabrication additive qui doivent être intégrées dans les formulations de l'optimisation topologique.

**ABSTRACT.** Topology optimization for additive manufacturing is a rapidly evolving field that holds immense potential for revolutionizing design processes. By leveraging the capabilities of additive manufacturing, designers can explore complex geometries and intricate structures that were previously unattainable. Furthermore, the integration of additive manufacturing constraints into topology optimization methods allows for the creation of optimized designs that are not only aesthetically pleasing but also functionally superior. Additionally, this article examines the difference between the topological optimization methods most frequently and the inherent constraints of additive manufacturing that need to be which must be integrated into topological optimization formulations.

**MOTS-CLÉS.** Fabrication additive, optimisation topologique, impression 3D, structure lattice, Automobile.

**KEYWORDS.** Additive Manufacturing, topology optimization, 3D printing, lattice structure, automotive.

## 1. Introduction

La fabrication additive (AM) est une technologie indispensable aux industries manufacturières modernes, qui permet de créer des pièces tridimensionnelles en superposant des matériaux. Elle réduit le temps et les coûts de fabrication, ce qui la rend idéale pour le prototypage et la production en petites séries. L'optimisation topologique, une méthode de conception structurelle avancée, est un domaine de recherche intéressant qui intègre les contraintes de conception et de fabrication. L'optimisation topologique est largement utilisée dans plusieurs domaines pour optimiser la masse et les propriétés mécaniques. En surmontant les défis posés par les géométries complexes des résultats de l'optimisation topologique, la fabrication additive permet une production précise et efficace des structures, surmontant ainsi les limites des méthodes de fabrication conventionnelles.

Dans cette étude, nous aborderons la fabrication additive et ses technologies. Ensuite, nous examinerons la formulation et la comparaison des méthodes d'optimisation topologique les plus couramment utilisées. Enfin, nous discuterons des limites de l'optimisation topologique qu'il convient de prendre en compte dans le contexte de la fabrication additive.

## 1. La fabrication additive

La fabrication additive (AM) crée des pièces tridimensionnelles en ajoutant du matériau couche par couche. Cette technologie est largement utilisée dans le prototypage rapide et peut créer presque n'importe quelle forme à partir de nombreux matériaux tels que les matériaux métalliques, les polymères, les composites et les biomatériaux [1]. L'AM réduit le temps et le coût de fabrication, en particulier pour la fabrication de prototypes et de lots, et diminue le nombre de pièces dans l'assemblage [2]. Il aide les ingénieurs à dépasser les limites des techniques conventionnelles. Par conséquent, AM joue un rôle crucial dans les industries manufacturières modernes et a un large champ d'application, y compris l'aéronautique, l'aviation spatiale, la mécatronique, de la médecine...

### 1.1. Les technologies de la fabrication additive

Les technologies AM sont classées selon sept catégories : le jet de liant (the binder jetting) ; l'extrusion de matériaux (material extrusion) ; le jet de matériaux (material jetting) ; le dépôt par énergie dirigée (directed energy deposition) ; la photopolymérisation en cuve (vat photopolymerization) ; la fusion sur lit de poudre (powder bed fusion) ; la stratification de feuilles (sheet lamination). L'article de [1] met en évidence les différentes technologies de fabrication additive et examine les avantages et les inconvénients de chaque technologie en plus des matériaux utilisés. De plus, il fait référence aux domaines d'application de la fabrication additive.

Outre les capacités de l'AM, l'intégration des contraintes de conception et de fabrication (précision, la rugosité de surface et les propriétés des matériaux) dans la conception de l'optimisation topologique est un domaine de recherche attrayant.

## 2. L'optimisation topologique

Depuis l'introduction de Bendsoe [2], l'optimisation topologique a connu un développement rapide. C'est une méthode de conception structurelle avancée qui permet d'obtenir une configuration de structure optimale grâce à une répartition raisonnable des matériaux qui répond aux conditions de charge, de performance et de contraintes spécifiées [3]. L'optimisation topologique est la technique de conception structurelle la plus utilisée dans les domaines aéronautique, aérospatial, automobile et architectural pour optimiser la masse et améliorer les propriétés mécaniques. Les structures obtenues par l'optimisation topologique se distinguent par leur géométrie complexe, présentant ainsi des défis pour leur réalisation au moyen des méthodes de fabrication conventionnelles. C'est en cela que réside l'avantage de la fabrication additive, qui permet de surmonter ces obstacles et de produire de telles structures avec précision et efficacité.

### 2.1. Les méthodes de l'optimisation topologique

La première méthode d'optimisation topologique a été introduite par Bendsoe et Kikuchi en 1988 [2], sous le nom de méthode d'homogénéisation. Depuis son introduction, cette méthode a été développée et explorée sous diverses formes. Parmi les approches dérivées, on trouve les méthodes basées sur la densité, telles que la pénalisation des matériaux isotropes solides (SIMP) proposée par Bendsoe et Sigmund en 1999 [4], l'approximation rationnelle des propriétés des matériaux (RAMP) étudiée par Stolpe et Svanberg en 2001 [5], ainsi que la méthode des ensembles de niveaux (LSM) présentée par Dai en 2013 [6].

Les méthodes évolutionnaires ont également émergé comme des approches efficaces pour l'optimisation topologique. Xie et Steven ont introduit l'optimisation structurelle évolutionnaire (ESO) en 1993 [7], qui a été suivie par le développement de l'optimisation structurelle évolutionnaire bidirectionnelle (BESO) par Xia en 2018 [8]. Une autre approche notable est l'optimisation pilotée par les caractéristiques (FDO), proposée par Zhang, Zhou en 2017 [9]. Les

concepts innovants de composants mobiles morphables MMC et de vides mobiles morphables MMV ont été introduits ajoutant de nouvelles dimensions à la recherche en optimisation topologique.

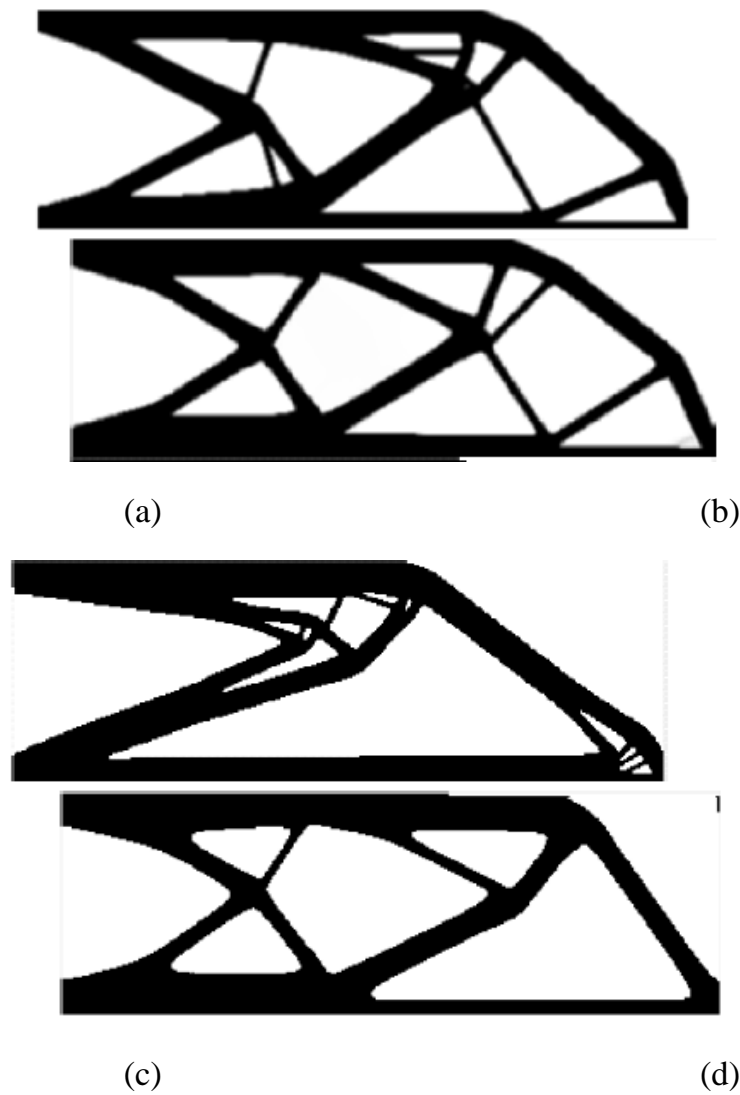
Plusieurs recherches ont examiné des exemples d'application des méthodes d'optimisation topologique. Parmi les nombreuses études menées, l'étude réalisée par Eljihad [10] sur le corps du poinçon mérite d'être mentionnée. Il a optimisé ce modèle en utilisant la méthode SIMP et l'a fabriqué grâce à la technologie de dépôt de filament fondu (FDM). Grâce à cette démarche, il a réussi à réduire la masse de 64 % et à transformer un système multi-corps en une seule pièce.

## **2.2. Comparaison des différentes méthodes de l'optimisation topologique**

L'étude comparative des méthodes d'optimisation topologique constitue un sujet de recherche substantiel. Parmi ces études, on peut mentionner le travail de Sigmund en 2013, exposé dans l'article [3], où il met en évidence une légère distinction entre les différentes approches d'optimisation topologique. Les méthodes basées sur la densité présentent des similitudes avec les méthodes des ensembles de niveaux, tandis que les méthodes évolutionnaires convergent vers la méthode SIMP.

Une autre étude, menée par Zhu en 2021 [11], souligne les avancées récentes dans l'intégration de l'optimisation topologique et de la fabrication additive. Cette recherche se concentre notamment sur la conception de l'optimisation structurelle multi-échelle ou hiérarchique, ainsi que sur l'optimisation topologique en tenant compte des contraintes spécifiques à la fabrication additive. Zhu aborde également les défis inhérents aux approches de conception structurelle pour la fabrication additive, tels que la caractérisation des performances et les effets d'échelle des structures lattices fabriquées de manière additive, ainsi que l'anisotropie et les performances de fatigue des matériaux fabriqués par ajout de matière. De plus, il évoque les enjeux liés aux matériaux à gradient fonctionnel fabriqués de manière additive. Il insiste sur l'importance de l'intégration harmonieuse du matériau, de la structure, du processus et de la performance dans la recherche sur l'optimisation de la topologie pour la fabrication additive. Cette approche globale vise à obtenir des produits de haute performance, multifonctionnels et légers. Il conclut que le domaine de l'optimisation topologique pour la fabrication additive constitue un axe de recherche prometteur, et propose des orientations pour de futures investigations dans cette direction.

Une étude antérieure mérite également d'être mentionnée [12], dans laquelle nous avons examiné l'impact des paramètres de l'optimisation topologique sur trois critères majeurs : la qualité topologique, la rigidité et le coût computationnel des résultats obtenus par différentes méthodes d'optimisation topologique. Au cours de cette étude, nous avons conclu que le choix adéquat des paramètres revêt une importance considérable et exerce une influence directe sur les résultats de l'optimisation topologique. Nous avons proposé des paramètres qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats en accord avec les trois critères évoqués précédemment. La **Figure 1** illustre les variations entre les résultats produits par quatre méthodes distinctes d'optimisation topologique.



**Figure 1.** Pièce optimisée avec une discrétisation de 43800 éléments (a) SIMP avec  $p=3$  et  $rmin=2$ , (b) RAMP avec  $q=3$  et  $rmin=2$ , (c) BESO avec  $rmin=2$  et  $er=0.45$ , (d) avec  $rmin=2$  et  $tau=0.0004$  [12].

### 2.3. Formulation des méthodes de l'optimisation topologique

La formulation mathématique des problèmes d'optimisation topologique peut être écrite comme suit [13] :

$$\min_{\omega \in \Omega} f(u(\omega), \omega) \quad [1]$$

s.t:

$$\begin{cases} g_i(\omega) \leq 0 & 1 \leq i \leq m \\ h_j(\omega) = 0 & 1 \leq j \leq n \end{cases}$$

Avec

$f$  : la fonction objective

$\Omega$  : le domaine de conception

$u$  : les déplacements

$g_i$  et  $h_i$  : les fonctions de contrainte

$m$  et  $n$  : les nombres d'éléments suivant  $x$  et  $y$  respectivement

Pour évaluer ces fonctions de contraintes non linéaires, l'équation 1 est réexprimée de la manière suivante :

$$\min_{\omega \in \Omega} f(u(\omega), \omega) \quad [2]$$

s.t:

$$\begin{cases} g_i(u(\omega), \omega) \leq 0 & 1 \leq i \leq m \\ h_j(u(\omega), \omega) = 0 & 1 \leq j \leq n \end{cases}$$

Les déplacements  $u$  correspondent aux solutions de l'équation d'état suivante :

$$L(u(\omega), \omega) = 0 \quad [3]$$

Les méthodes d'optimisation topologique diffèrent dans leur approche de la résolution de l'équation 2. La forme discrète de la formulation du problème de conception de la compliance minimale  $C$  consiste en deux champs d'intérêt : le déplacement  $U$  et la rigidité  $E$ .

### 2.3.1. Formulation des méthodes basées sur la densité

La formulation des méthodes basées sur la densité peut être écrite comme suit [14] :

$$\min C = F^T U = U^T K U = \sum_{e=1}^n E_e(\rho_e) u^T k_0 u \quad [4]$$

s.t:

$$K(\rho) U(\rho) = F$$

$$\frac{\sum_{e=1}^n V(\rho_e)}{f V_0} \leq 1$$

$$0 \leq \rho_e \leq 1$$

Avec :

$C$  : la compliance

$F$  : le vecteur force

$f$  : la fraction de volume

$\rho$  : la variable de pseudo densité de la conception

$K$  : la matrice de rigidité

$E_e$  : le module d'élasticité d'élément fini

$V_0$  : le volume total

La matrice de rigidité est calculée en fonction de  $E_e$  par l'équation suivante :

$$K = \sum_{e=1}^N K_e (E_e) \quad [5]$$

Avec

$K_e$  : la matrice de rigidité de l'élément fini

La différence entre la méthode SIMP et RAMP est la formulation de  $E_e$ . Celui-ci est formulé respectivement dans SIMP et RAMP par les équations 6 et 7.

$$E_e(\rho_e) = E_{min} + \rho_e^p (E_0 - E_{min}) \quad [6]$$

$$E_e(\rho_e) = \frac{\rho_e E_0}{1 + q(1 - \rho_e)} \quad [7]$$

Avec

$p$  : le facteur de pénalisation de SIMP

$q$  : le facteur de pénalisation de RAMP

### 2.3.1. Formulation des méthodes évolutionnaires BESO

La formulation du problème de minimisation de la compliance dans le cadre du BESO avec méthode d'arrêt rigide est la suivante [15] :

$$\min_{\xi_e} C(\xi_e, u) \quad [8]$$

s.t:

$$K(\xi_e)U(\xi_e) = F$$

$$\sum_{e=1}^n V_e = fV_0$$

$$\xi_e = 0 \text{ or } \xi_e = 1$$

Avec

$\xi_e$  : la variable de conception pour chaque élément

### 2.3.1. Formulation des méthodes des niveaux

Les méthodes de niveau utilisent une équation de réaction-diffusion pour mettre à jour une fonction de niveau  $\phi(x)$  définie par l'une des trois iso-surfaces suivantes : domaine des matériaux, domaine du vide et frontières structurales [16].

$$1 \geq \phi(x) > 0 \quad \forall x \in \Omega \setminus \partial\Omega \quad [9]$$

$$\phi(x) = 0 > 0 \quad \forall x \in \Omega \quad [10]$$

$$0 > \phi(x) \geq -1 \quad \forall x \in D \setminus \partial\Omega \quad [11]$$

Avec :

$D$  : domaine de conception fixe

La formulation du problème de minimisation de la compliance dans le cadre de la méthode des niveaux (LSM) est la suivante :

$$\begin{aligned} \inf_{\phi} F &= \int_{\Gamma} t_i u_i d\Gamma & [12] \\ \text{s. t. } G &= \int_{\Omega} d\Omega - V_{max} \leq 0 \\ \text{div} (C_{ijkl} u_{k,l}) &= 0 \quad \text{on } \Omega \\ u_i &= \bar{u}_i \quad \text{in } \Gamma_u \\ t_i &= \bar{t}_i \quad \text{in } \Gamma_t \end{aligned}$$

Avec :

$F$  : la fonction objective

$G$  : inégalité des contraintes

$\Gamma_u$  et  $\Gamma_t$  : les conditions aux limites

$u_i$  : le déplacement des limites

$t_i$  : la traction aux limites

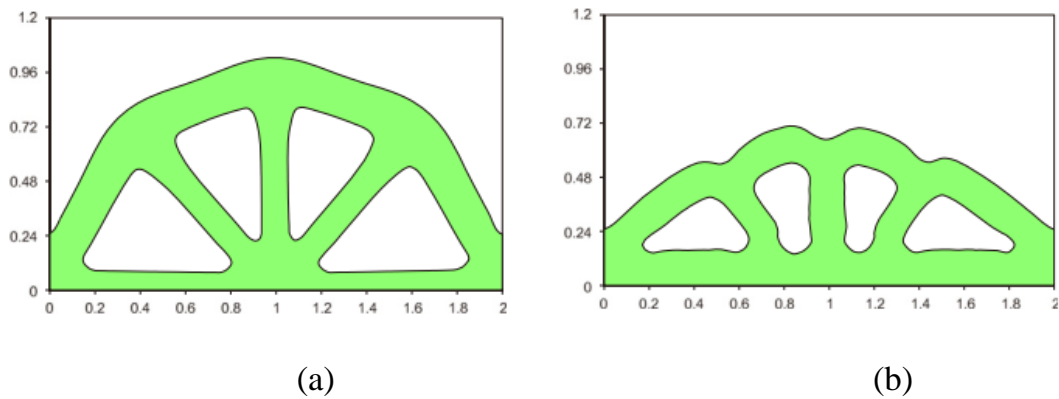
$\bar{u}_i$  et  $\bar{t}_i$  : constantes de déplacement et de la traction respectivement

### 3. Limitation de l'optimisation topologique pour la fabrication additive

Malgré ses avantages, l'optimisation topologique présente certaines limites qu'il faut prendre en compte. Parmi ces limites, on peut citer : la contrainte de la longueur minimale, la contrainte de connectivité, les structures en porte à faux.

#### 3.1. La contrainte de la longueur minimale

Les structures optimisées, qui peuvent comporter des caractéristiques de petite taille telles que de petits trous ou des parois minces, peuvent parfois être difficilement réalisables par fabrication additive en raison des contraintes liées à la précision des machines utilisées. Ainsi, afin de garantir la faisabilité des conceptions obtenues, il devient nécessaire d'intégrer une contrainte de longueur minimale dans le processus d'optimisation topologique. Cette contrainte vise à éliminer les caractéristiques non réalisables, contribuant ainsi à la qualité et à la praticité du résultat final [17]. La **Figure 2** offre une illustration comparative d'une pièce optimisée, mettant en évidence les différences entre une optimisation intégrant la contrainte de longueur minimale et une optimisation sans cette contrainte.



**Figure 2.** Pièce optimisée (a) sans la contrainte de longueur minimale (b) avec cette contrainte [18]

Parmi les méthodes employées pour assurer le respect de cette contrainte au sein du processus d'optimisation, on peut citer :

### 3.1.1. Le schéma d'optimisation de la topologie par filtrage et seuil

Le schéma d'optimisation de la topologie par filtrage et seuil, proposée par Zhou [17]. Dans cette approche, l'auteur déploie une formulation mathématique afin d'intégrer la contrainte de longueur minimale durant le processus d'optimisation topologique. Pour ce faire, des fonctions indicatrices structurelles sont définies en relation avec des filtres régularisés et des champs physiques au sein d'un schéma d'optimisation topologique à trois champs.

### 3.1.2. Le filtre de pas de Heaviside

Le filtre de pas de Heaviside, proposée par [19], permet un contrôle instantané sur l'épaisseur des composants structuraux dans les problèmes d'optimisation topologique. Cette capacité résulte de l'utilisation de fonctions de projection qui, indépendamment du maillage, convertissent les variables de conception nodales en fractions volumiques familières pour chaque élément.

### 3.1.3. La projection du seuil

La projection du seuil avancée par Wang [20] propose une formulation robuste, fusionnant trois projections en un unique problème min-max. Cette approche présente plusieurs avantages : premièrement, elle garantit des conceptions optimisées qui demeurent résilientes face à la sous-division ou la sur-division. Deuxièmement, elle assure un contrôle local précis de l'échelle de longueur, aussi bien pour les zones solides que vides de la conception intermédiaire. Enfin, elle permet d'obtenir des conceptions nettement définies en noir et blanc, ce résultat étant particulièrement probant pour des valeurs modérées des paramètres de projection.

### 3.1.4. Le défilement rapide

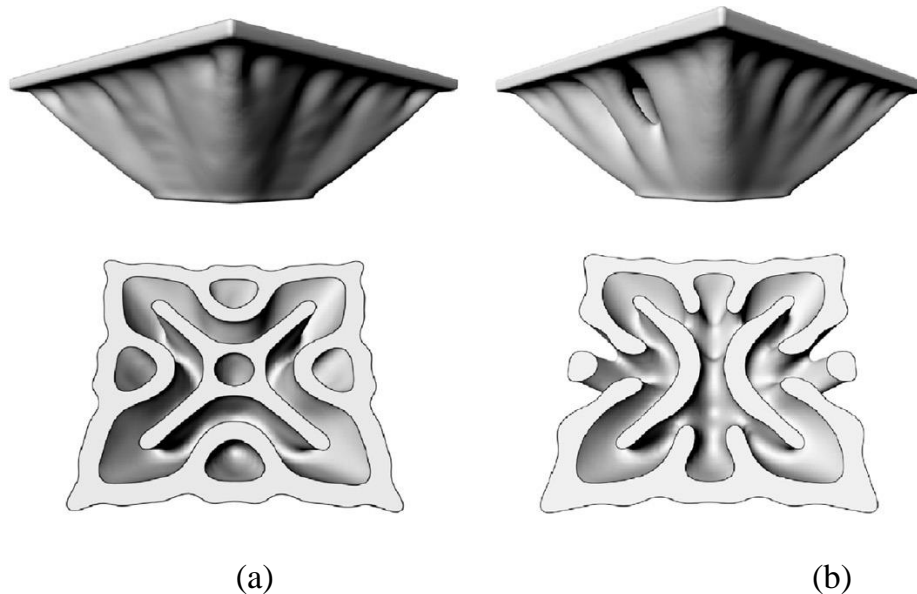
La méthode de défilement rapide proposée par [18] permet de contrôler l'échelle de longueur minimale/maximale dans l'optimisation de la topologie structurelle basée sur les ensembles de niveaux. L'échelle de longueur minimale/maximale des structures est définie à l'aide du concept de la plus petite/plus grande boule maximale inscriptible. Le squelette de la structure est utilisé pour éviter une échelle de longueur minimale nulle négligeable. Le contrôle de l'échelle de longueur est réalisé en limitant la distance entre la limite et le squelette, et la distance est construite explicitement en utilisant la méthode de marche rapide très efficace.

## 3.2. La contrainte de connectivité

Les contraintes de connectivité émergent lors de la fabrication additive, notamment dans les vides fermés. Dans de tels cas, l'introduction d'éléments de connectivité peut s'avérer délicate en raison



des défis liés à l'élimination des supports et à la fusion des poudres. Cependant, des chercheurs ont proposé diverses méthodes pour intégrer ces contraintes de connectivité dans le cadre de l'optimisation topologique contribuant ainsi à l'amélioration de la faisabilité des pièces complexes. Parmi ces méthodes, on peut mentionner : l'utilisation de la température virtuelle, la liaison des variables de conception avec les géométries vides et la connexion des vides aux conditions aux limites. La **Figure 3** illustre l'impact de la contrainte de connectivité sur un exemple de pièce optimisée. Il est notable que les vides fermés ont totalement disparu après l'intégration de cette contrainte, ce qui a pour conséquence de rendre la fabrication de la pièce plus facile.



**Figure 3.** Pièce optimisée (a) sans la contrainte de connectivité (b) avec cette contrainte [21]

### 3.2.1. La température virtuelle

La méthode de la température virtuelle, proposé par [22] suppose que les parties solides sont remplies d'un matériau virtuel à faible conductivité thermique et que les vides dans la structure sont remplis d'un matériau virtuel à forte conductivité thermique. Lorsque des vides fermés sont présents dans une structure, la valeur de la température maximale de la structure sera très élevée. Cette approche assimile la limitation de la température maximale à la contrainte de simple connexion.

### 3.2.2. Approche basée sur les contraintes latérales

L'approche basée sur les contraintes latérales, avancée par [23], permet d'optimiser la topologie tout en tenant compte de la connectivité structurelle. Le processus d'optimisation de la topologie est piloté par les mouvements et les changements de forme des vides, qui sont utilisées comme primitives de conception fondamentales. Pour garantir la connectivité structurelle, des contraintes latérales sont utilisées pour limiter les variables de conception associées aux centres de toutes les caractéristiques de vide en dehors du domaine de conception sans ajouter de contraintes non linéaires supplémentaires. Il est démontré que l'approche des contraintes latérales permet de supprimer les vides fermés et convient parfaitement à la fabrication additive.

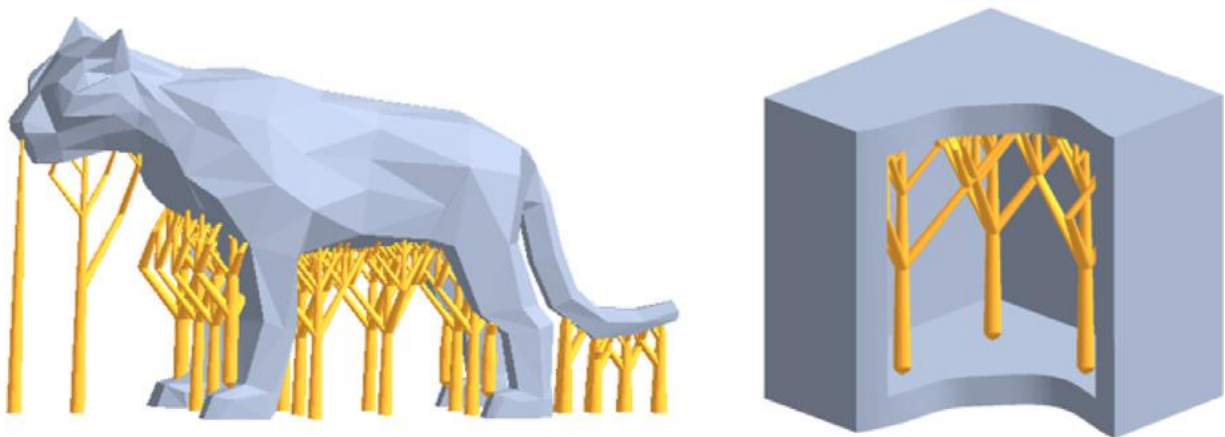
### 3.2.3. Contrôle de la connectivité structurelle

L'approche de contrôle de la connectivité structurelle, proposée par [21], se concentre sur l'utilisation de la technique d'optimisation structurelle évolutionnaire bidirectionnelle (BESO) pour contrôler la connectivité structurelle. En construisant stratégiquement des tunnels entre les vides fermés et la limite structurelle, cette technologie les élimine tout au long de la phase d'optimisation. Cette méthode démontre une capacité remarquable à générer des conceptions exemptes de vides

fermés et structurellement efficaces. En outre, il est possible d'obtenir une gamme de conceptions compétitives et variées en variant le rayon et le nombre de tunnels.

### 3.3. La contrainte de surplomb

Les structures en porte-à-faux, bien qu'elles puissent être optimisées pour une meilleure efficacité, nécessitent souvent des supports pour éviter leur effondrement lors de la fabrication. Cependant, le retrait de ces supports post-fabrication peut entraîner une réduction de l'efficacité matérielle ainsi qu'une augmentation du temps de post-traitement. Une approche prometteuse pour résoudre ce défi consiste à intégrer les contraintes de surplomb dans le processus d'optimisation topologique, permettant ainsi la création de structures autoportantes. Les chercheurs foisonnent de propositions novatrices visant à résoudre cette contrainte, parmi lesquelles on peut citer : l'optimisation basée sur l'orientation, la génération de structures de support sous forme de branches d'arbre et l'utilisation de procédures de filtration. La **Figure 4** expose des exemples où les supports sont configurés sous la forme de branches d'arbre.



**Figure 4.** Exemple des supports sous forme des branches d'arbre [24]

#### 3.3.1. L'optimisation basée sur l'orientation

Les structures de support utilisées dans le contexte de la fabrication additive à matériau unique sont réduites grâce à l'utilisation d'un optimiseur de forme basé sur l'orientation, développé par [25]. Les opérations de réorientation sont appliquées aux tétraèdres dont les facettes de surface sont dirigées vers le bas, ce qui alimente le processus d'optimisation. La condition de minimisation de la variation de forme est définie en tant qu'énergie de rigidité globale. Une solution de forme fermée est obtenue à la suite d'une analyse de l'optimisation locale pour déterminer une rotation minimale sur la sphère de Gauss. De plus, cette méthode est élargie pour inclure des contrôles de déformation ainsi qu'une fonction de recherche de direction pour obtenir le meilleur résultat d'impression.

#### 3.3.2. La génération de structures de support sous forme de branches d'arbre

La conception de structures de support sous la forme de branches d'arbre a été élaborée par [24]. Le système Lindenmayer (système L) et un octree sont utilisés pour la création d'une structure de support sous forme d'arbre. Dans un premier temps, les principes fondamentaux du système L sont utilisés pour construire une structure de support arborescente initiale. En outre, la structure de données octree est exploitée pour acquérir rapidement des données d'intersection entre les rayons arborescents et le modèle de surface maillé. En outre, la détermination de la corrélation topologique au sein de la structure arborescente permet d'exécuter une opération d'élagage. Par la suite, un logiciel de génération automatisée de structures de support est développé.

#### 3.3.3. L'utilisation de procédures de filtration.

L'approche d'optimisation topologique par l'utilisation de procédures de filtration est avancée par Langelaar [26]. Cette approche s'intègre parfaitement à la formulation prédominante basée sur la densité, résolvant efficacement les problèmes de conceptions non réalisables par la fabrication additive et les inefficacités qui en découlent. En intégrant un modèle simplifié du processus de fabrication additive dans la formulation du problème, les contraintes liées à l'angle de surplomb, spécifiques aux processus de fabrication additive ciblés, sont scrupuleusement appliquées à chaque étape du processus d'optimisation. Cette application est facilitée par la mise en œuvre d'un filtre spatial appliqué couche par couche, imitant la procédure d'impression de la pièce. Le processus d'optimisation est guidé par l'évaluation des performances de la géométrie résultante après impression, aboutissant à la création de conceptions intrinsèquement autoportantes et imprimables.

#### 4. Conclusion

L'optimisation topologique possède le potentiel d'amplifier les avantages de la fabrication additive (FA) en exploitant pleinement l'immense espace de conception qu'elle autorise. Toutefois, les approches d'optimisation topologique doivent impérativement prendre en compte les contraintes spécifiques à la FA lors de la phase de conception, ce qui permet d'obtenir des résultats précis et hautement performants.

Dans cette étude, nous avons présenté les différentes méthodes les plus couramment employées en optimisation topologique, ainsi que leurs formulations respectives. Ensuite, nous avons examiné plusieurs travaux de recherche ayant conduit à des études comparatives des méthodes d'optimisation topologique. Par la suite, nous avons abordé certaines contraintes qui doivent être prises en considération lors de l'optimisation pour la fabrication additive.

En conclusion, nous nous joignons aux chercheurs qui estiment que ce domaine de recherche est prometteur et mérite d'être approfondi, notamment en explorant davantage les paramètres de l'optimisation topologique et en effectuant une caractérisation plus détaillée des matériaux utilisés en fabrication additive.

#### Bibliographie

- [LKO 1] O. Lkadi, M. Nassraoui, and O. Bouksour, "Aperçu sur la fabrication additive : technologies , matériaux , applications An Overview on Additive Manufacturing : Technologies , Materials and Applications," *Incert. fiabilité des systèmes multiphysiques*, vol. 6, no. Salmi 2021, pp. 1–15, 2022.
- [BEM 2] M. P. Bendsøe, N. Kikuchi, M. P. Bendsoe, and N. Kikuchi, "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 71, no. 2, pp. 197–224, 1988.
- [SIO 3] O. Sigmund and K. Maute, *Topology optimization approaches: A comparative review*, vol. 48, no. 6. Springer, 2013, pp. 1031–1055.
- [BEM 4] M. P. Bendsøe, O. Sigmund, M. P. Bendsoe, and O. Sigmund, "Material interpolation schemes in topology optimization," *Arch. Appl. Mech.*, vol. 69, no. 9–10, pp. 635–654, 1999.
- [STM 5] M. Stolpe and K. Svanberg, "An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 22, no. 2, pp. 116–124, 2001.
- [DAX 6] X. Dai, P. Tang, X. Cheng, and M. Wu, "A variational binary level set method for structural topology optimization," *Commun. Comput. Phys.*, vol. 13, no. 5, pp. 1292–1308, 2013.
- [XIM 7] Y. M. Xie and G. P. Steven, "A simple evolutionary procedure for structural optimization," *Comput. Struct.*, vol. 49, no. 5, pp. 885–896, 1993.
- [XIL 8] L. Xia, D. Da, and J. Yvonnet, "Topology optimization for maximizing the fracture resistance of quasi-brittle composites," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 332, pp. 234–254, 2018.
- [ZHW 9] W. Zhang, Y. Zhou, and J. Zhu, "A comprehensive study of feature definitions with solids and voids for topology optimization," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 325, pp. 289–313, Oct. 2017.

- [ELA 10] A. Eljihad, M.Nassraoui, and O.Bouksour, “Optimisation topologique par la méthode SIMP d’un système multicorps,” *Incert. fiabilité des systèmes multiphysiques*, vol. 6, no. Numéro 2, 2023.
- [ZHJ 11] J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, and W. Zhang, “A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 34, no. 1, pp. 91–110, Jan. 2021,.
- [OUA 12] A. A. Ouchaoui, M. Nassraoui, and B. Radi, “The Impact of Topology Optimization Parameters in the Shape and the Strength of the Structure,” in *Proceedings of CASICAM 2022*, K. Zarbane and Z. Beidouri, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 103–113.
- [MAA 13] A. Makrizi, B. Radi, and A. El Hami, “Solution of the Topology Optimization Problem Based Subdomains Method,” vol. 2, no. 41, pp. 2029–2045, 2008.
- [IBO 14] O. Ibhadode, Z. Zhang, A. Bonakdar, and E. Toyserkani, “IbIPP for topology optimization—An Image-based Initialization and Post-Processing code written in MATLAB,” *SoftwareX*, vol. 14, p. 100701, 2021.
- [XIL 15] L. Xia and P. Breitkopf, “Concurrent topology optimization design of material and structure within FE2 nonlinear multiscale analysis framework,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 278, pp. 524–542, 2014.
- [OTM 16] M. Otomori, T. Yamada, K. Izui, and S. Nishiwaki, “Matlab code for a level set-based topology optimization method using a reaction diffusion equation,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 51, no. 5, pp. 1159–1172, 2015.
- [ZHM 17] M. Zhou, B. S. Lazarov, F. Wang, and O. Sigmund, “Minimum length scale in topology optimization by geometric constraints ☆,” *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 293, pp. 266–282, 2015.
- [XIQ 18] Q. Xia and T. Shi, “Constraints of distance from boundary to skeleton: For the control of length scale in level set based structural topology optimization,” *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 295, pp. 525–542, 2015.
- [GUJ 19] J. K. Guest, J. H. Prévost, and T. Belytschko, “Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 61, no. 2, pp. 238–254, Sep. 2004.
- [WAF 20] F. Wang, B. S. Lazarov, and O. Sigmund, “On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 43, no. 6, pp. 767–784, Jun. 2011.
- [XIY 21] Y. Xiong, S. Yao, Z.-L. L. Zhao, and Y. M. Xie, “A new approach to eliminating enclosed voids in topology optimization for additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 32, p. 101006, 2020.
- [LIS 22] S. Liu, Q. Li, W. Chen, L. Tong, and G. Cheng, “An identification method for enclosed voids restriction in manufacturability design for additive manufacturing structures,” *Front. Mech. Eng.* 2015 102, vol. 10, no. 2, pp. 126–137, 2015.
- [ZHL 23] L. Zhou and W. Zhang, “Topology optimization method with elimination of enclosed voids,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 60, no. 1, pp. 117–136, Feb. 2019.
- [ZHY 24] Y. Zhou, H. Lu, Q. Ren, and Y. Li, “Generation of a tree-like support structure for fused deposition modelling based on the L-system and an octree,” *Graph. Models*, vol. 101, pp. 8–16, 2019,
- [HUK 25] K. Hu, S. Jin, and C. C. L. Wang, “Support slimming for single material based additive manufacturing,” *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 65, pp. 1–10, 2015.
- [LAM 26] M. Langelaar, “Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 12, pp. 60–70, 2016.