



## Design of a Graduated Lattice Structure Based on Topology Optimization for Component Design Obtained by Additive Manufacturing

---

Issam El Khadiri, Mohamed Abouelmajd, Maria Zemzami,  
Nabil Hmina, Manuel Lagache, Bandar Almangour,  
Ahmed Bahlaoui, Ismail Arroub and Soufiane Belhouideg

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

June 21, 2023

# CIGI QUALITA MOSIM 2023

## Conception d'une structure en treillis graduée à l'aide de l'optimisation topologique pour la conception de composants fabriqués par voie additive

ISSAM EL KHADIRI<sup>1</sup>, MOHAMED ABOUELMAJD<sup>2</sup>, MARIA ZEMZAMI<sup>1</sup>, NABIL HMINA<sup>1</sup>, MANUEL LAGACHE<sup>3</sup>, BANDAR ALMANGOUR<sup>4</sup>, AHMED BAHLAOU<sup>2</sup>, ISMAIL ARROUB<sup>2</sup>, SOUFIANE BELHOUIDEG<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Systems Engineering Laboratory, University Sultan Moulay Slimane*

Beni-Mellal, Morocco  
issamelkhadiri49@gmail.com  
maria.zemzami@gmail.com  
hmina5864@gmail.com  
soufianebelhouideg@usms.ma

<sup>2</sup> LPRSI, Team of Applied Physics and New Technologies, University Sultan Moulay Slimane

Beni Mellal, Morocco  
med.abouelmajd10@gmail.com  
bahlaoui75@yahoo.fr  
ismail.arroub@gmail.com  
soufianebelhouideg@usms.ma

<sup>3</sup> Polytech Annecy Chambéry, Univ. Savoie, SYMME

F-74000 Annecy, France  
manuel.lagache@univ-savoie.fr

<sup>4</sup> Department of Mechanical Engineering, King Fahd University of Petroleum & Minerals

Dhahran, Saudi Arabia  
bandar.almangour@kfupm.edu.sa

---

**Résumé** – Les techniques d'optimisation de la topologie et la stratégie de conception de treillis génératif sont deux approches de plus en plus courantes pour une conception structurelle avancée qui peut atteindre la configuration structurelle optimale des pièces fabriquées de manière additive, qui semblent être au centre des recherches en cours dans la communauté de la fabrication additive. Dans cette étude, une nouvelle méthodologie de conception et de construction de structures en treillis graduées basée sur les résultats obtenus à partir d'une optimisation topologique adaptée à la fabrication additive est proposée afin de générer une conception de structure en treillis légère avec des performances de rendements prévisibles. Cette méthode a été développée en utilisant une combinaison des deux programmes ANSYS et MATLAB, où le logiciel ANSYS est utilisé dans le processus de conception et de création des structures, et les algorithmes d'optimisation de la topologie et la dérivation des structures en treillis ont été développés dans le logiciel MATLAB. L'efficacité de la méthode proposée a été démontrée en résolvant le problème de référence poutre simplement appuyée pour vérifier les propriétés de rigidité supérieures de la structure en treillis graduée améliorée par rapport à la conception de base avec des structures intéressées uniformes. L'article examine également l'utilisation de surfaces triplement périodiques minimales (TPMS) en tant que classe unique de structures en treillis pouvant être utilisées pour une large gamme d'applications en raison de leurs faibles fractions volumiques et de leur courbure lisse.

**Abstract** – Topology optimization techniques and generative lattice design strategy are two increasingly common approaches for an advanced structural design that can achieve the optimal structural configuration of additively manufactured parts, which seem to be the focus of ongoing research in the additive manufacturing community. In this paper, a new methodology for designing and constructing graded lattice structures based on the results obtained from topological optimization suitable for additive fabrication is proposed in order to generate a lightweight lattice structure design with predictable yield performance. This method was developed using a combination of the two programs ANSYS and MATLAB, where the ANSYS software is relied upon in the process of designing and creating structures, and algorithms for topology optimization and deriving lattice structures were developed in MATLAB software. The effectiveness of the proposed method was demonstrated by solving the simply supported beam reference problem to verify the superior rigidity properties of the improved graded lattice structure compared to the basic design with uniform

**interested structures. The paper also examines the use of minimum triply periodic surfaces as a unique class of lattice structures that can be used for a wide range of applications due to their low volume fractions and smooth curvature.**

**Mots clés – Optimization topologique, Structure en treillis, Treillis gradué, Fabrication additive.**

**Keywords – Topology optimization, Lattice structure, Graded lattice, Additive manufacturing.**

---

## 1 INTRODUCTION

Les structures en treillis sont utilisées depuis des siècles dans une grande variété d'applications et sont courantes dans les matériaux naturels tels que le bois, les os, les éponges et le corail. Ils peuvent être considérés comme une structure constituée d'un réseau d'entrelacs ou de plaques pleines qui forment les bords et les faces des cellules. Ou formé artificiellement, grâce à l'impression 3D et à d'autres techniques de fabrication (Panesar, Abdi, Hickman, & Ashcroft, 2018). Ces structures ont récemment gagné en importance grâce aux progrès de la fabrication additive, qui sont utilisées pour tenter d'atteindre des objectifs majeurs tels que la minimisation de la quantité de matériaux utilisés, la minimisation du temps nécessaire pour produire un objet, la minimisation de la quantité d'énergie utilisée et optimiser la résistance de l'objet produit tout en minimisant son poids (Plocher, Panesar, & Design, 2019). D'autres effets secondaires très précieux sont également rendus possibles par les structures en treillis. Ces propriétés comprennent l'absorption d'énergie, l'amortissement acoustique et des vibrations, des rapports résistance/poids élevés et des capacités de gestion thermique. Ces propriétés ont été utilisées avec succès pour améliorer la résistance aux chocs des véhicules militaires, ainsi que dans l'industrie médicale (Ngo, Kashani, Imbalzano, Nguyen, & Hui, 2018).

La fabrication additive a révolutionné la façon dont les ingénieurs et les concepteurs fabriquent des structures aux géométries complexes. En utilisant le processus d'ajout de matériau couche par couche, il est désormais possible de créer des conceptions qui étaient auparavant difficiles ou impossibles à fabriquer (Panesar et al., 2018). La combinaison de la fabrication additive et de l'optimisation de la topologie a conduit à la création de nombreuses stratégies de conception différentes pour produire des pièces de haute qualité, dans les tolérances et économiques à produire. L'optimisation de la topologie est une technique d'optimisation structurelle qui améliore de manière itérative la disposition des matériaux dans un espace de conception donné pour un ensemble donné de charges et de conditions aux limites, ce qui se traduit par des structures qui ont une rigidité et une résistance spécifiques élevées tout en réduisant ou en éliminant le gaspillage de matériaux. Le domaine de l'optimisation de la topologie a mûri au cours des dernières décennies et a eu une influence significative sur la recherche en optimisation de la conception (Jihong et al., 2021).

L'optimisation de la topologie et le treillis sont les deux principales stratégies d'allègement qui exploitent au mieux les libertés de conception offertes par la fabrication additive. L'optimisation de la topologie est une approche rigoureuse qui améliore la rigidité spécifique, tandis que le treillis est une approche de conception pour la réduction de poids dans les pièces qui ont généralement un facteur de sécurité élevé. Le treillis est devenu une pratique de conception courante dans l'industrie de la fabrication additive d'aujourd'hui. Cependant, le développement de stratégies efficaces pour concevoir ces structures en treillis complexes est un domaine de recherche en cours (Nagesha et al., 2020). Les structures en treillis peuvent

être exploitées dans la fabrication additive pour de nombreuses raisons, notamment : permettre la fabrication d'une solution d'optimisation de la topologie avec des densités intermédiaires, réduire les distorsions des pièces et améliorer la robustesse de la conception. Par conséquent, l'adoption de la structure en treillis dans la conception peut être utile lorsque l'on considère à la fois les performances mécaniques et les aspects de fabrication de la conception du fabrication additive (Panesar et al., 2018).

Une méthode d'optimisation topologique de la structure en treillis a été proposée pour remplir les composants avec une structure en treillis graduée. Cette méthode tire parti de la structure à cellules ouvertes des treillis, qui peut être imprimée sans effort supplémentaire. Cette approche permet le remplissage des composants avec une structure en treillis gradué, garantissant à la fois la fabricabilité et les performances optimisées obtenues par la méthode d'optimisation de la topologie (Seharing, Azman, & Abdullah, 2020). De plus, diverses approches de conception de remplissage de treillis ont été proposées, soulignant l'importance d'une interaction plus étroite entre la conception de treillis et l'optimisation de la topologie pour obtenir des conceptions de treillis optimales pour la fabrication additive. Des études comme celles de Liu et al. développé une nouvelle approche pour la conception de structures en treillis gradués à l'aide du cadre d'optimisation de la topologie MMV (Liu, Du, Zhang, Zhu, & Guo, 2017). Wang et al. introduit une méthode de conception de structures en treillis graduées pour la fabrication additive avec des mesostructures optimisées, utilisant un algorithme génétique pour optimiser la topologie de la structure en treillis (Wang et al., 2018). Cheng et al. présente une méthode d'utilisation de l'optimisation de la topologie pour concevoir des structures en treillis graduées fonctionnellement pour des composants fabriqués de manière additive qui doivent respecter des contraintes de stress (Cheng, Bai, To, & Engineering, 2019). Ces travaux ont montré que la méthode d'optimisation de la topologie de la structure en treillis peut gérer efficacement les densités intermédiaires dans l'optimisation de la topologie conventionnelle, maintenir la conception d'origine et fournir une prédiction précise des performances des composants.

Les surfaces triplement périodiques minimales (TPMS) sont une classe unique de structures en treillis caractérisées par une valeur nulle de la courbure moyenne en chaque point. Cette conception simple, combinée à la capacité de générer des fractions volumiques très faibles, fait des structures TPMS une option attrayante pour une large gamme d'applications. La courbure douce des TPMS les rend également bien adaptés à la conception de matériaux multifonctionnels (Dong & Zhao, 2021). Le concept de surfaces minimales triplement périodiques a été introduit pour la première fois par Schwarz et son étudiant Neovius en 1883 et a ensuite été étudié en détail dans un rapport bien connu de la NASA par Schoen en 1970 (Schoen, 1970). La plus connue des 12 surfaces TPMS de Schoen est la surface Gyroid.

Dans cette étude, une nouvelle méthode d'optimisation de la topologie de la structure en treillis a été proposée pour remplir

les composants avec une structure en treillis graduée, qui peut être imprimée sans effort supplémentaire. Afin de générer une conception de structure en treillis légère avec des performances de rendement prévisibles. Cette méthode a été développée en utilisant une combinaison des deux programmes ANSYS et MATLAB, où le logiciel ANSYS est utilisé dans le processus de conception, de création et d'efficacité des structures, et des algorithmes pour l'optimisation de la topologie et la dérivation des structures en treillis ont été développés dans le logiciel MATLAB. L'efficacité de la méthode proposée a été démontrée en résolvant le problème de référence de poutre simplement supportée pour vérifier les propriétés mécaniques de la structure en treillis graduée optimisée par rapport à la conception de base avec des structures intéressées uniformes, où les structures en treillis en feuille TPMS (Diamond) ont été conçues pour remplacer la structure obtenue à partir des résultats d'optimisation topologique (volume solide).

## 2 MÉTHODOLOGIE

### 2.1 Méthode d'optimisation topologique

La méthode SIMP, qui signifie Solid Isotropy Material with Penalization, est l'une des méthodes d'optimisation topologique les mieux documentées. Il consiste en une répartition de la densité de matière dans les éléments du maillage d'un modèle sous certaines contraintes afin d'en extraire la forme la plus rigide. Ce faisant, il distribue une quantité donnée de vide dans le modèle. Cette porosité du matériau est mesurée à l'aide de la densité du matériau  $\rho(x, y, z)$  qui varie de 0 à 1. L'implémentation SIMP permet d'obtenir des résultats sous deux formes, l'une permettant une représentation solide-vide discrète efficace et l'autre en niveaux de gris à représentation de la densité (El Khadiri, Zemzami, Hmina, Lagache, & Belhouideg, 2021).

L'implémentation SIMP utilisée ici a pour but d'identifier la répartition optimale de densité de matière, sous la contrainte du volume cible, afin de minimiser la compliance, autrement dit, une maximisation de la rigidité globale du modèle considéré, sous réserve à une contrainte de volume. La fonction objectif est définie comme suit :

$$\text{minimiser } \bar{C} = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p \times \{U\}^t \times [K_e] \times \{U\}$$

$$\text{Avec } \begin{cases} E = E_0 \times \rho^p \\ V = \sum_{e=1}^N \rho_e \times V_e \\ [K] \times \{U\} = \{F\} \\ 0 \leq \rho \leq 1 \end{cases}$$

Où : C : Compliance, U : Vecteurs de déplacement, F : Vecteurs de force, K : Matrice de raideur, Ue : Le déplacement de e élément, ke : La raideur de e élément, E0 : est le module de Young pour la région solide, V : est le volume structurel cible, p : est l'exposant de la pénalité SIMP, et  $\rho$  : la densité d'éléments entre 1 et 0.

La méthode du critère d'optimalité a été utilisée pour obtenir les solutions SIMP. L'exposant de pénalité (p) a été fixé à 1 pour obtenir des représentations de densité en niveaux de gris et une valeur de 3 pour p a été choisie lorsqu'une représentation discrète solide-vide est souhaitée. La représentation discrète solide-vide est obtenue en seuillant les résultats de densité en utilisant la fonction iso-surface dans MATLAB.

### 2.2 Stratégie de conception du treillis gradué

Étant donné que ce travail se concentre sur l'étude de la stratégie graduée pour la génération de treillis, des solutions SIMP non pénalisées (P = 1) sont choisies pour être interprétées à la place de celles obtenues avec un exposant de pénalisation spécifique à la cellule unitaire, ce qui rend la densité du matériau indépendante du type de cellule de cartographie du treillis.

La méthode proposée est démontrée en résolvant un exemple numérique simple pour l'optimisation de la topologie (poutre simplement appuyée). L'objectif de l'optimisation est de minimiser le travail global des forces externes (maximiser la rigidité) avec une contrainte sur la fraction volumique V. Ce processus a été mis en œuvre à l'aide d'une combinaison du logiciel ANSYS et de MATLAB. La figure 1 illustre les dimensions et les conditions aux limites de la poutre supportée. La poutre a une section de 30 mm x 30 mm et une longueur de 15 mm. La poutre est fixée aux extrémités, et une charge de 5000 N est appliquée au centre de la surface supérieure de la poutre.

La géométrie et le maillage seront traités sur ANSYS. Les données de sortie Ansys sont intégrées dans MATLAB pour déterminer les matrices de rigidité des ke éléments de la matrice de rigidité symétrique globale K. Il est nécessaire de remplir un vecteur contenant trois paramètres d'entrée dans cet algorithme. Les valeurs utilisées sont les suivantes : Le coefficient de pénalité : P = 1, la fraction volumique : f = 0,4, le rayon du filtre : rmin = 1,5, le critère de convergence : 0,01. La représentation discrète des vides solides est obtenue en seuillant les résultats de densité en utilisant la fonction iso-surface dans MATLAB Fig 2.

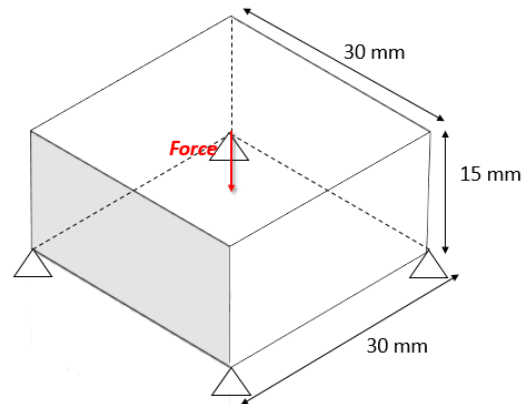


Figure 1. Poutre simplement supportée

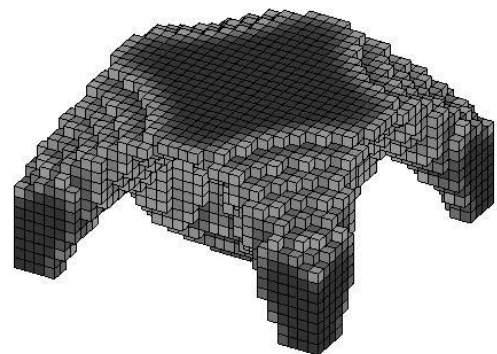


Figure 2. : Solution d'optimisation topologique

Pour obtenir des structures en treillis, un algorithme a été développé sur le programme Matlab afin que la structure soit divisée en parties selon le nombre d'éléments souhaités, à remplir à l'aide de cellules unitaires qui occupent chaque partie en fonction de la densité relative moyenne des éléments. Pour mettre en œuvre la stratégie proposée appliquée à l'exemple précédent, une poutre simplement appuyée avec une section de poutre de 30 mm × 30 mm et une longueur de 15 mm (Fig 2), est occupée à l'aide de cellules unitaires TPMS (Diamond).

Les structures TPMS sont des surfaces divisées en volumes égaux dans chaque cellule unitaire. Il existe de nombreuses méthodes disponibles maintenant pour extraire les coordonnées de la cellule unitaire de chaque TPMS. La technique la plus répandue et la plus fiable pour obtenir des topologies TPMS est l'utilisation des équations de transformée de Fourier. Cette méthode aboutit à une combinaison d'équations trigonométriques définies comme suit (El Khadiri et al., 2022) :

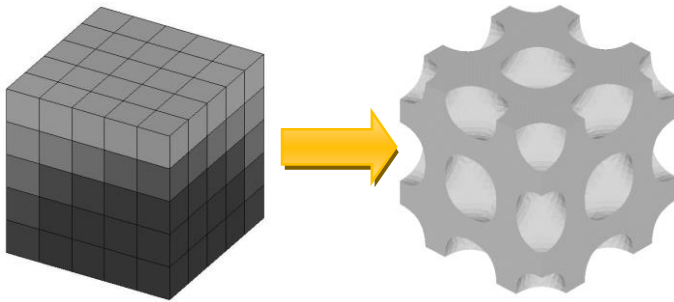
$$f(x, y, z) = t$$

Où f est la formule totale de la surface minimale et t est la constante de niveau.

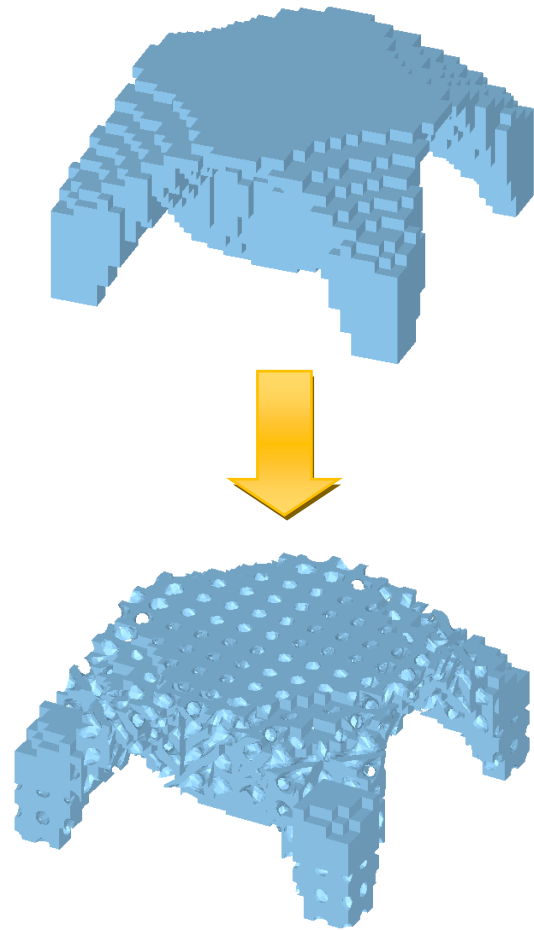
La fonction précise de la géométrie des TPMS (Diamond) qui ont été étudiées dans cet article est présentée ci-dessous, selon la littérature actuelle (Deering & Grandfield, 2021) :

$$f_{Diamond} = \cos(2\pi x) \cos(2\pi y) \cos(2\pi z) - (\sin(2\pi x) + \sin(2\pi y) + \sin(2\pi z)) = 0$$

Les cellules unitaires TPMS (Diamond) occupent un cube de taille 5 x 5 x 5 mm, créant une structure composée de 6 x 6 x 3 cellules unitaires. Et puis la fonction iso-surface de MATLAB est convertie en un fichier.stl et passe au logiciel ANSYS.



**Figure 3. : La cellule unitaire TPMS Diamond occupe un cube de taille 5 x 5 x 5 mm**



**Figure 4. : Intersection de solide (solution SIMP), Stratégie de treillis gradué**

### 3 RESULTATS ET DISCUSSION

Les performances mécaniques ont été évaluées pour vérifier l'efficacité de l'approche proposée en comparant les résultats de la méthode proposée de la stratégie de treillis gradué avec la stratégie de treillis non formé dans laquelle la dépendance repose sur l'intersection de la structure optimale du vide solide discret (la valeur de 3 a été choisie pour la pénalisation) avec la structure de densité de matériau uniforme du TPMS qui remplit toute la zone de conception. Pour obtenir une fraction de taille structurale moyenne de 0,4, des cellules unitaires en diamant du treillis TPMS standardisées à une fraction volumique égale à 0,66 ont été adoptées pour se croiser avec une solution d'optimisation de la topologie qui avait une fraction volumique égale à 0,6. CoCrMo a été utilisé comme matériau pour cette recherche. L'alliage Co-27%Cr-6%Mo présente une excellente résistance à l'abrasion, à la corrosion et à la biocompatibilité. Les données mécaniques ont été obtenues à partir de la norme ASTM F75 (Kim, Hwang, Lee, & Compounds, 2020).

Le module d'élasticité de CoCrMo était de 218,4 GPa, le coefficient de Poisson était de 0,3, la limite d'élasticité était de 874 MPa et la densité était de 8,4 g/cm<sup>3</sup>. Pour la simulation, le logiciel d'analyse par éléments finis (FEA) ANSYS Workbench a analysé les propriétés mécaniques des modèles. Pour simplifier les modèles et réduire le temps de calcul, la condition de symétrie a été appliquée aux modèles étudiés selon les deux axes (Oy et Ox) à l'aide de l'outil Spaceclaim (Fig 4). Le modèle a été analysé pour ses propriétés mécaniques tout en conservant les mêmes conditions précédemment appliquées.

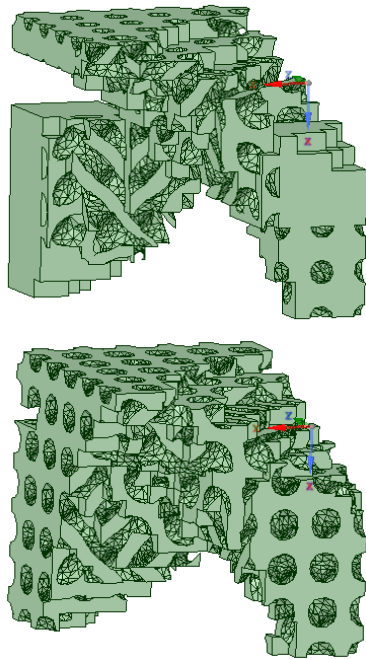


Figure 5. : la condition de symétrie appliquée aux modèles étudiés selon les deux axes (Oy et Ox)

Pour assurer la précision et la fiabilité des résultats et pour améliorer la qualité du maillage, les paramètres par défaut ont été modifiés, où la forme géométrique définit la structure du maillage, donc obtenir des structures de maillage selon des formes géométriques est une chose très importante dans analyse par éléments finis (FEA), où la fonction de dimensionnement du maillage a été définie comme proximité et courbure. Les propriétés de la fonction de taille de proximité et de la courbure sont définies comme suit : angle normal de courbure =  $70,39^\circ$ , les sources de la fonction de taille de proximité sont les faces et les arêtes, la taille minimale =  $1,8e-5$  mm, la taille minimale de proximité =  $1,2e-3$  mm, la taille maximale du visage =  $1,3e-3$ mm, Max Tet Size=  $2,6e-3$ mm, Taux de croissance= $1,85$ . Dans l'étude non linéaire, deux types de non linéarités ont été considérés. Les non-linéarités géométriques sont générées par de grands déplacements et déformations. La réponse mécanique de la structure n'est plus proportionnelle à la charge appliquée. Les non-linéarités matérielles sont introduites en définissant le mode d'écroutissement isotrope multilinéaire du matériau. La pression appliquée dans les calculs de cette pièce a une déformation uniaxiale de 1,5 mm. La pression a été appliquée progressivement 100 sous-étapes. Les résultats obtenus pour les deux structures sont présentés ci-dessous :

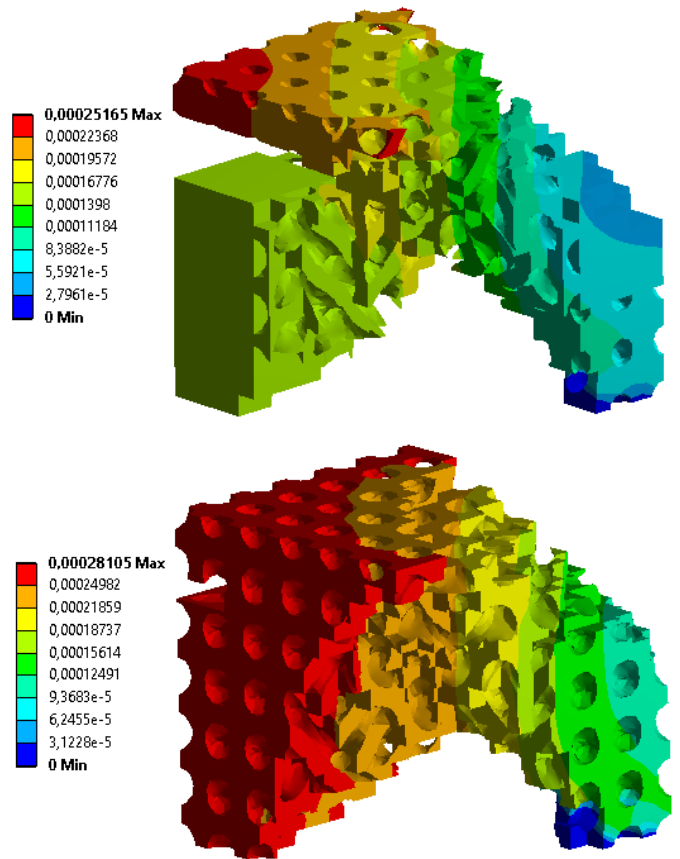


Figure 6. : Déformation totale (m) pour un treillis uniforme et un treillis gradué

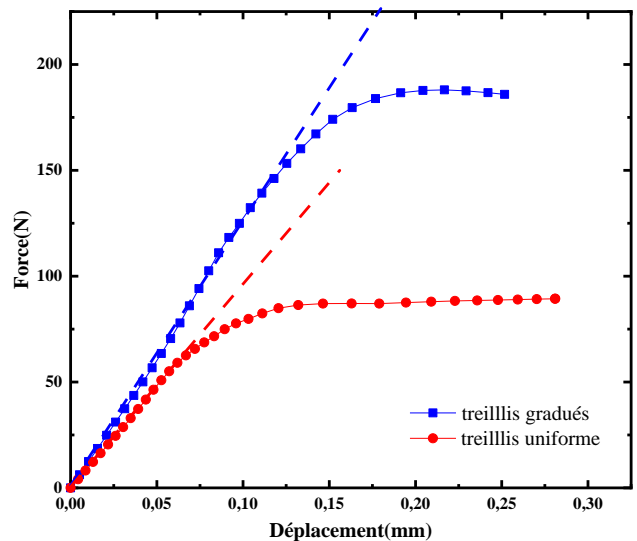


Figure 7. : Courbes charge-déplacement

Dans la figure 6, la déformation totale des structures est tracée, démontrant que la stratégie de treillis gradué est la plus rigide. L'échelle est la même pour tous les tracés et lisible en zoomant. La capacité de charge pour chaque stratégie de réseau obtenue en résolvant la plasticité idéale de von Mises à l'aide d'ANSYS est représentée sur la figure 7. Là encore, les résultats sont favorables au concept de stratégie de treillis gradué.

A des fins de comparaison, les propriétés mécaniques détaillées des courbes. Comme illustré sur la figure, la raideur moyenne de la structure passe de  $966,1$  N/mm à  $1276,7$  N/mm, ce qui représente une augmentation de 32,1%. La charge d'élasticité moyenne de la poutre graduée est de  $147,3$  N,



tandis que la poutre uniforme est de 65.5 N, soit une augmentation de 124.9%. Cela implique que la méthodologie proposée peut considérablement améliorer les performances de rendement de la structure avec la même fraction volumique. La résistance ultime moyenne de la poutre graduée est de 189.6 N, tandis que la valeur moyenne de la poutre uniforme est de 87.5N, ce qui représente une augmentation de 166.7%. Ces résultats montrent que la structure conçue via le cadre d'optimisation proposé pour la structure en treillis peut atteindre des performances supérieures sur les propriétés mécaniques, telles que la rigidité, la charge d'élasticité et la charge ultime, par rapport à la conception uniforme.

#### 4 CONCLUSION

Les structures en treillis gagnent en importance en raison des progrès de la fabrication additive et de leur capacité à atteindre des objectifs majeurs tels que la réduction de l'utilisation des matériaux, du temps et de l'énergie, et l'optimisation de la résistance tout en minimisant le poids. La combinaison de la fabrication additive et de l'optimisation de la topologie a conduit à la création de différentes stratégies de conception de haute qualité, économiques à produire et respectant les tolérances. Le treillis et l'optimisation de la topologie sont les deux principales stratégies d'allègement qui exploitent au mieux les libertés de conception offertes par la fabrication additive. Dans cet article, une nouvelle méthode d'optimisation de la topologie de la structure en treillis a été proposée en utilisant une combinaison d'ANSYS et de MATLAB pour créer une conception de structure en treillis légère avec des performances de rendement prévisibles. L'efficacité de la méthode a été démontrée en résolvant le problème de référence de faisceau simplement supporté. La méthode proposée peut être utilisée dans les industries manufacturières pour améliorer les performances mécaniques et les aspects de fabrication de la conception de fabrication additive. La recherche dans ce domaine est en cours et de nouvelles approches de conception de remplissage de réseau et des techniques d'optimisation topologique ont été proposées pour obtenir des conceptions de réseau optimales pour la fabrication additive.

#### 5 REFERENCES

Cheng, L., Bai, J., To, A. C. J. C. M. i. A. M., & Engineering. (2019). Functionally graded lattice structure topology optimization for the design of additive manufactured components with stress constraints. 344, 334-359.

Deering, J., & Grandfield, K. (2021). Current interpretations on the in vivo response of bone to additively manufactured metallic porous scaffolds: A review. *Biomaterials and Biosystems*, 2, 100013. doi:10.1016/j.bbiosy.2021.100013

Dong, Z., & Zhao, X. J. E. R. (2021). Application of TPMS structure in bone regeneration. 2, 154-162.

El Khadiri, I., Abouelmajd, M., Zemzami, M., Hmina, N., Lagache, M., AlMangour, B., . . . Belhouideg, S. (2022). TPMS Lattice Structure derived using Topology Optimization for the Design of Additive Manufactured Components. Paper presented at the 2022 8th International Conference on Optimization and Applications (ICOA).

El Khadiri, I., Zemzami, M., Hmina, N., Lagache, M., & Belhouideg, S. (2021). Topology Optimization of Structures Obtained by Additive Manufacturing: Case of 3D beam. Paper presented at the 2021 7th

International Conference on Optimization and Applications (ICOA).

Jihong, Z., Han, Z., Chuang, W., Lu, Z., Shangqin, Y., & Zhang, W. J. C. J. o. A. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. 34(1), 91-110.

Kim, K.-S., Hwang, J.-W., Lee, K.-A. J. J. o. A., & Compounds. (2020). Effect of building direction on the mechanical anisotropy of biocompatible Co-Cr-Mo alloy manufactured by selective laser melting process. 834, 155055.

Liu, C., Du, Z., Zhang, W., Zhu, Y., & Guo, X. J. J. o. A. M. (2017). Additive manufacturing-oriented design of graded lattice structures through explicit topology optimization. 84(8).

Nagesha, B., Dhinakaran, V., Shree, M. V., Kumar, K. M., Chalawadi, D., & Sathish, T. J. M. T. P. (2020). Review on characterization and impacts of the lattice structure in additive manufacturing. 21, 916-919.

Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. J. C. P. B. E. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. 143, 172-196.

Panesar, A., Abdi, M., Hickman, D., & Ashcroft, I. J. A. M. (2018). Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for additive manufacturing. 19, 81-94.

Plocher, J., Panesar, A. J. M., & Design. (2019). Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. 183, 108164.

Schoen, A. H. (1970). Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections. Retrieved from

Seharing, A., Azman, A. H., & Abdullah, S. J. A. i. M. E. (2020). A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts. 12(6), 1687814020916951.

Wang, Y., Zhang, L., Daynes, S., Zhang, H., Feih, S., Wang, M. Y. J. M., & Design. (2018). Design of graded lattice structure with optimized mesostructures for additive manufacturing. 142, 114-123.