



HAL
open science

Conception et caractérisation d'un absorbeur d'énergie obtenu par fabrication additive

Hugo Carassus, Jean-Dominique Guerin, Hervé Morvan, Grégory Haugou,
Eric Markiewicz, Sandra Guerard

► To cite this version:

Hugo Carassus, Jean-Dominique Guerin, Hervé Morvan, Grégory Haugou, Eric Markiewicz, et al.. Conception et caractérisation d'un absorbeur d'énergie obtenu par fabrication additive. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mar 2021, LAVAL VIRTUAL WORLD, France. hal-03296110

HAL Id: hal-03296110

<https://hal.science/hal-03296110>

Submitted on 22 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Conception et caractérisation d'un absorbeur d'énergie obtenu par fabrication additive

Hugo Carassus

UPHF, LAMIH UMR CNRS 8201
Campus du Mont Houy
Valenciennes – France
hugo.carassus@uphf.fr

Jean-Dominique Guérin

UPHF, INSA HdF, LAMIH UMR CNRS 8201
Campus du Mont Houy
Valenciennes – France
jean-dominique.guerin@uphf.fr

Hervé Morvan

UPHF, LAMIH UMR CNRS 8201
Campus du Mont Houy
Valenciennes – France
herve.morvan@uphf.fr

Grégory Haugou

UPHF, INSA HdF, LAMIH UMR CNRS 8201
Campus du Mont Houy
Valenciennes – France
gregory.haugou@uphf.fr

Eric Markiewicz

UPHF, INSA HdF, LAMIH UMR CNRS 8201
Campus du Mont Houy
Valenciennes – France
eric.markiewicz@uphf.fr

Sandra Guérard

Arts et Métiers ParisTech, I2M UMR CNRS 5295
Talence – France
sandra.guerard@ensam.eu

Résumé

Cette communication est relative à la conception et la caractérisation d'un absorbeur d'énergie réalisé par fabrication additive métallique. Des structures spécialement élaborées sont caractérisées sur deux bancs d'essais, chacun dédié aux études en quasi-statique et aux études dynamiques à grande vitesse de déformation. Le procédé de fabrication additive de fusion laser sur lit de poudre (SLM) est mis en œuvre pour fabriquer des structures cellulaires en acier inoxydable 316L. Ces dernières sont des TPMS (Triple Periodic Minimal Surface) à motif Gyroïde de type « skeletal ». Après une brève description des démarches de conception et des conditions d'élaboration des structures, une étude du comportement dynamique en compression de ces dernières est présentée. Les procédures expérimentales et numériques sont remises en contexte puis détaillées. Les discussions portent d'une part sur les corrélations entre résultats numériques et expérimentaux en termes d'énergie absorbée, de contrainte plateau et de modes de déformation et, d'autre part, sur un positionnement par rapport aux autres structures cellulaires testées en conditions similaires suivant les performances. Enfin, une mise en perspective de ces travaux est proposée.

Mots-clés — Matériau cellulaire, Fabrication additive métallique, TPMS, absorption d'énergie, compression uniaxiale, chargement dynamique

I. INTRODUCTION

La fabrication additive permet d'envisager la conception de nouveaux matériaux cellulaires combinant légèreté et grande capacité d'absorption d'énergie tels que les structures lattices. Leur utilisation dans les secteurs du transport terrestre ou aérien revêt alors un intérêt certain pour contribuer conjointement à l'allègement structural et à la sécurité en cas de crash et/ou d'impacts. Nos travaux sont axés sur des structures issues de la famille des TPMS (Triple Periodic Minimal Surface) qui sont inspirées de la nature. Ces matériaux cellulaires sont obtenus à partir d'une fonction niveau qui minimise localement l'aire de la surface pour une condition aux limites donnée. Une revue de l'état de l'art montre que cette catégorie de matériaux cellulaires, obtenue par fabrication additive métallique, n'a à ce jour été étudiée que sous chargement quasi-statique. Il est proposé ici d'étendre l'analyse de leur comportement mécanique sous chargement dynamique.

Dans cette communication, les procédures de mise en œuvre comprenant les démarches de conception et les conditions d'élaboration des structures, ainsi que les principales hypothèses de modélisation seront explicitées en partie II. Une étude du comportement dynamique en compression de ces dernières sera présentée en partie III. Les procédures expérimentales et numériques associées seront remises en contexte puis détaillées. Les discussions, en partie IV porteront principalement d'une part sur les corrélations entre résultats

numériques et expérimentaux en termes d'énergie absorbée, de contrainte plateau et de modes de déformation et, d'autre part, sur un positionnement par rapport aux autres structures cellulaires testées en conditions similaires suivant les performances. Enfin une mise en perspective de ces travaux sera proposée en partie V.

Glossaire

x, y, z	[m]	Coordonnées cartésiennes des points de la <i>Gyroïde</i>
k	[m ⁻¹]	Coefficient
l	[m]	Longueur d'une cellule élémentaire
t	[1]	Paramètre niveau
ρ^*	%	Densité relative du matériau cellulaire
P	[W]	Puissance du laser (SLM)
e	[m]	Épaisseur de couche
V	[m.s ⁻¹]	Vitesse de scan
h	[m]	Ecart vecteur
A	[MPa]	Limite d'élasticité
B	[MPa]	Paramètre d'écrouissage plastique
C	[1]	Coef. de sensibilité à la vitesse de déformation
m	[1]	Coefficient de sensibilité à la température
n	[1]	Coefficient d'écrouissage
ϵ_p	[1]	Déformation plastique équivalente
$\dot{\epsilon}$	[s ⁻¹]	Vitesse de déformation plastique équivalente
$\dot{\epsilon}_0$	[s ⁻¹]	Vitesse de déformation de référence
T_f	[K]	Température de fusion
T_0	[°]	Température ambiante
W_b	[kJ.kg ⁻¹]	Energie spécifique absorbée
σ_p	[MPa]	Contrainte plateau

II. PROCEDURE D'ESSAIS

A. Design

Les TPMS sont définis par des fonctions implicites qui minimisent localement l'aire de la surface pour des conditions données. Dans le cas du motif Gyroïde, la fonction est représentée par l'équation (1) où x, y et z sont les coordonnées cartésiennes, k un coefficient proportionnel à l'inverse de la longueur l d'une cellule élémentaire ($k = 2\pi/l$) et t le paramètre niveau.

$$f(x, y, z) = \cos(kx) \sin(ky) + \cos(ky) \sin(kz) + \cos(kz) \sin(kx) - t \quad (1)$$

On distingue deux sous-familles de TPMS selon la méthode d'obtention, comme illustré sur la Figure 1. Les TPMS surfaciques [*sheet*] sont obtenues par un épaissement uniforme de l'isosurface (correspondant à $t = 0$) et les TPMS squelettes [*skeletal*] résultent d'une valeur non nulle du paramètre niveau ($t \in [-1,41; 1,41]$) [1]. Un code MATLAB est utilisé pour générer un fichier STL (STéréoLitographie) contenant le maillage surfacique de la structure paramétrée selon les caractéristiques géométriques souhaitées (densité relative, taille du motif élémentaire, dimensions, résolution). Cette étude est focalisée sur le *skeletal Gyroid* dont la taille du motif élémentaire de 10 mm avec une répétition de 2*2*2 motifs dans chaque direction de l'espace. La densité relative ρ^* visée de 30% est obtenue avec un paramètre niveau $t = 0.61$.

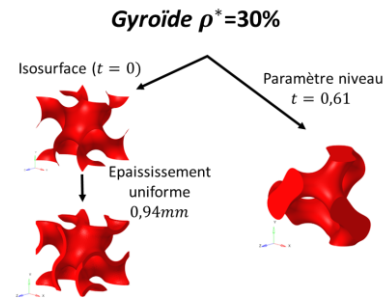


Figure 1. Obtention des sous-familles *sheet* et *skeletal* du motif *Gyroid* pour une densité relative de 30%.

B. Fabrication

La fabrication des structures *Gyroid* en acier inoxydable 316L est réalisée par un sous-traitant externe (ErPro) via une machine SLM 280 (fusion laser sur lit de poudre). La poudre métallique de forme sphérique, dont la composition chimique est détaillée dans le Tableau 1, a une taille comprise entre 10 et 45 μ m. Les principaux paramètres d'élaboration du procédé de fabrication additive sont (Figure 2) :

- Puissance du laser : $P = 200$ W
- Épaisseur de couche : $e = 30$ μ m
- Vitesse de scan : $V = 800$ mm/s
- Ecart vecteur : $h = 120$ μ m

Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	C	P, S
67-69	16-18	10-14	2-3	2	0,75	< 0,1	< 0,03	< 0,045

Tableau 1. Composition chimique, en pourcentage massique, de la poudre d'acier inoxydable 316L.

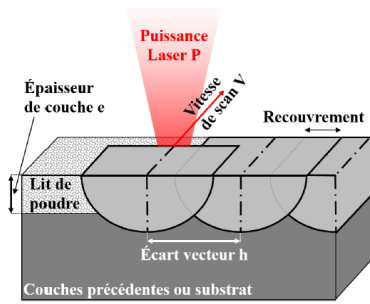


Figure 2. Schéma de principe du procédé SLM avec les principaux paramètres.

La densité d'énergie volumique associée et de $69,4 \text{ J/mm}^3$ et la méthode de scan employée est une stratégie en méandres (*single layer meandering*). Après fabrication, les structures sont désolidarisées de leur support et subissent un traitement thermique à 1095°C pendant deux heures, suivi d'une trempe à l'eau.

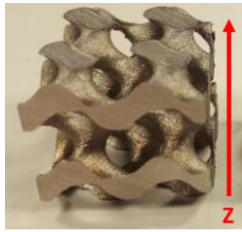


Figure 3. *Skeletal Gyroid* après fabrication selon la direction de fabrication Z.

C. Moyens d'essais

Outre les vérifications géométriques d'usage, la densité relative effective des *skeletal Gyroid* est obtenue en mesurant la masse des structures dans l'eau et dans l'air avec une précision de $0,01\text{g}$. La densité relative moyenne mesurée est de $27,4\%$ avec un écart type de $0,25\%$. Des écarts similaires ont été observés entre densité relative nominale et mesurée par plusieurs études [2,3] et sont attribués à la présence de particules résiduelles non fondues sur les surfaces de la structure.

Les essais mécaniques sont réalisés d'une part sur un vérin électromécanique Instron Sintech (vitesses de compression de 1 mm/min et 50 mm/min) et, d'autre part, en utilisant un montage de barres d'Hopkinson en compression (vitesse de chargement 15 m/s) visible en Figure 4.

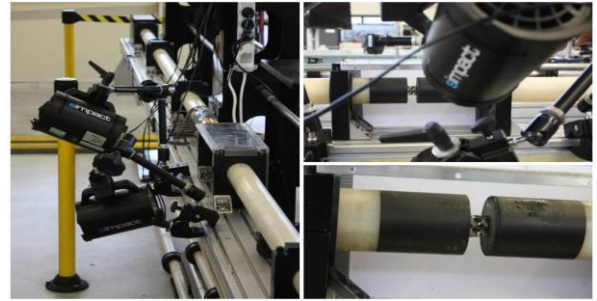


Figure 4. Photos du montage des barres d'Hopkinson en compression avec la mise en position du *skeletal Gyroid*.

D. Modèles numériques

À partir du fichier STL, un maillage volumique comportant des éléments tétraédriques à 10 nœuds est généré sur le logiciel HYPERMESH. Le modèle comprend $75\,000$ éléments avec une taille moyenne d'élément de $0,2 \text{ mm}$. La modélisation de la compression est effectuée sur le logiciel HYPERCRASH par le biais de deux corps rigides plans parallèles, apparaissant de couleur vert et rouge en Figure 5. Le corps rigide inférieur (rouge) est encastré alors que le corps rigide supérieur est mobile selon z (flèche jaune) à une vitesse de 15 m/s .

Pour simuler l'essai quasi-statique (1 mm/min), la sensibilité à la vitesse de déformation n'est pas prise en compte ($C=0$). Trois contacts de type maître/esclave sont considérés : deux interfaces entre chaque plan et le TPMS, et une interface d'auto-contact pour le TPMS pour éviter l'auto-pénétration. Les calculs sont lancés sur le solveur explicite RADIOSS en parallélisant les calculs sur 10 processeurs.

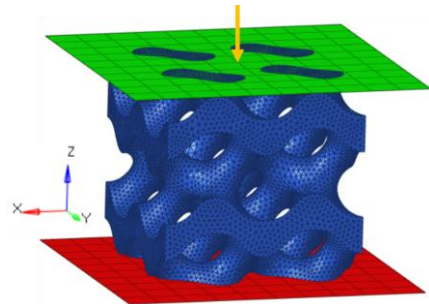


Figure 5. Modèle numérique de la compression du *skeletal Gyroid*.

Le comportement elasto-plastique de l'acier inoxydable 316L, supposé isotropique [4], est modélisé par un modèle de Johnson-Cook suivant l'équation (2).

$$\sigma_y = [A + B(\varepsilon_p)^n] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

Avec A , B et C les constantes matériaux, m et n respectivement les coefficients de sensibilité à la température et d'écrouissage, ε_p la déformation plastique, $\dot{\varepsilon}$ la vitesse de déformation, $\dot{\varepsilon}_0 = 0,0006 \text{ s}^{-1}$ la vitesse de déformation de référence, T_f la tempé-

rature de fusion, et T_0 la température ambiante. Les effets thermiques ne sont pas considérés ici et les paramètres identifiés, issus d'une étude antérieure, sont donnés en Tableau 2.

A (MPa)	B (MPa)	C	n
454	487	0,012	0,52

Tableau 2. Paramètres de la loi Johnson-Cook pour l'acier inoxydable 316L issu du procédé de fabrication additive SLM.

III. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET NUMERIQUES

La Figure 6 présente les courbes contrainte-déformation apparentes. La contrainte est obtenue en effectuant le ratio entre l'effort mesuré et la surface apparente. La déformation est obtenue en effectuant le ratio entre le déplacement et la hauteur initiale de la structure TPMS. Les six courbes présentent les trois phases caractéristiques suivantes :

- Une première phase linéaire et élastique
- une deuxième phase « plateau » où la contrainte évolue de manière quasi-constante avec une pente légèrement ascendante (apparition locale de déformations plastiques)
- une troisième phase de densification marquée par une augmentation nette de la contrainte (contact entre les éléments de structure voisins)

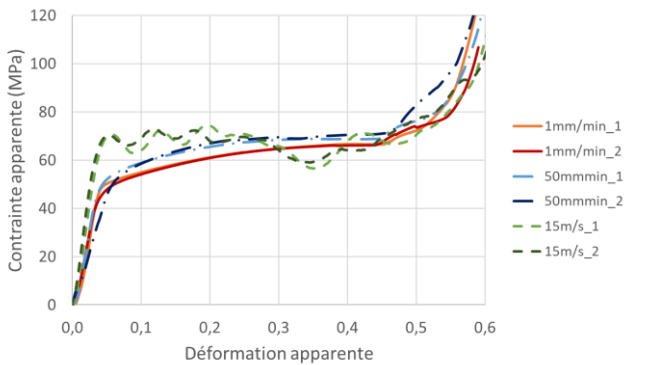


Figure 6. Courbes contrainte-déformation apparentes expérimentales pour le skeletal Gyroid aux trois vitesses de chargement.

A noter l'absence de pic de contrainte après à la phase élastique contrairement à ce qu'il est possible d'observer pour certains matériaux cellulaires [5,6]. Les capacités/performances d'un absorbeur d'énergie sont souvent évaluées en termes de valeurs d'énergie spécifique absorbée (par la structure) et de contrainte plateau. Le Tableau 3 reprend les valeurs obtenues pour ces deux quantités selon la vitesse croissante des essais réalisés. Pour déterminer l'énergie spécifique absorbée W_b on calcule l'aire sous la courbe contrainte-déformation apparente, jusqu'à une déformation apparente de 50%, que l'on divise par la masse de la structure TPMS. La contrainte plateau σ_p est la valeur moyenne de la contrainte apparente durant la phase plateau,

correspondant ici à une mesure entre 10% et 40% de la déformation apparente.

	1mm/min_1	1mm/min_2	50mm/min_1	50mm/min_2	15m/s_1	15m/s_2
Energie spécifique absorbée (kJ/kg)	13,4	13,6	14,2	14,5	14,5	14,9
Contrainte plateau (MPa)	62,4	62,1	66,2	67,3	68,6	66,9

Tableau 3. Paramètres obtenus à partir des courbes contrainte-déformation apparentes expérimentales des skeletal Gyroid.

En augmentant la vitesse de chargement de 1 mm/min à 15 m/s, qui correspond respectivement à des vitesses de déformation macroscopiques équivalentes de $0,00083 \text{ s}^{-1}$ et 750 s^{-1} , des augmentations de 8,9% de l'énergie spécifique absorbée et de 8,8% de la contrainte plateau sont constatées. La densification ne semble pas affectée par l'augmentation de la vitesse de chargement. Elle est atteinte pour une déformation apparente proche des 50% pour les six essais. La déformation du skeletal Gyroid est bien uniforme sur la structure et les modes de déformation sont similaires pour les trois vitesses de chargement. La Figure 7 reprend des clichés pris à trois niveaux de déformation apparente pour des vitesses de 1 mm/min et 15 m/s (des résultats similaires sont observés pour 50 mm/min).

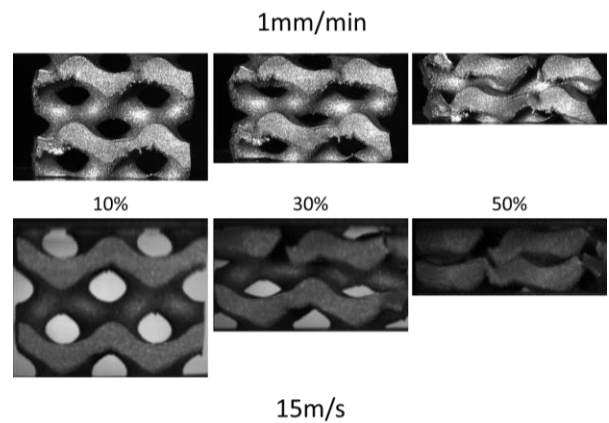


Figure 7. Compaction du skeletal Gyroid à 1 mm/min et 15 m/s pour trois niveaux de déformation apparente.

Les courbes contrainte-déformation apparentes issues des simulations numériques sont données en Figure 8. L'allure des courbes est similaire à celles obtenues expérimentalement, avec la présence des trois phases distinctives. L'énergie spécifique absorbée est de 13,1 kJ/kg pour 1 mm/min et de 14,7 kJ/kg pour 15 m/s, ce qui représente une augmentation de 12,2%. La contrainte plateau est de 62,8 MPa pour 1 mm/min et de 70,5 MPa pour 15 m/s, ce qui représente également une augmentation de 12,3%.

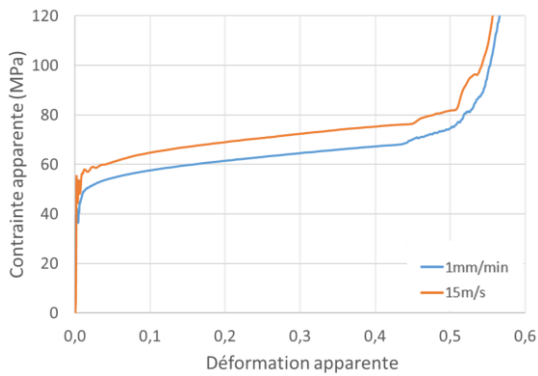


Figure 8. Courbes contrainte-déformation apparentes numériques du *skeletal Gyroid* en quasi-statique et en dynamique.

L'observation et l'analyse de la distribution des déformations plastiques et des contraintes équivalentes de Von Mises montrent une répartition hélicoïdale alignée dans la direction de chargement, ici selon z (Figure 9). La déformée globale de la structure TPMS est uniforme et ne présente pas de bande de cisaillement diagonale comme cela se produit pour certaines structures lattices ou autres TPMS [3].

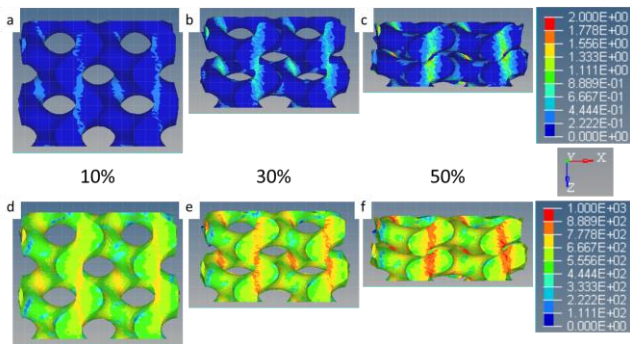


Figure 9. Déformation en coupe médiane du *skeletal Gyroid* lors d'une compression quasi-statique, pour 3 niveaux de déformation apparente 10%, 30% et 50% : (a), (b) et (c) distributions respectives des déformations plastiques et ; (d), (e) et (f) distributions respectives des contraintes de Von Mises.

IV. DISCUSSIONS

Le modèle numérique permet de prédire de manière assez précise la réponse mécanique à une compression uniaxiale. L'écart maximal observé sur la contrainte plateau et l'énergie spécifique absorbée pour les deux vitesses de chargement est de 4%. Comme montré en Figure 10, une meilleure corrélation expérimentale/numérique est obtenue pour le chargement quasi-statique. En chargement dynamique la chute de la contrainte, en seconde partie du plateau, sur la courbe expérimentale n'est pas présente sur la courbe numérique. Li et al [7] font la même constatation sur des lattices à coques (*smooth shell lattices*) pour des vitesses de déformation macroscopiques allant de $0,001 \text{ s}^{-1}$ à 400 s^{-1} . Ils attribuent cela à des phénomènes d'adoucissement, dus principalement à un auto-échauffement, qui contrecarrent les effets d'écroutissage et

de vitesse de déformation. Dans les simulations numériques, les effets thermiques ne sont ici pas pris en compte au niveau de la loi de comportement introduite. La phase de densification augmente les contacts et les transferts thermiques internes dans la structure réelle, atténuant donc les auto-échauffements locaux. Dans cette phase, les taux d'écroutissage obtenus expérimentalement et numériquement sont comparables.

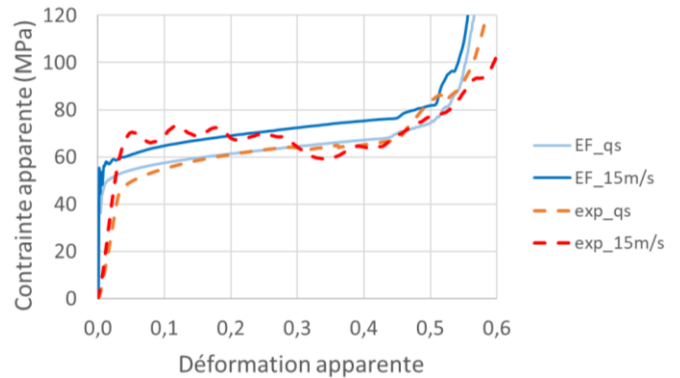


Figure 10. Comparaison des courbes contrainte-déformation apparentes numériques (EF) et expérimentales (exp).

L'augmentation de la contrainte d'écoulement avec la vitesse de déformation est un phénomène recensé pour la grande majorité des matériaux cellulaires [8]. Ce phénomène relève à la fois de la sensibilité à la vitesse de déformation du matériau constitutif et des effets structuraux. Tancogne *et al.* 2019 [9] ont ainsi relevé une augmentation de 8% de l'énergie spécifique absorbée pour des vitesses de déformation macroscopiques allant de $0,001 \text{ s}^{-1}$ à 400 s^{-1} pour des *plate lattices*. Nous retrouvons des résultats similaires pour les *skeletal Gyroid*, objets de la présente étude. Dans cette même étude, ils ont observé une hausse de la limite d'élasticité du matériau constitutif (acier inoxydable 316L) de 26% pour des vitesses de déformation allant de $0,001 \text{ s}^{-1}$ à 200 s^{-1} . Ils attribuent ainsi l'augmentation de l'énergie spécifique absorbée du matériau cellulaire exclusivement au comportement du matériau de structure, sans effet notable de l'architecture structurale. Nous avons constaté la même tendance sur la campagne expérimentale de caractérisation que nous avons menée sur l'acier inoxydable 316L fabriqué par SLM. En augmentant la vitesse de déformation de $0,001 \text{ s}^{-1}$ à 300 s^{-1} , des augmentations de 35,1% de la limite d'élasticité et de 14,9% de la contrainte maximale sont constatées.

V. PERSPECTIVES

Cette étude a permis d'étudier la réponse mécanique dynamique d'une structure *skeletal Gyroid* à des compressions uniaxiales pour plusieurs vitesses de chargement. De par les analyses expérimentales et numériques menées, nous considérons que ces TPMS montrent certaines caractéristiques d'un bon absorbeur d'énergie.

Une étude du *sheet Gyroid*, l'autre sous-famille des TPMS, est menée conjointement. L'un des objectifs est d'étudier et

d'expliciter l'influence d'une gestion différente de l'épaisseur du motif (contrairement au *skeletal Gyroid*, l'épaisseur du *sheet Gyroid* est uniforme). D'autres motifs TPMS, comme ceux présentés en Figure 10, sont envisagés de façon à explorer d'autres réponses mécaniques.

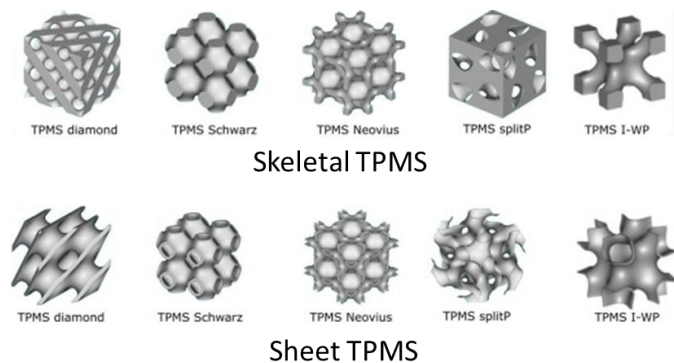


Figure 11. Différents motifs TPMS avec les deux sous-familles *skeletal* et *sheet*.

VI. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'Institut Carnots Arts pour sa contribution au financement des études ainsi que le pôle AIP-PRIMECA S-mart Nord-Pas de Calais pour le support des travaux de recherche.

VII. REFERENCES

- [1] L. Yang, C. Yan, C. Han, P. Chen, S. Yang, and Y. Shi, "Mechanical response of a triply periodic minimal surface cellular structures manufactured by selective laser melting" *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 148, pp. 149–157, Nov. 2018, [DOI](#).
- [2] Y. Liang, W. Zhou, Y. Liu, Y. Yang, H. Xi, and Z. Wu, "Energy Absorption and Deformation Behaviour of 3D Printed TPMS Stainless Steel Cellular Structures Under Compression" *steel research international*, vol. n/a, no. n/a, [DOI](#).
- [3] L. Zhang et al., "Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading" *Additive Manufacturing*, vol. 23, pp. 505–515, Oct. 2018, [DOI](#).
- [4] X. Cao et al., "Dynamic compressive behavior of a modified additively manufactured rhombic dodecahedron 316L stainless steel lattice structure" *Thin-Walled Structures*, vol. 148, p. 106586, Mar. 2020, [DOI](#).
- [5] Ashby M.F, "The properties of foams and lattices" *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 364, no. 1838, pp. 15–30, Jan. 2006, [DOI](#).
- [6] L. J. Gibson and M. F. Ashby, "Cellular Solids: Structure and Properties" Cambridge Core, May 1997, ISBN-13: 978-0521495608.
- [7] X. Li, C. C. Roth, T. Tancogne-Dejean, and D. Mohr, "Rate- and temperature-dependent plasticity of additively manufactured stainless steel 316L: Characterization, modeling and application to crushing of shell-lattices" *International Journal of Impact Engineering*, vol. 145, p. 103671, Nov. 2020, [DOI](#).
- [8] Y. Sun and Q. M. Li, "Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling" *International Journal of Impact Engineering*, vol. 112, pp. 74–115, Feb. 2018, [DOI](#).
- [9] T. Tancogne-Dejean, X. Li, M. Diamantopoulou, C. C. Roth, and D. Mohr, "High Strain Rate Response of Additively-Manufactured Plate-Lattices: Experiments and Modeling," *J. dynamic behavior mater.*, pp. 1–15, Aug. 2019, [DOI](#).