

Optimisation topologique par la méthode SIMP d'un système multicorps

Topological optimization of a multibody system by the SIMP method

A. Eljihad^{1,2}, M. Nassraoui^{2,*}, and O. Bouksour²

¹ National high School of Electricity and Mechanics (ENSEM), University Hassan II, Casablanca, Morocco

² Laboratory of Mechanics, Production, and Industrial Engineering (LMPGI), High School of Technology of Casablanca (ESTC), University Hassan II, Casablanca, Morocco

* Corresponding e-mail address: mohammed.nassraoui@univh2c.ma

ORCID identifier: <https://orcid.org/0000-0002-2272-2149>

RÉSUMÉ. Ce travail vise à améliorer le gain la matière d'un produit multi-composant optimisé sans affecter ses dimensions et ses performances. La réduction de poids a été obtenue par l'optimisation de la topologie en utilisant la méthode SIMP. Dans un premier temps, la pièce a été modélisée géométriquement par le logiciel Catia V5R21, puis un solveur ANSYS est appliqué pour choisir le matériau adéquat et étudier les charges et les contraintes agissant sur le composant du système multi-composant « perforatrice » ; une réduction de masse jusqu'à 64% sera réalisée sur l'optimisation topologique de la pièce étudiée. Ensuite, les résultats obtenus sont comparés avec d'autres résultats de la littérature. Cette réduction significative de la masse et de volume sans altérer les caractéristiques mécaniques du système, avec une amélioration des performances. Mettant en œuvre l'optimisation topologique à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis ANSYS. Cette réduction à une influence très importante sur le temps de la fabrication ainsi que le coût de la pièce. Finalement la mise en œuvre de la méthode SIMP à l'aide d'ANSYS nous a permis de déterminer une configuration optimale des composants mécanique pour l'impression 3D selon des paramètres préétablis avec une rigidité suffisante.

ABSTRACT. This paper aims to improve the material gain of an optimized multi-component product without affecting its dimensions and performance. The weight reduction was achieved by optimizing the topology using the SIMP method. first, the part was geometrically modelled by the Catia V5R21 software, then an ANSYS solver is applied to choose the appropriate material and study the loads and stresses acting on the component of the multi-component system "perforator" a mass reduction up to 64% will be achieved on the topological optimization of the studied part. then, the obtained results are compared to other results of the literature. this significant reduction in mass and volume without altering the mechanical characteristics of the system, with an improvement in performance. Implementing the topologique optimization using ANSYS software, this reduction influences the manufacturing time as well as the cost of the part. finally, the implementation of the SIMP method using ANSYS allowed us to determine an optimal configuration of mechanical components for 3d printing according to pre-established parameters with sufficient strength.

MOTS-CLÉS. Fabrication additive, optimisation topologique, éléments finis.

KEYWORDS. Additive manufacturing, topological optimization, finite element.

1. Introduction

La fabrication additive (MA), également appelée impression 3D englobe des technologies [1] qui permettent aux entreprises de produire des objets légers et performants. La norme internationale ISO/ASTM 52900 définit la fabrication additive comme un processus d'assemblage de matériaux pour fabriquer des pièces à partir d'un modèle 3D généralement couche par couche [2]. Les premiers concepts relatifs à la fabrication additive remontent à la fin du 19e siècle et au début du 20e siècle [3][4]. Depuis l'émergence de la première technologie, la FA n'a cessé de progresser et a fait son chemin dans de nombreux pays et de nombreuses industries avec des applications standard comme l'aéronautique, l'automobile, le dentaire, le médical, les jouets, la mode et les accessoires, l'art et l'architecture [5]. La conception pour la Additive Manufacturing (DFAM) est une méthode de concevoir d'un produit pour la mise en forme additivement, puis amène les concepteurs à se conformer à toutes les contraintes dues au processus spécifique de cette technologie FA pour obtenir un produit conforme [6]. En conséquence, de nombreux chercheurs s'intéressent de plus en plus à la

résistance des matériaux additivement, y compris l'optimisation topologique de la forme globale. En ce qui concerne les formes géométriques avec propriétés personnalisées [2]. D'autre part, la conception de pièces FA fait de plus en plus appel à un outil mathématique appelé l'optimisation topologique pour obtenir une distribution optimale de la densité de distribution. L'optimisation topologique (TO) est une méthodologie numérique qui optimise des structures selon deux espace l'un de conception et l'autre de non conception avec des conditions limites données, de manière que la disposition résultante réponde à un ensemble prescrit d'objectifs de performance souhaité [7]. Compte tenu de la littérature sur la fabrication additive et l'optimisation topologique, il existe une méthode numérique appelée SIMP sur laquelle mise en œuvre dans plusieurs modélisateurs pour calculer et simuler les structures d'un système multi-composant. Cet article présente une application directe en utilisant le logiciel ANSYS Workbench 2019 R2, afin de comparer les résultats d'un système multi composant avec d'autres résultats obtenus par le solveur d'optimisation topologique Opti-Struct d'ALTAIR [3].

2. Méthodologie de recherche

2.1. Étude analytique

La fabrication additive offre un large éventail d'applications et de possibilités d'améliorer les pièces et les mécanismes. Ces possibilités permettent d'optimiser la conception des pièces fabriquées en termes de forme et de masse:

$$\min_{\delta \in \omega} U(d) \quad \#(1)$$

la loi de comportement :

$$[k].\{d\} = \{f\} \quad \#(2)$$

- f : vecteur de force
- d : vecteur de déplacement global
- k : matrice de rigidité
- δ : variable de conception

L'expression par éléments finis du vecteur déplacement s'écrit comme suit:

$$U(d) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \int_{V_i} \varepsilon_i^T(d) . E_i(\delta) . \varepsilon_i(d) dV_i \quad \#(3)$$

- E_i : la matrice d'élasticité de l'élément i
- ε_i : vecteur de déformation de l'élément i
- V_i : volume de l'élément i
- N : nombre total d'éléments finis.

La distribution de matériau est contrôlée par une variable de conception exprimée comme suit :

$$\delta(d) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in w_s \\ 0 & \text{si } x \notin w_s \end{cases} \quad \#(4)$$

- ws : domaine occupé par un matériau isotrope
- w : l'ensemble du domaine de la conception.

On suppose que la structure est poreuse, la distribution des matériaux varie donc entre 0 et 1, et la rigidité de l'élément i élément décrit :

$$E_i(\delta) = \rho_i^p(\delta) \cdot E^* \# (5)$$

2.2. Méthodologie

Le corps du poinçon a été conçu à l'aide du logiciel CATIA V5 et enregistré au format CATPART. La conception est importée dans ANSYS pour affecter le matériau, le maillage appliquer et les conditions aux limites, puis l'analyse de la contrainte principale maximale selon le critère de von mises. Sur la base des résultats obtenus après analyse, la structure est optimisée topologiquement par un choix adéquate des paramètres listés dans le tableau 4. Ensuite, un raffinement de la structure sera nécessaire afin d'obtenir une structure adéquat de calcul. La conception optimisée est à nouveau importée dans ANSYS pour analyser et comparer les résultats obtenus avec les contraintes initiales comme indiqué sur l'organigramme Figure 1 [8].

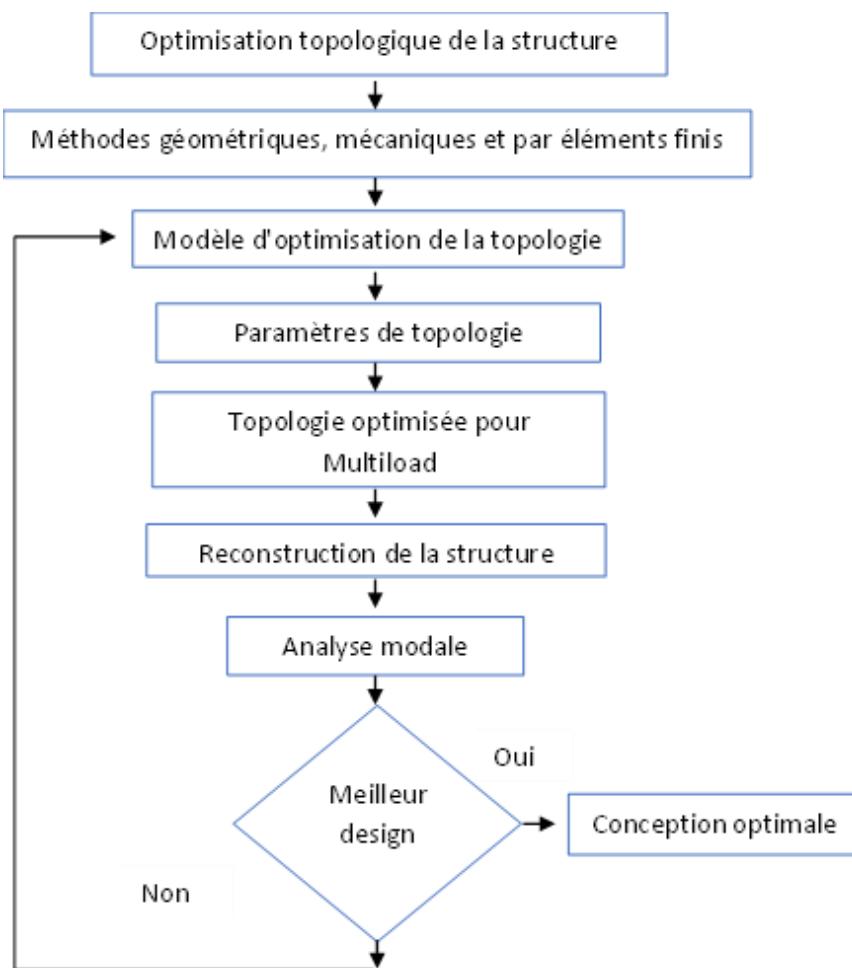


Figure 1. Optimisation de la topologie du solide

2.3. Modèle

Après avoir établi le modèle 3D dans la machine RAISE 3D N2, nous avons obtenu le modèle représenté sur la figure 2.

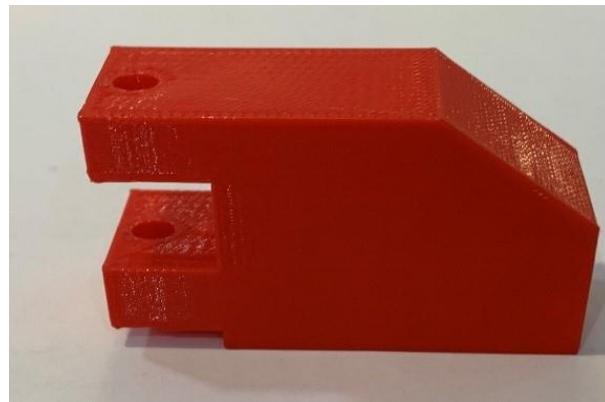


Figure 2. Modèle du composant.

Les propriétés mécaniques du plastique utilisé dans ce modèle sont décrites dans le tableau 1.

Propriété	Valeur
Densité	1200 kg/m ³
Module de Young	2.2 GPa
Module de poisson	0.38
Module de cisaillement	7.971 GPa

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques du plastique

2.4. Maillage

Le maillage adaptatif utilisé dans le modèle 3D par éléments finis est illustré à la figure 3. Après le maillage de la pièce, on obtient le raffinement suivant :

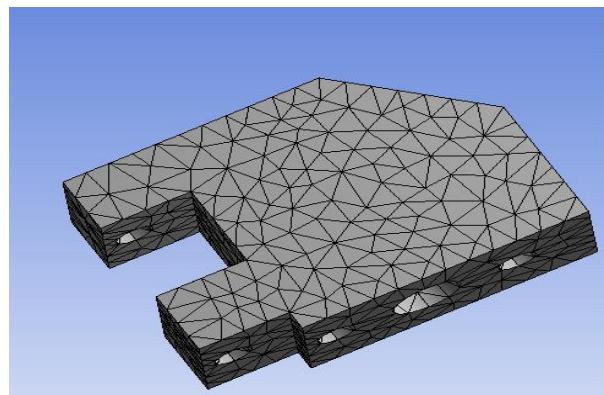


Figure 3. Géométrie du maillage

Les paramètres du maillage sont représentés dans le tableau 2.

Type de maille	Adaptive
Dimensionnement	Fine
Nombre de noeuds	40917
Nombre d'éléments	24454
Couches maximales	5

Tableau 2. Caractéristiques du maillage

2.5. Analyse structurelle

L'analyse structurelle du modèle Figure 4 a été réalisée par ANSYS de la manière suivante :

- Appliquer les conditions aux limites ;
- Soumettre ce modèle à une charge ;
- Analyser les contraintes par le critère de von Mises.

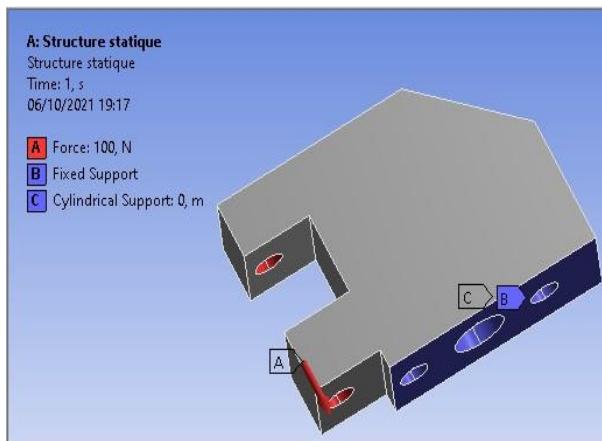


Figure 4. Structure après application des charges

Les conditions aux limites associées au modèle sont données dans le tableau 3.

Type	Support Fixe	Support cylindrique	Force
Géométrie	1 Face	6 Faces	4 Faces
X composant			0 N
Y composant			0 N
Z composant			-100 N

Tableau 3. Les conditions aux limites du modèle 3D pour l'analyse statique de la structure

La simulation numérique générée par ANSYS selon la méthode des éléments finis d'un solide isotrope permet de calculer la contrainte globale selon von-mises et de déterminer les espaces de conception et de non-conception de la structure comme l'illustre la figure 5.

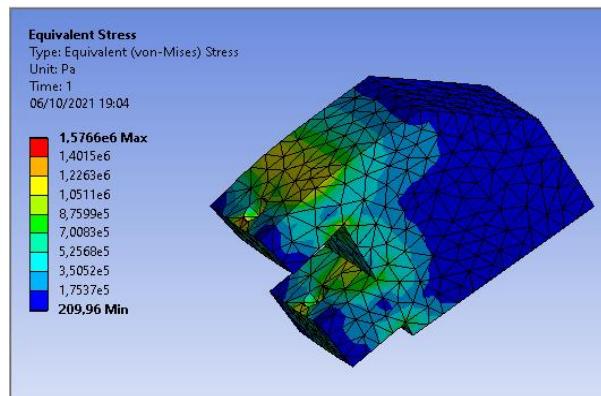


Figure 5. Structure statique

2.6. Optimisation topologique

Selon l'analyse statique, la structure contient deux espaces : l'espace de conception et l'espace de non-conception. Le second espace n'est pas modifiable, mais le premier sera modifié au cours d'une optimisation topologique jusqu'à ce que l'objectif de minimisation de 64% soit atteint (22 itérations ont été nécessaires pour atteindre la forme optimisée). Le tableau 4 montre les paramètres d'optimisation topologique qui conduisent à la structure optimisée.

Conditions d'analyse	Nombre maximal d'itérations	500
	Précision de la convergence	0.1%
Zone d'optimisation	Type d'optimisation	T.O basé sur la densité
	Espace de conception	Tout le corps
	Zone d'exclusion	Toutes les conditions aux limites
Contrainte sur la réponse	Réponse	Masse
	Pourcentage à retenir	36%

Tableau 4. Paramètres d'optimisation topologique

La structure optimale qui nécessite le moins du matériaux est présentée dans la figure 6 en fonction de l'objectif souhaité.



Figure 6. Résultat de l'optimisation topologique

3. Résultats et Discussion

Sur la base des résultats obtenus par le modeleur hyperworks avec le solveur altair opti-struct, nous avons proposé d'analyser l'optimisation à l'aide d'ANSYS Workbench afin de comparer l'application de la méthode SIMP avec les deux modeleurs. L'application de l'optimisation par le solveur OPTI-STRUCT d'un produit multi-composants « perforatrice » a permis d'obtenir un gain en masse et un gain en volume de 53,4% et 82% respectivement comme le montre le tableau 5. Ce résultat a permis de minimiser l'encombrement du système.

	Version		
Caractéristique	Perforatrice conventionnelle	Perforatrice optimisée	Gain
Masse(g)	121.1	56.4	53.4%
Volume(cm ³)	41.5	7.5	82%

Tableau 5. Gain de l'optimisations sur le cas d'étude « perforatrice ».

Les résultats de l'optimisation topologique obtenus par Ansys Workbench sont présentés dans le tableau 6. Ils montrent que le poids de la structure a été réduit de 32.318g à 11.649g après 22 itérations de l'algorithme.

	Version		
Caractéristique	Perforatrice conventionnelle	Perforatrice optimisée	Gain
Masse(g)	32.318	11.649	63,953 %
Volume(cm ³)	2.6931×10^{-5}	9.779×10^{-6}	63,953 %

Tableau 6. Gain de L'optimisations sur le cas d'étude " corps de la perforatrice ".

La courbe présentée dans la figure 7 ci-dessous communique des informations sur l'objectif attendu en fonction du nombre d'itérations. Selon cette figure, l'objectif souhaité a été atteint après 22 itérations avec une précision de convergence inférieure à 0,1%.

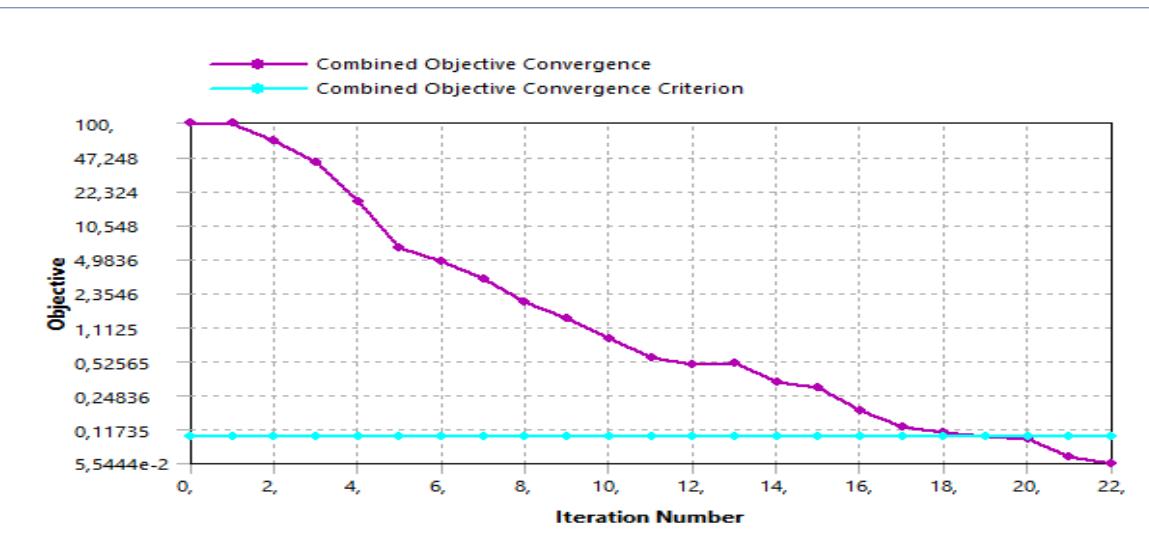


Figure 7. Convergence de la fonction objectif

3.1. Comparaison entre ANSYS et Opti-struct

L'optimisation de la topologie modifie les paramètres : masse et volume afin d'obtenir une structure optimale qui nécessite le moins de matière possible. Cela permettra de réduire le coût et le temps de fabrication, et de réduire les déchets de matériaux [9]. Le tableau 7 montre clairement les résultats obtenus par ANSYS pour un composant du système multi-corps (le poinçon) montrent clairement qu'il a été possible de réduire la masse de 64%. En revanche, l'utilisation du solveur opti-struct sur l'ensemble du système permet un gain total de 53% [3]. La comparaison entre les deux outils n'est pas complète, mais on peut dire que ANSYS peut être utilisé de manière simple et efficace pour l'optimisation topologique des pièces pour la fabrication additive [10].

Méthode	Masse Initial (g)	Masse Finale (g)	volume Originale (cm ³)	volume Finale (cm ³)	Pourcentage du volume original (%)	
					Masse	Volume
Opti-struct	121	56.4	41.5	7.5	53.4	82
ANSYS	32.318	11.649	26.931	9.7079	63.953	63.953

Tableau 6. Comparaison entre Opti-Struct et ANSYS

4. Conclusion

L'optimisation topologique est une technique utilisée pour obtenir une distribution optimale de matériau. Cet article présente une application de la méthodologie SIMP à l'aide du logiciel ANSYS sur un système multi-composants où les paramètres de charge initiale, les conditions aux limites et la sélection des matériaux offrent un gain de la matière de 64% par rapport au solveur Opti-struct. Ces résultats illustrent clairement les avantages d'une telle méthode sur le comportement du système (légèreté, haute efficacité énergétique, diminution de l'effet d'inertie etc...).Enfin, les travaux futurs pourraient se concentrer sur l'étude de l'impact d'une pièce optimisée sur les paramètres de fabrication en utilisant la technologie FDM.

Bibliographie

- [1OB] A.-F. OBATON, A. BERNARD, G. TAILLANDIER, AND J.-M. MOSCHETTA, “fabrication additive : état de l’art et besoins metrologiques engendres” *Revue française de métrologie*, no. 37, pp. 21–36, Mar. 2015,

- [2BA] BARAS, P., & SAWICKI, J. (2020). Numerical analysis of mechanical properties of 3D printed aluminium components with variable core infill values. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 103(1), 16–24. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.6912>
- [3OR] ORQUERA, M. (2019). Conception pour la fabrication additive : Approche méthodologique pour les systèmes mécaniques multi-corps. 204.
- [4OR] ORQUÉRA, M., CAMPOCASSO, S., & MILLET, D. (2017). Design for Additive Manufacturing Method for a Mechanical System Downsizing. *Procedia CIRP*, 60, 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.011>
- [5BA] BAHNINI, I., RIVETTE, M., RECHIA, A., SIADAT, A., & ELMESBAHI, A. (2018). Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1–4), 147–161. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1932-y>
- [6DI] DIEGEL, O., NORDIN, A., & MOTTE, D. (2020). Springer Series in Advanced Manufacturing a Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. <http://www.springer.com/series/7113>
- [7SH] SHANMUGASUNDAR, G., DHARANIDHARAN, M., VISHWA, D., & SANJEEV KUMAR, A. P. (2020). Design, analysis and topology optimization of connecting rod. *Materials Today: Proceedings*, 46(xxxx), 3430–3438. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.778>
- [8BA] BALA MANIKANDAN, C., BALAMURUGAN, S., BALAMURUGAN, P., & BENESTON, S. L. (2018). Weight reduction of motorcycle frame by topology optimization. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 91(2), 67–77. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.9664>
- [9JA] JANKOVICS, D., GOHARI, H., & BARARI, A. (2018). Constrained Topology Optimization For Additive Manufacturing Of Structural Components In Ansys®. 1–5. <https://doi.org/10.25071/10315/35404>.
- [10AL] ALAFAGHANI, A., QATTAWI, A., & ABLAT, M. A. (2017). Design Consideration for Additive Manufacturing: Fused Deposition Modelling. *Open Journal of Applied Sciences*, 07(06), 291–318. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2017.76024>