

# Optimisation topologique : l'impact des choix du concepteur sur la géométrie obtenue

Elodie MORRETTON<sup>1,2</sup>, Frédéric VIGNAT<sup>1</sup>, Franck POURROY<sup>1</sup>, Philippe MARIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Grenoble Alpes, G-SCOP, F-38000 Grenoble, France

CNRS, G-SCOP, F-38000 Grenoble, France

<sup>2</sup> Zodiac Seats France, 7 rue Lucien Coupet, 36100 Issoudun, France

**Résumé**—Avec l'essor des technologies de fabrication additive, les concepteurs sont amenés à exploiter les nouvelles opportunités offertes par ces nouveaux procédés. La principale nouvelle possibilité est de pouvoir créer des formes de plus en plus complexes. Cette complexité permet d'obtenir des pièces légères avec des propriétés mécaniques équivalentes. En conséquence, les méthodes de conception ont dû s'adapter. La plupart intègre dorénavant une phase d'optimisation pour obtenir des géométries de pièce permettant d'augmenter ces performances mécaniques. Pour répondre à ce besoin, des outils deviennent incontournables comme ceux d'optimisation topologique. Ils permettent au concepteur de se rapprocher d'un design optimal c'est-à-dire supprimer la matière superflue et ne garder que celle permettant de respecter le cahier des charges. Toutefois, le concepteur tient une place importante de par le nombre de variables intervenant au cœur de l'ensemble des étapes du processus d'optimisation. Dans cet article, seront étudiés les différents impacts des choix réalisés au cours de ce processus sur la topologie finale obtenue. Quel est l'impact des décisions prises au cours de cette phase d'optimisation topologiques sur la géométrie finale de la pièce finale conçue?

**Mots-clés**— Méthode de conception, Optimisation topologique, Fabrication additive, Choix de conception.

## I. INTRODUCTION

Les procédés de fabrication additive autorisent la réalisation de pièces ayant des formes complexes. Le coût de ces pièces est sensiblement le même que pour une pièce fabriquée par des procédés traditionnels réalisant la même fonction [1]. Avec cette nouvelle liberté de formes, les méthodes de conception doivent être repensées. Cette complexité permet, pour des performances équivalentes, de réduire la masse de pièces en optimisant la répartition de la matière..

Pour s'adapter à ces nouvelles opportunités, de plus en plus de travaux émergent sur les manières de concevoir pour la fabrication additive. Certains adaptent les méthodes existantes en intégrant les nouvelles possibilités comme le Design For Manufacturing and Assembly qui a été adapté à la fabrication additive pour devenir l'approche Design For Additive manufacturing [2], [3]. D'autres partent du processus global de conception en intégrant des outils d'optimisation et de nouvelles étapes dans le processus de conception [4], [5]. Le processus d'optimisation est devenu une étape incontournable des méthodes pour la conception pour les procédés additifs.

Dans ce processus, l'optimisation topologique tient une place importante. Elle donne la répartition idéale de matière

dans un volume donné et sous des chargements et des contraintes donnés [6]. Le résultat de ces calculs renvoie une carte de densités donnant la « meilleure » répartition de masse (Figure 1). A partir de cette carte quelle géométrie le concepteur va-t-il obtenir ?

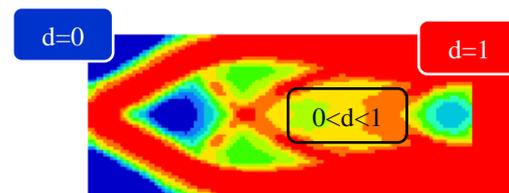


Figure 1. CARTE DES DENSITES (d)

Le rôle du concepteur dans l'obtention de la géométrie finale n'est pas à minimiser comme [7] le présente. L'article [7] s'intéresse à son impact sur la phase de reconstruction de géométrie. Mais est-ce également le cas pour la phase d'optimisation topologique ? Dans cette phase, le concepteur intervient fréquemment autant en amont sur le modèle et la paramétrisation du calcul d'optimisation topologique qu'en aval sur la géométrie récupérée après le calcul. Quel sera l'impact de ces décisions sur la géométrie ?

Pour répondre à cette question, l'article présentera, tout d'abord, les différentes étapes du processus d'optimisation ainsi que l'identification des paramètres que le concepteur pourra modifier. Puis, six chemins possibles seront décrits que le concepteur pourrait emprunter. Les résultats retournés par ces chemins permettront d'observer les interprétations et les choix fait par le concepteur. Puis ces différences seront analysées et enfin les perspectives et conclusions tirées de ce travail viendront finaliser cet article.

## II. LE PROCESSUS D'OPTIMISATION : IDENTIFICATION DES ETAPES INTRODUISANT DE LA VARIABILITE SUR LE RESULTAT FINAL.

Le but de ce processus est d'obtenir un design optimal par rapport à un objectif donné au travers des outils d'optimisation topologique.

Du point de vue du concepteur, le processus global d'optimisation topologique peut se segmenter en quatre grandes phases : la modélisation de la pièce, le pré traitement du calcul d'optimisation topologique, le calcul, le post traitement du calcul (Figure 2).

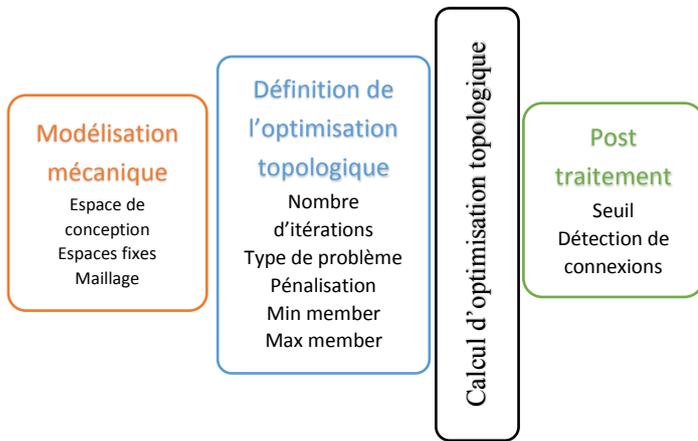


Figure 2. LES GRANDES ETAPES DU PROCESSUS D'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE

### A. La modélisation de la pièce

#### 1) Définition de l'espace de conception et des espaces fixes

L'espace de conception est défini à partir de la pièce existante et de son environnement. Il délimite l'espace dont on peut disposer pour réaliser l'optimisation. C'est-à-dire l'espace dans lequel on peut mettre de la matière sans gêner le fonctionnement global. Toutefois dans la définition de celui, il faut également prendre en compte la manière dont elle peut être assemblée au reste du mécanisme : montage par vis, espace pour introduire les outils...

Les espaces fixes contraignent le calcul à laisser la matière intacte dans ces zones. Ces zones sont liées à des surfaces fonctionnelles ou aux points d'application des efforts et des conditions aux limites. Elles viennent contraindre le résultat final, aussi il est préférable de les choisir aussi limitées que possible pour limiter leur impact sur la géométrie finale obtenue.

#### 2) Définition du maillage

Les volumes définis vont être maillés pour pouvoir effectuer l'optimisation. Or, l'algorithme SIMP (Simple Isotropic Material with Penalization) utilisé par le logiciel d'optimisation topologique Optistruct d'Altair – qui sera utilisé dans l'étude de cas – est dépendant du maillage c'est-à-dire que la géométrie va fluctuer selon que le maillage soit fin ou grossier [8].

### B. La définition de l'optimisation

Dans le calcul d'optimisation topologique interviennent plusieurs paramètres qui vont être définis. Ils permettent de régler le calcul pour atteindre au mieux l'objectif fixé. Ces paramètres seront décrits par la suite.

#### 1) Définition du type de problème d'optimisation :

A partir du problème initial, il faut le transformer sous forme d'un objectif et d'astreintes.

Notre objectif étant de réduire la masse de la pièce, il existe deux possibilités de modélisation pour ce problème :

- Minimiser la masse tout en respectant une astreinte en contrainte (au sens contrainte mécanique dans le

matériau) et une astreinte en déplacement (au sens de déplacement maximal admissible des points de la pièce déformée).

- Minimiser la compliance (l'énergie de déformation élastique) tout en respectant une astreinte en masse maximale admissible. La compliance prend en compte dans son calcul la contrainte et la déformation.

#### 2) Définition du processus d'optimisation à réaliser

Pour atteindre l'objectif de masse souhaité, on peut choisir de le faire en une fois ou en plusieurs boucles d'optimisation topologique. Nous ne parlons pas du processus itératif interne à l'algorithme d'optimisation topologique mais de macro-itérations consistant à relancer le processus après que le logiciel aura convergé lors d'une première optimisation. Ceci est rendu possible dans le cas de l'utilisation du problème en minimisation de compliance où la masse est utilisée comme une astreinte. Le but de ce processus est d'essayer d'amener le calcul à créer de nouveaux trous dans la topologie.

La boucle itérative est composée des étapes de modélisation, de définition de l'optimisation et de post traitement. La différence est qu'à partir de la deuxième itération, l'espace de conception évolue pour correspondre à la topologie obtenue par le post traitement de l'optimisation précédente. Sont visés les mêmes objectifs que dans le calcul composé d'une seule boucle.

#### 3) Le calcul d'optimisation

Plusieurs algorithmes peuvent être utilisés pour réaliser un calcul d'optimisation. Dans cet article, l'algorithme étudié sera l'algorithme SIMP car c'est celui implémenté dans les outils d'optimisation d'Altair. Ces logiciels seront utilisés dans les études de cas. [9]

Ce calcul permet d'obtenir une carte de densité composée de branches comme celles visibles sur la Figure 1. Elle représente la topologie répondant au mieux aux objectifs fixés par le problème mécanique et son modèle numérique.

#### 4) Définition des principaux paramètres de l'algorithme d'optimisation topologique

Le coefficient de pénalisation permet de passer d'un résultat d'optimisation topologique avec beaucoup de semi-densités à un résultat mieux discriminé, composé principalement de densité à 0 et à 1 [9]. Ce coefficient intervient dans l'algorithme d'optimisation au niveau du calcul de la matrice de raideur des éléments ( $\bar{K}(\rho)$ ), comme exposant (p) (éq. (1) :). Toutefois, il peut introduire un effet indésirable sur le résultat final : l'effet damier (Figure 7(a))

$$\text{éq. (1): } \bar{K}(\rho) = \rho^p K$$

Le paramètre « min member » a des intérêts du point de vue algorithmique : en limitant l'impact de la taille du maillage sur le résultat d'optimisation topologique ainsi qu'en supprimant l'effet damier apparaissant avec l'introduction de la pénalisation [8], [9]. Mais, il présente également un intérêt du point de vue de l'intégration des contraintes de fabrication. Ce paramètre permet d'obliger les branches/membres créés pendant l'optimisation d'avoir une épaisseur minimale. Celle-

ci est définie par rapport à la capabilité de la machine à fabriquer des poutres ou des parois fines.

Contrairement au « min member », le paramètre « max member » permet de limiter les épaisseurs maximales des branches. Il montre un intérêt lorsque le résultat souhaité doit avoir des branches d'épaisseurs équivalentes afin de créer des structures architecturées. De plus, ce coefficient est toujours associé au paramètre « min member ». [10]

### C. Le post traitement du calcul

A l'issue d'un calcul d'optimisation topologique, le résultat obtenu est une carte des densités. Pour pouvoir être analysé et utilisé, ce résultat a besoin d'être post traité pour permettre au concepteur de faire émerger la topologie de sa pièce.

#### 1) Définition du seuil

La première étape du post traitement est de choisir une valeur de densité à partir de laquelle de la matière pleine sera ajoutée dans les zones où les densités seront supérieures au seuil tandis que dans celles où les densités seront inférieures à ce seuil il n'y aura pas de matière [11]

#### 2) Définition de la méthode de nettoyage

Lors du choix du seuil de densités, des discontinuités dans la géométrie peuvent être créées (Figure 3).



Figure 3. DISCONTINUITES : FIGURE 1 AVEC UN SEUIL A 0,8

Pour rattacher ces éléments isolés à la géométrie, plusieurs approches existent :

- Une approche dite « manuelle » : le concepteur dans l'interface de maillage peut venir créer les branches pour rattacher les éléments isolés ou il peut également venir les supprimer jugeant qu'ils n'étaient pas fondamentaux dans la tenue de la structure globale
- Une approche automatique : le logiciel va venir détecter ces discontinuités et il va aller chercher dans les densités inférieures au seuil pour créer des raccords mais il ne peut pas supprimer d'éléments isolés.

A partir de cette identification de paramètres, six chemins vont être sélectionnés pour illustrer l'impact des choix effectués par le concepteur tout au long du processus d'optimisation sur la géométrie obtenue.

### III. ETUDE DE CAS : LE CANTILEVER

L'objectif de cette étude est de montrer que selon l'interprétation du problème et les chemins utilisés la géométrie finale obtenue, par le processus d'optimisation topologique décrit dans la partie I, peut être fondamentalement différente. Une analyse systématique de l'influence de chaque paramètre et de leurs interrelations nécessiterait un plan d'expériences très complexe et n'est pas l'objet de cet article. Seuls les résultats obtenus par quelques « chemins » (ensemble de paramètres) d'optimisation vont être présentés afin de montrer la diversité des formes possibles en sortie de processus et de

convaincre de l'importance des choix du concepteur dans ce contexte et donc de la place importante qu'il garde dans le processus de conception.

Dans l'analyse des chemins, le but est d'avoir une pièce avec une géométrie simple avec peu de contraintes liées à son environnement, et que le résultat de celle-ci soit facilement interprétable. Pour ces raisons, la pièce étudiée dans cette partie sera le cantilever : une poutre 2D encastree. Or l'étude de cette poutre encastree est un exemple largement diffusé dans la littérature traitant de l'optimisation topologique. Ceci permettra d'avoir un point de référence et de comparaison pour l'analyse.

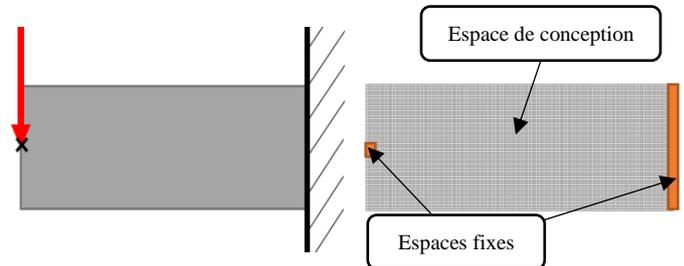


Figure 4. SCHEMA DU PROBLEME MECANIQUE (A GAUCHE) & ESPACE DE CONCEPTION ET ESPACES FIXES (A DROITE)

Les dimensions initiales sont 120 x 50 mm avec une épaisseur de 20mm. Le matériau utilisé est du titane. Les conditions limites de cette étude sont un encastrement à une extrémité et un effort de 20000N centré appliqué à l'autre extrémité. L'objectif de notre problème mécanique est de réduire la masse de cette pièce avec la mise en données décrite ci-dessus.

Les différents chemins qui seront appliqués sur cet exemple du cantilever sont décrits dans le Tableau 1. Tous auront comme objectif d'atteindre une masse pour l'espace de conception de 135g. Pour l'utilisation du problème en minimisation de compliance, la masse est une astreinte mais pour le problème en minimisation de masse, pour avoir un point de comparaison, les astreintes en contrainte mécanique et en déplacement ont été définies par rapport aux déplacements maximaux et contraintes maximales d'une structure de la masse souhaitée.

Dans cette étude, il a été choisi de mettre des espaces fixes au niveau des conditions limites que ce soit au niveau des liaisons ou des efforts appliqués. Ces espaces seront composés :

- D'une rangée d'éléments sur toute la hauteur du cantilever du côté de l'encastrement
- Et deux éléments jouxtant le nœud sur lequel l'effort va être appliqué.

Ces espaces ont été choisis les plus petits possibles pour laisser le maximum de liberté au calcul pour positionner la matière.

Les chemins présentés dans cet article ont été choisis de façon à pouvoir observer l'impact des différents paramètres explicités dans la partie II.

### A. Chemin 1 :

#### 1) Présentation de l'approche suivie.

Les paramètres liés à l'algorithme d'optimisation ont été choisis de façon à ce que la carte de densité obtenue soit composée essentiellement de densité à 0 et à 1 tout en évitant l'effet damier et en supprimant les branches de faibles épaisseurs. De plus, le problème d'optimisation topologique a été choisi en minimisation de compliance pour atteindre notre objectif en masse sans se préoccuper des valeurs des contraintes et des déplacements dans un premier temps. Enfin, dans le post traitement de la pièce, un seuil à 0.5 a été choisi car le résultat d'optimisation est véritablement binaire. Cette carte ne pose pas de problèmes d'interprétation sur les éléments isolés donc les connexions se feront avec les outils automatiques (Figure 5)

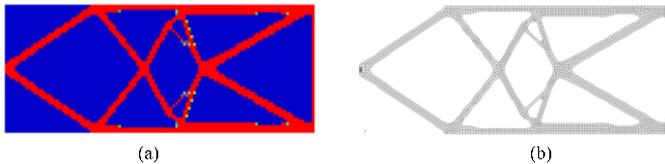


Figure 5. CHEMIN 1 (a) CARTE DES DENSITES (b) RESULTAT POST TRAITE.

#### 2) Analyse

La hauteur limitée de l'espace de conception contraint la géométrie obtenue. Elle vient épouser les contours en cherchant à tendre vers le résultat Figure 10 c'est-à-dire vers deux poutres travaillant en traction/compression reliées par leur extrémité.

### B. Chemin 2

#### 1) Présentation de l'approche suivie.

Pour ce chemin, les mêmes choix que pour le Chemin 1 seront effectués sauf qu'ici deux boucles d'optimisation topologique seront réalisées pour atteindre le même objectif de masse finale (Figure 6). Cette démarche en 2 temps est couramment utilisée afin d'identifier rapidement (objectif d'optimisation peu ambitieux) les zones où la matière est très peu utile, puis effectuer une optimisation plus fine et ambitieuse mais sur une taille de problème numérique réduite puisque traité sur un volume sensiblement réduit.

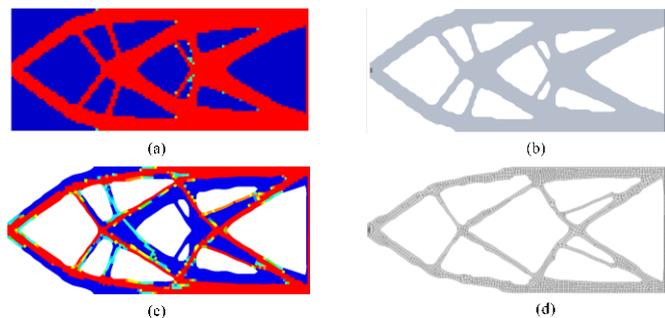


Figure 6. CHEMIN 2 (a) CARTE DES DENSITES DE LA PREMIERE BOUCLE (b) RESULTAT POST TRAITE AVEC UN SEUIL DE 0,5 (c) CARTE DE DENSITE DE LA DEUXIEME BOUCLE (d) RESULTAT FINAL POST TRAITE.

#### 2) Analyse

Utiliser une double optimisation pour atteindre l'objectif de réduction de masse vient ajouter des contraintes

supplémentaires au calcul notamment à cause de frontières restrictives dans la deuxième itération. La matière vient se coller sur ces dernières cherchant à les franchir.

### C. Chemin 3

#### 1) Présentation de l'approche suivie.

Dans la phase de modélisation de ce chemin, afin de limiter les concentrations de contraintes liées à la proximité de l'encastrement, l'espace fixe a été élargi artificiellement à 12mm au lieu de 1 mm. L'ensemble des paramètres liés à la définition du problème d'optimisation sont identiques au Chemin 1 sauf le paramètre « min member » qui a été désactivé pour garder toutes les branches (Figure 7). De plus, après optimisation, la valeur du seuil a été passée à 0.4 pour garder le maximum de branches. Cela permet de distinguer leur direction et de limiter le nombre d'éléments isolés. Enfin, les connexions de ces éléments ont été réalisées de manière manuelle afin de pouvoir : réaliser les connexions nécessaires, rajouter des éléments dans certains trous créés par l'étape du seuillage, choisir l'épaisseur des branches et supprimer les éléments qui ne lui semblent pas nécessaire.

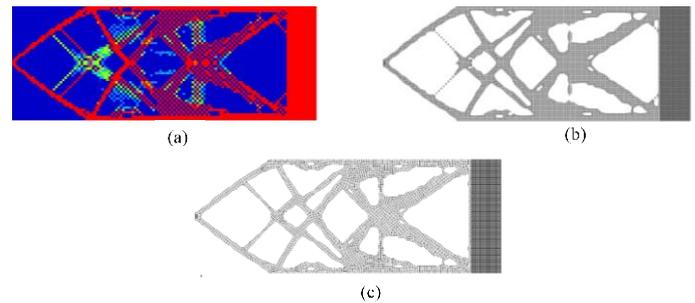


Figure 7. CHEMIN 3 (a) CARTE DES DENSITES (b) RESULTAT AVEC UN SEUIL DE 0.4 (c) RESULTAT POST TRAITE.

#### 2) Analyse

Utiliser le coefficient de pénalisation sans l'associer au paramètre « min member » fait apparaître un effet damier. Ce dernier a un impact important sur le résultat obtenu après seuillage. Pour cet exemple un seuil de 0,4 a été choisi car les connexions étaient plus simples à déterminer qu'avec un seuil plus élevé.

### D. Chemin 4

#### 1) Présentation de l'approche suivie.

Comme pour le Chemin 3, l'espace fixe a été allongé. D'autre part, le problème d'optimisation utilisé en termes d'objectif et d'astreintes est la minimisation de masse pour se rapprocher du problème initial qui est de minimiser la masse avec des critères à respecter en termes de déplacement maximal et de contrainte mécanique maximale. De plus, les épaisseurs de branches ne devront pas être inférieures à 12mm. Pour les autres choix effectués se référer au Tableau 1.

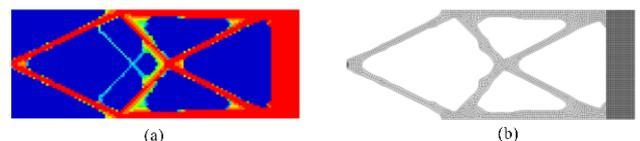


Figure 8. CHEMIN 4 (a) CARTE DES DENSITES (b) RESULTAT POST TRAITE.

## 2) Analyse

Dans cet exemple, le « min member » est très élevé par rapport à la taille de maille. Ce qui vient ajouter un critère très contraignant. De plus, l'apparition des semi-densités est plus fréquente dans des problèmes en minimisation de masse et lorsque les astreintes sont très contraignantes (Figure 8). Cette géométrie présente donc un nombre réduit de branches fines et plus encore après seuillage.

### E. Chemin 5

#### 1) Présentation de l'approche suivie.

Pour ce chemin, tous les choix effectués en amont du calcul d'optimisation topologique sont les mêmes que pour le Chemin 1 à l'exception de l'activation du paramètres « max member » afin de n'avoir que des épaisseurs de branches entre [min member ; max member] (Figure 9). En conséquence, la valeur du seuil a une nouvelle fois changé à cause de l'apparition de nombreuses semi-densités. Il a dû être augmenté (Tableau 1) pour supprimer un grand nombre de ces dernières. Enfin, la réalisation des connexions a été faite manuellement pour pouvoir principalement supprimer les volumes « parasites » qui ne participent pas à la tenue mécanique de la pièce.

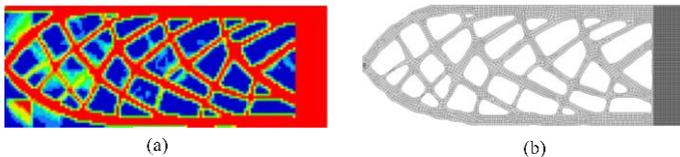


Figure 9. CHEMIN 5 (a) CARTE DES DENSITES (b) RESULTAT POST TRAITE.

## 2) Analyse

Utiliser le paramètre « max member » permet de faire apparaître des structures architecturées avec des branches d'épaisseur quasi-constante. Toutefois, ces astreintes fortes viennent dégrader la discrimination du résultat en distribution de densité et donc renforcer l'impact du choix du seuil sur la géométrie finale.

### F. Chemin 6 :

#### 1) Présentation de l'approche suivie.

Pour ce chemin-ci comme pour le Chemin 3, il a été choisi d'élargir l'espace fixe lié à l'encastrement. De plus, l'espace de conception a été agrandi dans le sens de la hauteur. Cet exemple (Figure 10) diffère des autres car il bifurque à l'étape de modélisation mécanique. Il peut donc être considéré comme un autre problème de conception et non comme un réglage différent du problème d'optimisation. Pour les valeurs des autres paramètres influents se référer au (Tableau 1).

## 2) Analyse

De prendre un volume de conception important permet au calcul d'optimisation de placer la matière le plus judicieusement possible sans être contraint par des frontières pouvant être trop étroites.

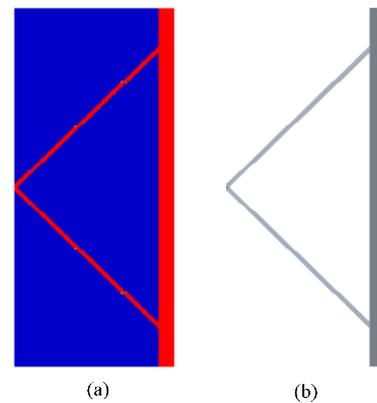


Figure 10. CHEMIN 6 (a) CARTE DES DENSITES (b) RESULTAT POST TRAITE.

## IV. ANALYSE GLOBALE

Au travers ces études de cas, plusieurs chemins ont été identifiés afin d'obtenir des géométries différentes à la sortie du processus d'optimisation. Les différences se notent autant en termes de structures de la pièce qu'en termes de performances : atteinte de l'objectif, déplacement maximal et contrainte maximale.

Les résultats du chemin 1,2 et 4 sont semblables en termes de performances. Ils ont tous les trois atteint la masse objectif de 135g avec des performances mécaniques équivalentes : la contrainte maximale autour de 900 MPa et un déplacement maximal autour de 1.8 mm. Mais en termes de structure, la géométrie 1 et la géométrie 2 ont la même topologie au sens de la caractéristique d'Euler [12] mais des formes différentes : connectivité et orientation des branches. Alors que la géométrie 4 n'a ni la même topologie ni la même forme. Toutefois, ces trois géométries ont tout de même une structure primaire similaire (Figure 11).

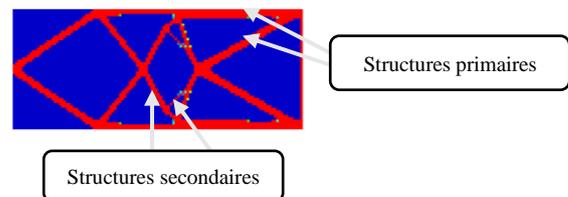


Figure 11. LES DIFFERENTS TYPES DE STRUCTURES

Les résultats du chemin 3 et 5 n'ont quant à eux pas atteint l'objectif de masse fixé. De plus, les performances mécaniques finales sont en deçà des performances attendues. Cela montre qu'il reste une marge de progression pour atteindre l'objectif en masse en envisageant par exemple une deuxième phase d'optimisation. D'autre part, leurs topologies sont réellement très différentes des géométries citées précédemment même si elles gardent la même structure primaire.

Le résultat du chemin 6 quant à lui donne une topologie bien différente des cinq autres résultats car son espace de conception a été rehaussé pour occuper tout l'espace disponible. De plus, la masse atteinte est de 103g meilleure que la masse escomptée avec des performances mécaniques nettement meilleures : une contrainte trois fois inférieure aux autres ainsi qu'un déplacement maximal relativement faible.

	Paramètres										Résultat		
	Dimensions de l'espace de conception	Dimensions des espaces fixes	Taille du maillage	Nombre d'itérations	Type de problème	Coefficient de pénalisation	Min member	Max member	Seuil	Type de connexion	Masse finale	Contrainte maximale	Déplacement maximal
Chemin 1	H = 50 mm	L = 1 mm	1 mm	1	Minc + astm *	2	3 mm	Off	0.5	Automatique	131 g	956 MPa	1,8 mm
Chemin 2	H = 50 mm	L = 1 mm	1 mm	2	Minc + astm *	2	3 mm	Off	0.5	Automatique	134 g	900 MPa	1,7 mm
Chemin 3	H = 50 mm	L = 12 mm	1 mm	1	Minc + astm *	2	Off	Off	0.4	Manuelle	200 g	845 MPa	1,8 mm
Chemin 4	H = 50 mm	L = 12 mm	1 mm	1	Minm + astc + astd **	2	12 mm	Off	0.5	Automatique	128 g	954 MPa	2,2 mm
Chemin 5	H = 50 mm	L = 12 mm	1 mm	1	Minc + astm *	2	3 mm	12 mm	0.6	Manuelle	239 g	535 MPa	1,3 mm
Chemin 6	H = 300 mm	L = 12 mm	1 mm	1	Minc + astm *	2	3 mm	Off	0.5	Automatique	103 g	360 MPa	0,5 mm

\* problème en minimisation de compliance avec une astreinte en masse

\*\* problème en minimisation de masse et des astreintes en contrainte et en déplacement

Tableau 1. VALEUR DES PARAMETRES IMPACTANTS IDENTIFIES

## V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats des chemins observés donnent des géométries très différentes tant sur la topologie que sur la forme. Chaque décision prise conduit à des résultats différents qui respectent plus ou moins le cahier des charges initial. Donc, définir une démarche d'optimisation topologique pour limiter ces divergences sur la géométrie finale obtenue semble nécessaire. Il s'agira par exemple d'affiner la description de la démarche, les étapes, et surtout identifier les impacts de chaque paramètre et leurs influences croisées, au travers une étude de sensibilité, pour aboutir à un guide de bonnes pratiques. Ce guide permettrait d'assurer que le résultat obtenu en termes de topologie et de performances répond bien aux espérances du concepteur.

Enfin, pour les chemins n'atteignant pas la valeur de masse objectif, une deuxième phase devrait être envisagée dans ce processus, via une optimisation de forme ou paramétrique, permettant d'affiner les dimensions de la topologie obtenue.

## VI. REFERENCES

- [1] B. CONNER, G. MANOGHARAN, A. MARTOF, L. RODOMSKY, C. RODOMSKY, D. JORDAN, and J. LIMPEROS, "Making sense of 3-D printing : Creating a map of additive manufacturing products and services," *Additive Manufacturing*, 2014, Vol. 1, pp. 64–76.
- [2] I. GIBSON, D. ROSEN, and B. STUCKER, *Additive Manufacturing Technologies*. N° 978-1-4419-1119-3, Springer, 2010.
- [3] N. BOYARD, M. RIVETTE, O. CHRISTMANN, and S. RICHIR, "A design methodology for parts using additive manufacturing," *Actes de : the 6<sup>th</sup> International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, pp 399, Leiria, 2013.
- [4] C. EMMELMANN, P. SANDER, J. KRANZ, and E. WYCISK, "Laser Additive Manufacturing and Bionics : Redefining Lightweight Design," *Physics Procedia*, 2011, Vol. 12, pp. 364–368.
- [5] M. KUMKE, H. WATSCHKE, and T. VIETOR, "A new methodological framework for design for additive manufacturing," *Virtual and Physical Prototyping*, 2016, Vol. 11, N° 1, pp. 3–19.
- [6] D. BRACKETT, I. ASHCROFT, and R. HAGUE, "Topology optimization for additive manufacturing," *Actes de: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 348–362, Austin, 2011.
- [7] P. DOUTRE, E. MORRETTON, T. VO, P. MARIN, F. POURROY, G. PRUDHOMME, and F. VIGNAT, "Comparison of some approaches to define a CAD model from topological optimization in design for additive manufacturing.," *Actes de : JCM2016*, pp. 233–240, Catane, septembre 2016.
- [8] O. SIGMUND, J. PETERSSON, "Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima," *Structural Optimization*, 1998, Vol. 16, N°2, pp. 68–75.
- [9] M. ZHOU, Y. SHYY, H. THOMAS, "Checkerboard and minimum member size control in topology optimization," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2001, Vol. 21, N°2, pp. 152–158.
- [10] J. GUEST, "Imposing maximum length scale in topology optimization," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2009, Vol. 37, N°5, pp. 463–473.
- [11] Y. HSU, M. HSU, C. CHEN, "Interpreting results from topology optimization using density contours," *Computer & Structures*, 2001, Vol. 79, N°10, pp 1049-1058.
- [12] J. VERDIER, "Caractéristique d'Euler-Poincaré". *Bulletin de la Société Mathématique de France*, 1973, Vol. 101, pp. 441-445.