

# Optimisation topologique appliquée à la conception de pièce réalisées par fabrication additive

Guillaume LE VERGE, Julien FEREC, Gilles AUSIAS, Yves GROHENS

*Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL), Univ. Bretagne Sud, FRE CNRS 3744, IRDL, F-56100 Lorient, France*

**Résumé** — L'industrie automobile et ses sous-traitants sont confrontés à des besoins de flexibilité de production liés aux enjeux de personnalisation des véhicules (petites et moyennes séries) qui se traduit par une demande forte pour de nouveaux outils de production rapides et économiques de mise en œuvre. L'optimisation topologique associée à la fabrication additive permet de fabriquer des pièces non réalisables par des procédés conventionnels (enlèvement de matière), avec des matériaux métalliques ou polymères. Ici, une biellette de reprise de couple en est le parfait exemple.

**Mots clés** — Fabrication additive , Optimisation topologique.

## 1 Introduction

L'optimisation de structures est une des préoccupations essentielles pour la conception des systèmes dans l'industrie de la mécanique (génie civil, aéronautique, automobile...). Les bureaux d'études ne se contentent pas d'améliorer les performances mécaniques des pièces qu'ils conçoivent, mais ils cherchent également à optimiser leur poids, leur encombrement et leur coût de réalisation. Le problème qui nous intéresse ici, crucial dans beaucoup d'applications industrielles, est de trouver une forme de structure ayant le meilleur compromis entre sa résistance et sa masse[1].

## Présentation du problème

La pièce bleue visible en figure 1.1, forme dans la plupart des cas l'interface entre deux éléments de structure du véhicule (par exemple châssis-moteur). Pour contrôler au mieux les mouvements de grande amplitude du moteur sous certaines conditions, sont développées ce que l'on appelle des biellettes de reprise de couple.



FIGURE 1.1 – *Emplacement d'une/des biellette(s)*

Actuellement, la conception de la biellette n'est pas adaptée aux sollicitations imposées. Effectivement, cette biellette travaille en traction/compression et ne répond pas aux attentes de l'entreprise.

En figure 1.2, il est possible d'apprendre au mieux les différents composants de cette biellette. Actuellement ces biellettes sont généralement fabriquées en fonte d'aluminium avec des inserts en élastomère vulcanisé pour réduire la transmission des vibrations. Le projet FUI Dynafib a pour but de réduire la

masse de ce type de pièces automobiles. Le projet a débouché sur une pièce la masse plus légère constituée d'un noyau fait de thermoplastique chargé de fibres courtes qui peut être injecté ou imprimé et d'une peau fait de thermoplastique renforcé de fibres continues qui pourrait être déposée par un robot par la technologie ATP. Le projet a pour objectif de passer une étape supplémentaire dans le développement et l'optimisation de cette pièce en adaptant la morphologie de la biellette en fonction de ses sollicitations.

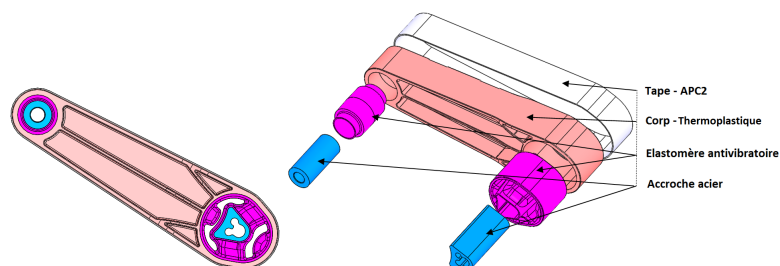


FIGURE 1.2 – *Éclaté de la biellette existante*

### *Tape - APC2*

Le matériau composite carbone/PEEK choisi pour créer un renfort en traction pour notre étude est l'APC-2 (Aromatic Polymer Composite) [2]. Il se présente sous forme de plis pré-imprégnés unidirectionnels dont l'épaisseur du pli vierge est 0,18 mm. Ce matériau composite contient 62% en masse en moyenne de fibres, soit environ 55% en volume. La tenue en traction est de l'ordre 300 MPa. Les propriétés mécaniques sont données ci dessous.

Module de Young (GPa)	E11	E22	E33
	137	9.4	9.1
Coefficients de Poisson	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
	0.33	0.32	0.40
Module de cisaillement (GPa)	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
	5.1	4.7	3.2

TABLE 1.I – Propriétés mécaniques APC-2 [2]

### *Polycarbonate*

*Contrainte à la rupture = 57 MPa*

*Déformation à la rupture = 4.8%*

*Module de traction = 1944 MPa*

### *Élastomère antivibratoire*

La partie élastomère est une partie significative du problème. En effet, les déformations importantes dues aux caractéristiques matériaux entraînent des répartitions des efforts dans la biellette qui sont fonctions du comportement de l'élastomère. Nous supposons ces élastomères homogènes, isotropes et incompressibles. Grâce au logiciel de simulation numérique *Abaqus*, il est possible d'introduire des coefficients de Mooney-Rivlin qui régissent l'hyperélasticité du matériau en y introduisant les variables  $C_{01}$  et  $C_{10}$  issues de l'équation de l'énergie de déformation :

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

Les valeurs des coefficients choisis sont récapitulé sur le tableau 1.II, et sont issues d'essais réalisés sur des élastomères vulcanisés [3].

Potentiels de Mooney-Rivlin	
$C_{01}$	$0.29 \times 10^{-9}$ MPa
$C_{10}$	0.401 MPa

TABLE 1.II – Coefficients matériaux des potentiels hyperélastiques de Mooney-Rivlin [3]

### *Accroche acier*

Les accroches en acier servent quant à eux, comme leur nom l'indique, à se fixer respectivement au moteur et au châssis. Il n'est pas nécessaire d'indiquer leurs propriétés mécaniques car nous considérons qu'elles sont largement supérieures aux caractéristiques des élastomères. Les parties en acier ne seront donc pas incluses dans la simulation car elles sont indéformables face aux élastomères.

## 2 Stratégie de modélisation

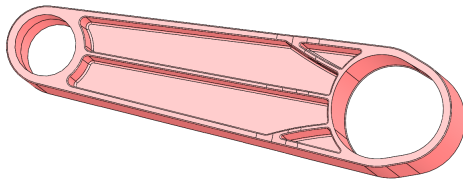


FIGURE 2.3 – *Biellette d'origine*

La biellette visible en figure 2.3, est la biellette utilisée actuellement pour le projet FUI Dynafib.. Cette biellette ayant déjà une forme bien définie, mais avec des caractéristiques mécaniques moindres, il n'était pas possible d'effectuer une optimisation topologique sur ce modèle.

Il a donc été nécessaire de recréer un modèle 3D plein, voir figure 2.4, reprenant parfaitement la géométrie extérieure ainsi que les ouvertures pour insérer les pièces en élastomère. Nous considérons pour la suite de l'étude, que le volume de cette pièce est 1.

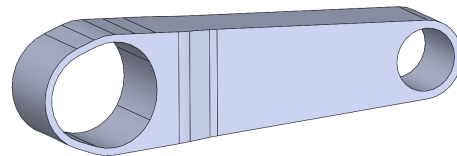


FIGURE 2.4 – *Biellette retravaillée*

## 3 Stratégie de caractérisation des matériaux

Les pièces imprimées 3D étant réalisées couche par couche, elles peuvent donc se comparer, sur certaines lignes, à la théorie des composites. Effectivement, un matériau composite est constitué d'un empilement de couches, appelé pli, dont les caractéristiques mécaniques peuvent varier selon leurs orientations face aux efforts.

Afin d'inclure les effets néfastes sur la tenue mécanique des pièces issues de l'impression 3D, il a été de mise de créer plusieurs modèles :

- Les premiers modèles 2D et 3D seront issues d'une optimisation via un matériau isotrope. Ces modèles ont pour but d'avoir la forme la plus performante possible puis à postériori est inclus l'anisotropie dans la pièce.
- Le second modèle est différent dans la démarche. En effet, en anticipant la façon d'imprimer les pièces, nous venons partitionner cette dernière couche par couche en tenant compte de l'orientation des filaments et effectuons l'optimisation sur ce modèle. Nous créons donc un couplage

faible entre l'optimisation topologique et l'impression 3D. Il est important de préciser que c'est un couplage faible car, pour chaque itération, est pris en compte l'orientation du modèle principal. Le couplage fort aurait été à contrario la mise en place d'une orientation de filament pour une épaisseur constante dans la pièce pour chaque itération de l'optimisation.

### 3.1 Structure périodique étudiée

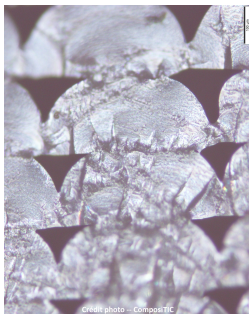


FIGURE 3.5 – *Disposition des filaments*

En figure 3.5, il est possible d'appréhender la disposition des filaments lors de l'impression d'une pièce. Cette disposition crée donc une hétérogénéité matériel ce qui fragilise donc la tenue mécanique d'une pièce. Également on suppose dans cette partie que les filaments sont parfaitement rattachés entre eux.

Cela nous donne après homogénéisation de cette structure les différents modules suivants :

Module longitudinal (dans le sens des filaments) :  $EL = 1.9 \text{ GPa}$

Module transversal :  $ET = 1.6 \text{ GPa}$

Module de cisaillement plan :  $GT = 1.26 \text{ GPa}$

Module de cisaillement anti-plan :  $GLT = 1.27 \text{ GPa}$

Coefficient de Poisson plan :  $NuT = 0.278$

Coefficient de Poisson anti-plan :  $NuLT = 0.380$

### 3.2 Optimisation 3D - Prise en compte du procédé de fabrication -

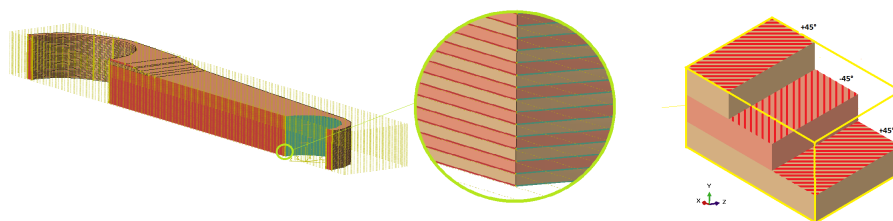


FIGURE 3.6 – *Noyau d'optimisation 3D partitionné – couplé –*

Pour réduire le temps de calcul, seul un quart de pièce est modélisé comme il est possible de voir en figure 3.6. Ensuite il a été de mise de partitionner la bielle en plusieurs couches successives représentant chaque couche d'impression. Une fois les couches définies il faut attribuer les différents modules obtenus par homogénéisation et leurs appliquer une orientation locale. En effet, si l'on visualise couche par couche la structure nous identifions alors clairement les couches à  $+45^0$  et  $-45^0$  par rapport au repère global.

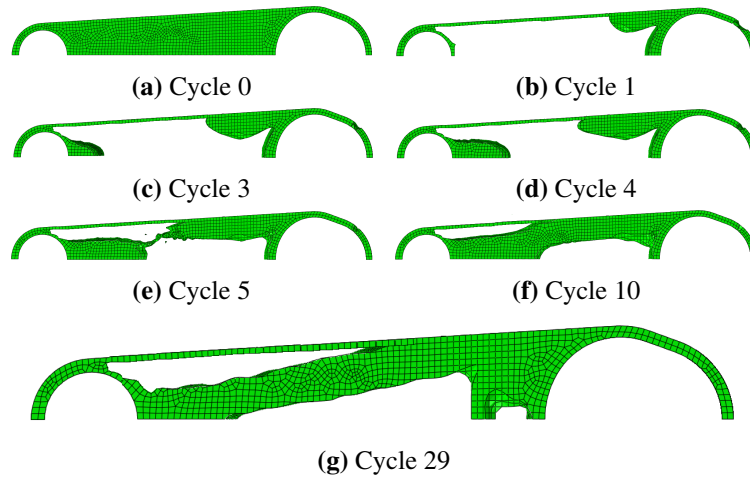


FIGURE 3.7 – *Visualisation de l'évolution de l'optimisation topologique de la biellette 3D – Avec couplage –*

### 3.3 Conditions d'optimisation

- Modèle SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization).
- Fonction objectif : maximiser la réponse en conception, soit l'énergie de déformation
- Fonction contrainte : forcer la valeur du volume finale à être inférieure ou égale à 50 % de la valeur du volume initiale

La biellette est optimisée en traction-compression. La tendance va être de pondérer l'optimisation en compression plutôt qu'en traction. Un "poids" va donc être mis en place sur chacun des deux étapes de calcul. Un facteur de 1 va être appliqué en traction tandis que ce qu'un facteur de 3 sera appliqué à la compression.

### 3.4 Résultats d'optimisations

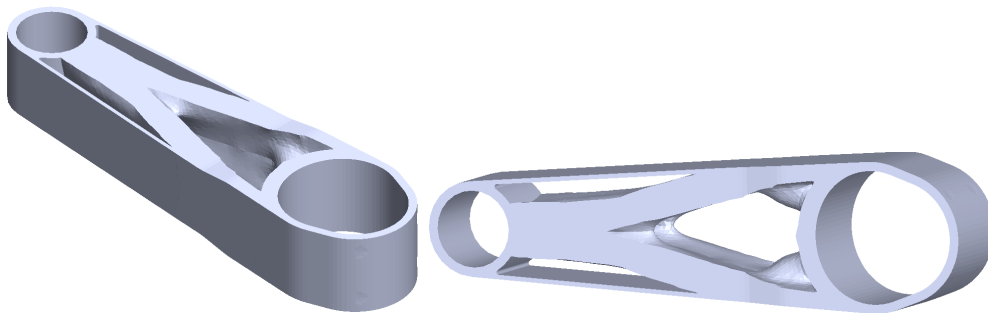


FIGURE 3.8 – *Noyau d'optimisation 3D – non couplé –*

La biellette visible en figure 3.8 est issue d'une optimisation en 3 dimensions avec un matériau isotrope et en figure 3.9 le noyau est issu de l'optimisation couplé à l'impression 3D. Elles sont plus volumineuses que le noyau issu en optimisation 2D visible en figure 3.10. Ceci s'explique par une augmentation des paramètres de calculs donc il faut conserver plus de matière pour une meilleure convergence.

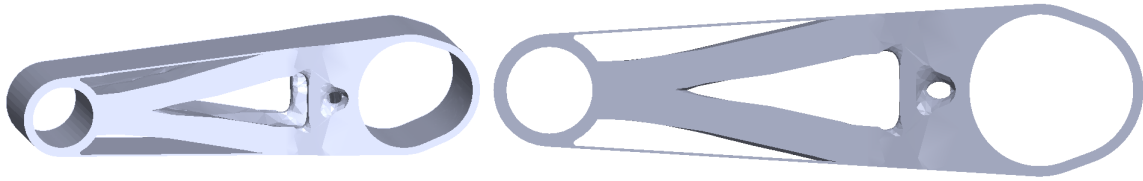


FIGURE 3.9 – *Évolution 3D*

Pour la pièce optimisée en 3 dimensions avec le matériau isotrope nous conservons 64 % de la valeur initiale tandis que pour la pièce optimisée qui tient compte de l'anisotropie, 62% de la matière est conservée. Le gain de matière pour l'optimisation 2D est beaucoup plus visible car seulement 53 % de la matière initiale est conservée.

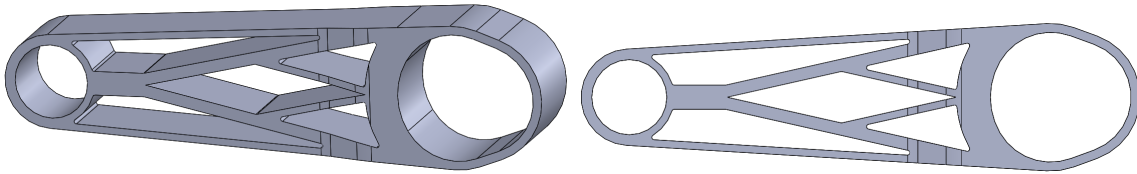


FIGURE 3.10 – *Noyau d'optimisation 2D*

La forme globale des deux modèles 3D est sensiblement la même, cependant il est possible de se rendre compte que la matière ne s'est pas organisée de la même façon dans la zone la plus proche où est appliqué l'effort. Cela s'explique par la réaction du corps de la bielle aux efforts imposés. Une autre remarque, la pièce tenant compte du couplage est beaucoup plus facettée que son homologue, ceci est dû au partitionnement de la pièce et la prise en compte de l'orientation des filaments lors de l'optimisation.

## 4 Essais mécaniques



FIGURE 4.11 – *Montage de l'essai*

Des essais comparatifs entre chaque bielle ont été mis en place afin de déterminer si oui ou non l'ensemble des travaux ont été pertinents. Deux types d'essais ont été proposés :

- Un essai cyclique, afin de déterminer les rigidités en tractions et en compressions de chaque pièces
- Un essai de résistance à la rupture en compression.

	Masse (g)	Rigidité (N/mm)	Rigidité/masse (N/g.mm)	Force à la rupture (N)
Biellette 3D -sans couplage -	222.5	7058	31.7	29 000
Biellette 3D -couplage-	198.7	7239	36.4	32 500
Biellette 2D	185.6	3559	19.1	18 000
Biellette origine	130.8	4224	32.2	12 000
Biellette 3D -sans couplage - Numérique	222.5	6584	29.5	•
Biellette 3D -couplage - Numérique	198.7	7120	35.8	•
Biellette 2D Numérique	185.6	5120	27.6	•

TABLE 4.III – Récapitulatif des données numériques et expérimentales

En tableau 4.III, sont visibles les données nécessaires à la validation d'une utilisation d'optimisation topologique. Si l'on analyse les rigidités seules, il est possible de conclure que celle-ci a été multipliée par deux pour les cas 3D, seul bémol, les cas 2D qui ne répondent toujours pas aux attentes. Nous constatons que la reproductibilité des analyses volumiques est possible lorsque l'on compare les rigidités numériques et expérimentales. Effectivement, que l'on prenne en compte, ou pas, le couplage lors de l'optimisation, les rigidités sont sensiblement les mêmes.

L'un des points qui a également été nécessaire d'améliorer était la tenue à la rupture de la bielle. Force est de constater que de ce point de vue là, elle a également été doublée pour les cas 3D et simplement augmentée de quelques newtons pour le cas 2D.

Enfin la chose intéressante à observer est le rapport rigidité/masse qui a pour but de démontrer si l'optimisation a été bénéfique et effectivement nous avons des valeurs comparables. Cela peut se traduire par le fait que l'on a gardé une certaine proportionnalité entre la capacité de la bielle à absorber les efforts par rapport à la quantité de matière utilisée pour fabriquer ces pièces.

## 5 Conclusion et perspectives

Les perspectives sur le couplage entre l'optimisation topologique et l'impression 3D sont énormes. Ces deux technologies peuvent donner des résultats surprenant et tout à fait satisfaisant. Cependant, le couplage réalisé lors de ce projet est un couplage que l'on peut qualifier de faible car l'orientation des filaments est introduits en amont ou en aval de l'optimisation. Ce type d'analyse où l'on partitionne les pièces est ainsi difficile à mettre en œuvre car cela demande du temps et la satisfaction d'un modèle peut ainsi dépendre de l'orientation des filaments qu'on lui applique. Sachant qu'il n'y a pas d'orientation idéale prédéfinie il est alors possible de tester pour chaque pli une orientation différente. L'idéal aurait été de coupler directement à l'optimisation à chaque itération "n" une direction d'orientation de pli ayant la tenue mécanique la plus adaptée aux sollicitations. Ainsi, un réglage de l'impression serait nécessaire afin de définir pour chaque pli une définition de l'orientation d'impression.

Également pour que ces deux technologies deviennent une réalité industrielle, il est nécessaire de rendre la chaîne de conception plus performante et plus automatique, en dédiant des outils d'analyses appropriés de post traitement des résultats obtenus. Alors il sera possible de répondre à un besoin essentiels des entreprises de concevoir, fabriquer au plus vite et à moindre coût des composants complexes et légers.

## Références

- [1] Rozvany. Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics. *Struct Multidisc 21*, 90-108, 2001.
- [2] Cueto Chinesta. Pgd-based modeling of materials, structures and processes.
- [3] Aude Vandenbroucke. Etude du comportement mécanique pour différentes températures d'un élastomère : caractérisations expérimentale et numérique. mécanique des matériaux. 2010.