



HAL
open science

Structures architecturées issues des procédés LMD-P et SLM : étude comparative de la fabrication et du comportement mécanique

Camille Buros, Julie Lartigau, Philippe Viot

► To cite this version:

Camille Buros, Julie Lartigau, Philippe Viot. Structures architecturées issues des procédés LMD-P et SLM : étude comparative de la fabrication et du comportement mécanique. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04281687

HAL Id: hal-04281687

<https://hal.science/hal-04281687>

Submitted on 13 Nov 2023

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.

Structures architecturées issues des procédés LMD-P et SLM : étude comparative de la fabrication et du comportement mécanique

C.Buros^a, J.Lartigau^b, P.Viot^c

a. Univ. Bordeaux, ESTIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, F-64210 Bidart, France -
camille.buros@estia.fr

b. Univ. Bordeaux, ESTIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, F-64210 Bidart, France -
j.lartigau@estia.fr

c. Arts et Métiers, I2M, F-33405 Talence, France – philippe.viot@ensam.eu

Résumé :

Le comportement des matériaux architecturés dépend du matériau constitutif et de sa structure poreuse. Les propriétés mécaniques de pièces produites par fabrication additive sont fortement dépendantes des paramètres du procédé employé. L'approche développée consiste à étudier le comportement de structures architecturées sous sollicitations en compression, en prenant en compte la stratégie d'impression 3D et la morphologie de l'architecture réalisée. Des structures tri-hexagonales en acier 316L de différentes géométries sont fabriquées par LMD-P et SLM, puis testées sous sollicitations en compression quasi-statique et dynamiques à grandes vitesses de déformation. La structure du matériau constitutif est également étudiée à l'aide d'observations microscopiques. Cet article présente les moyens expérimentaux développés et les résultats des essais obtenus aux échelles macroscopiques et microscopiques.

Abstract :

The behavior of architected materials depends on the constitutive material and its porous structure. Mechanical properties of parts produced by additive manufacturing highly depends on the parameters of the process used. The approach developed consists in studying the behavior of the architected structures under compressive loading, considering the 3D printing strategy and morphology of the architecture. Tri-hexagonal structures in 316L steel are fabricated by LMD-P and SLM and tested under quasi-static and dynamic compressive loading at high strain rates. The structure of the constitutive material is also studied through microscopic observations. This article presents the experimental apparatus developed and tests results obtained at the macroscopic and microscopic scales.

Mots clefs : fabrication additive métallique, structures architecturées, comportement mécanique, sollicitations en compression, microstructure

1 Introduction

Les matériaux cellulaires sont définis par Gibson & Ashby (1997) comme étant un ensemble de cellules avec des faces et/ou des poutres solides assemblées d'une telle manière qu'il remplissent l'espace. Les matériaux architecturés représentent une nouvelle classe de matériaux cellulaires qui permettent d'atteindre de nouvelles propriétés structurelles et fonctionnelles, repoussant ainsi les limites des cartes d'Ashby. Les matériaux architecturés sont définis comme étant la combinaison de deux ou plus matériaux, ou d'un matériau et de l'espace, assemblés d'une telle façon qu'ils possèdent des caractéristiques non atteignables avec un matériau seul [1]. Plusieurs exemples de matériaux architecturés existent : les composites fibreux et particulaires, les structures périodiques (ou en treillis), les structures sandwich, etc [1]. Les matériaux étudiés dans cette étude sont les structures périodiques. Ces matériaux sont composés de cellules régulières répétées selon différentes orientations dans l'espace [2]. Par leur faible masse et leur structure répétée, ces matériaux présentent plusieurs avantages. Leur utilisation est particulièrement intéressante dans un but d'optimisation de la microstructure selon l'application finale désirée. Ces matériaux sont par exemple, régulièrement utilisées pour un besoin d'allègement structurel. Par leur capacité à absorber de l'énergie lors d'un choc, les structures architecturées sont également répandues pour des applications de protection de biens et de personnes. Une protection efficace est garantie lorsque l'énergie absorbée est maximisée pour un effort d'impact minimisé. Les matériaux architecturés peuvent subir de grandes déformations pour une contrainte modérée, ce qui fait d'eux d'excellents candidats [2]. L'émergence des technologies de fabrication additive (FA) a rendue possible la conception et la réalisation - précisément contrôlée - de nouvelles géométries d'architecture pour ces matériaux. Il est proposé dans ces travaux que l'architecture générée lors de la FA, pour remplir un volume et/ou faciliter le procédé de fabrication, puisse aussi assurer une fonction d'absorbeur d'énergie de choc. Il y a donc un intérêt particulier à optimiser l'architecture qui peut être reproduite finement par FA, contrairement à un matériau cellulaire classique [3]. Cependant, la qualité et le comportement mécanique de pièces métalliques réalisées par FA dépendent de nombreux paramètres pour que naisse, de la géométrie numérique, une structure réelle aux propriétés attendues. Dans cette étude, des structures architecturées périodiques sont fabriquées par projection de poudre et fusion sur lit de poudre. Le matériau utilisé est l'acier inoxydable austénitique 316L, aussi nommé X2CrNiMo17-12-2. Ces travaux présentent l'influence de la fabrication sur leur comportement mécanique – quasi-statique et dynamique – à différentes vitesses de déformation et leur structure à travers une étude de la microstructure.

2 Fabrication des pièces

Deux technologies de fabrication additive métallique sont envisagées dans cette étude : la projection de poudre (LMD-P) et la fusion sur lit de poudre (SLM). Pour cette première phase de l'étude, les structures fabriquées présentent une mésostructure périodique tri-hexagonale (Figure 1) de différentes dimensions et géométries. Les étapes mises en place pour fabriquer les structures sont décrites dans les sections suivantes.

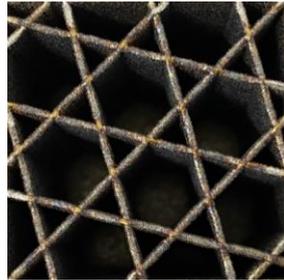


Figure 1 : Structure tri-hexagonale fabriquée par LMD-P

2.1 Laser Melting Deposition – Powder (LMD-P)

Lors de la fabrication de pièces par LMD-P, la matière sous forme de poudre est projetée à travers une buse puis déposée et fusionnée par un faisceau laser sur une surface, que l'on appelle substrat. Ce procédé permet la fabrication d'un grand nombre de matériaux avec une haute flexibilité de dimensions des pièces. Cependant, des étapes de post traitement sont généralement nécessaires pour obtenir une planéité de surface correcte [4].

La machine utilisée dans cette étude est une machine BeAM MAGIC 800 qui possède une tête munie d'un laser à fibre (d'une puissance maximale de 2kW) montée sur un système 3 axes. La buse utilisée lors de la fabrication des structures tri-hexagonales possède un diamètre de sortie égal à 1,2 mm.

Des cubes de $25 \times 25 \times 30 \text{ mm}^3$ et des cylindres de 25 mm de diamètre et 30 mm de hauteur sont fabriqués sur des substrats en acier de dimensions $50 \times 50 \times 5 \text{ mm}$ (Figure 2). Afin de réaliser un motif tri-hexagonal, des mono cordons sont déposés. Au vu du croisement des cordons déposés lors de la réalisation de ce type de structure, une étude paramétrique est d'abord menée afin de sélectionner le meilleur choix de paramètres de fabrication qui engendreront le moins de défauts pour la fabrication. Les paramètres qui sont modifiés sont notamment, la vitesse de balayage de la buse V (en mm/min) et la distance d'arrêt puis reprise laser pendant une intersection de trajectoire – que l'on appellera distance laser off - (noté d , en mm). La puissance laser P (en W), le débit massique de poudre D (en g/min) ainsi que la hauteur de couche déposée Δz (en mm) sont fixés à la suite de précédentes expériences réalisées avec la machine. Un jeu de paramètre a été identifié comme référence d'après l'étude paramétrique réalisée. Les paramètres du procédé utilisés pour la fabrication des échantillons sont présentés dans le Tableau 1.

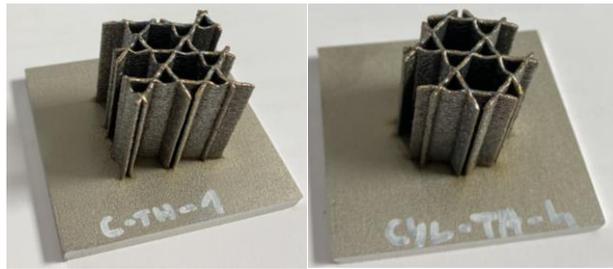


Figure 2 : Structures tri-hexagonales fabriquées par LMD-P

Tableau 1 : Paramètres de consigne appliqués pour la fabrication des structures tri-hexagonales par LMD-P

Paramètres consigne	Valeurs
Puissance laser P	2000 W
Hauteur de couche Δz	0,15 mm
Débit massique de poudre D	13 % (2,8 – 3,0 g/min)
Vitesse de balayage V	1000 mm/min
Distance laser off d	0 mm

2.2 Selective Laser Melting (SLM)

La fusion sélective par laser (SLM), est une technologie de fabrication additive à partir d'un lit de poudre et d'une source d'énergie thermique. Lors de la fabrication de pièces par SLM, après déposition d'une couche de poudre métallique sur un support, un faisceau laser fusionne la matière de façon sélective selon la géométrie désirée. Une fois la première couche fondue, une seconde couche de poudre est déposée puis fondue à son tour. Le procédé SLM permet la fabrication de pièces à géométries complexes avec une précision de dimension élevée. Cependant, la taille de pièces produites est limitée par les dimensions du lit dans lequel se trouve la poudre [4].

Les pièces sont produites à l'aide d'une machine SLM 280HL (SLM Solutions) munie d'un laser à fibre de diamètre de faisceau 80 μm et de longueur d'onde 1070 μm . Des cubes de 25 x 25 x 30 mm³ et des cylindres de 25 mm de diamètre et 30 mm de hauteur sont fabriqués, comme pour le procédé LMD-P (Figure 3). Les paramètres utilisés pour la fabrication ont été déterminés à la suite de précédentes expériences réalisées avec la machine.



Figure 3 : Structures tri-hexagonales fabriquées par SLM

3 Structure

La morphologie et la microstructure de pièces réalisés par procédés de fabrication additive dépendent fortement de la vitesse de refroidissement et des gradients thermiques dans le bain de fusion [5, 6]. Les aciers austénitiques inoxydables, comme l'acier 316L, présentent une microstructure composée de motifs très hétérogènes et répartis sur plusieurs échelles [7, 8, 9]. La microstructure des structure tri-hexagonales réalisées par LMD-P et SLM est observée.

3.1 Matériels et méthodes

Pour observer la microstructure des structures fabriquées par LMD-P et SLM, les pièces sont d'abord découpées dans le sens de fabrication pour observer l'empilement des couches, puis polies avec des papiers de verre de tailles de grains différentes : P120, P400, P800, P1200, P2400 et P4000. La finition est réalisée avec une solution diamantée de 3 μm puis 1 μm . Par la suite, pour réaliser l'attaque, les échantillons sont placés dans une solution de composition $\text{HNO}_3 - \text{HCl} - \text{H}_2\text{O}$ en même quantité pendant une vingtaine de secondes. La microstructure est finalement observée au microscope numérique OLYMPUS PMG3. Les images sont observées et analysées avec le logiciel ToupView.

3.2 Résultats

Les structures observées présentent plusieurs bains de fusions se chevauchant avec une forme elliptique de dépôt (Figure 4). Cette caractéristique micro structurale est typique des procédés de fabrication additive et est la conséquence de la distribution gaussienne de l'énergie laser [10].

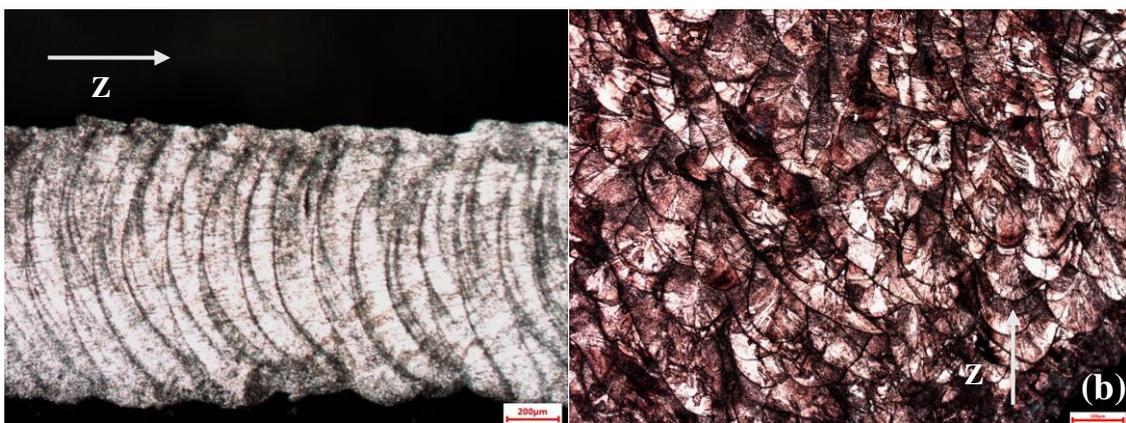


Figure 4 : Micrographies d'échantillons tri-hexagonales en 316L fabriqués par (a) LMD-P, (b) SLM

Pour les structures fabriquées par LMD-P, différentes morphologies de grains sont observées au sein de la microstructure : les grains colonnaires et les grains équiaxes. Les grains colonnaires sont représentés par une forme allongée qui croît dans la direction d'un gradient thermique maximal. Sur la figure 5(b), la direction de croissance des dendrites colonnaires est perpendiculaire aux bords incurvés du bassin de fusion et converge vers le centre. Au contraire, dans la zone centrale du bassin de fusion, on observe des dendrites équiaxes (figure 5(a)). Ce phénomène est la conséquence d'un changement de mode de transfert thermique. Dans un acier 316L, plusieurs caractéristiques microstructurales sont observées. Dans la zone centrale du bain de fusion, où le métal sous forme liquide solidifie légèrement plus tard, le transfert de chaleur par convection domine. Au contraire, aux bords du bain de fusion, le transfert de chaleur par conduction est le mode transfert dominant [10]. Ces variations de microstructures dans le sens de l'empilement des couches en Z a pour conséquence une variation des valeurs de la micro-dureté selon la direction de fabrication. On observe donc une micro-dureté qui augmente graduellement jusqu'aux dernières couches fabriquées. Cette variation de micro-dureté provient des différentes vitesses de refroidissement dans l'échantillon pendant sa fabrication [10]

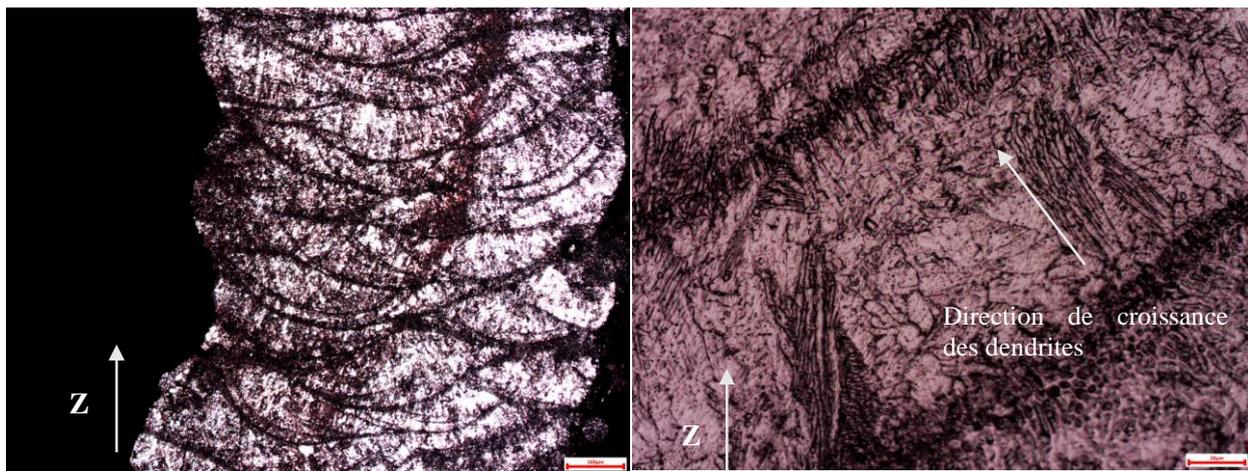


Figure 5 : Micrographies d'un échantillon tri-hexagonale en 316L fabriqué par LMD-P, (a) observation d'une croissance équiaxe dans la zone centrale, (b) observation de la direction de croissance des dendrites

4 Comportement mécanique

Le comportement mécanique des matériaux cellulaires est généralement caractérisé par son comportement en compression. Les matériaux cellulaires ont une capacité à subir de grandes déformations ($\epsilon_{zz} > 0,7$) sous sollicitations en compression [11]. Son comportement typique sous sollicitations uniaxiales peut être décomposé en trois phases : une phase élastique, une phase plateau et une phase de densification (figure 6) [1].

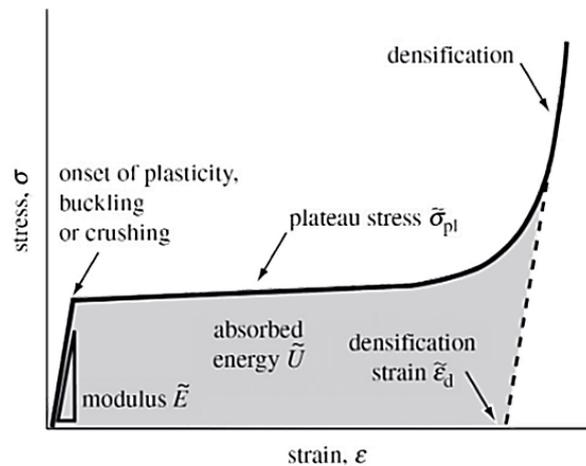


Figure 6 : Comportement typique d'un matériau cellulaire en compression uniaxiale [1]

La phase élastique est caractérisée par une pente linéaire ou quasi linéaire, observée à de faibles niveaux de déformation ($\varepsilon_{zz} < 0,05$). Dans cette phase, la réponse est principalement due à la flexion des cellules. Des endommagements (plasticité, micro-fissures...) localisés sont parfois observables. Pendant la phase plateau, la raideur macroscopique devient faible voire nulle pour certains matériaux (nid d'abeilles). La plage de déformation obtenue est large et générée par un effondrement progressif des cellules. Le comportement de la microstructure diffère selon le matériau de constitution du matériau cellulaire, ce qui se répercute sur le comportement macroscopique. Pendant la phase de densification, une forte augmentation du niveau de contrainte est observée. Le comportement devient proche de celui du matériau constitutif.

4.1 Matériels et méthodes

Afin d'analyser le comportement macroscopique en compression des structures architecturées, des essais de compression uniaxiale quasi-statique sont d'abord réalisés sur une machine ZWICK Roell d'une capacité de 250 kN. Avant de se lancer dans la réalisation d'essais dynamiques, il est important d'observer et de mesurer la phénoménologie mise en jeu dans des conditions expérimentales plus simples et d'observer la réponse macroscopique du matériau à faibles vitesses de déformation [12]. Les essais réalisés sont pilotés en déplacement avec des vitesses de traverse de 10 mm/min et 500 mm/min pour les deux procédés de fabrication additive. Un déplacement de la traverse de 10 mm est imposé aux structures LMD-P, et un déplacement de la traverse de 15 mm est renseigné pour les structures SLM. En complément des mesures, les images du processus de déformation sont capturées par une caméra CANON EOS 50D à une fréquence de capture d'image de 1 et 3 Hz à 10 mm/min et de 3 Hz à 500 mm/min. Les images thermiques sont capturées par une caméra FLYR SC 7000 à une fréquence de 150 Hz durant les essais à 500 mm/min.

4.2 Résultats

Les résultats de la caractérisation uniaxiale réalisée sur les structures tri-hexagonales cylindriques et cubiques obtenues par LMD-P sont présentés sur la figure 5, et les résultats de celles obtenues par SLM, sur la figure 6.

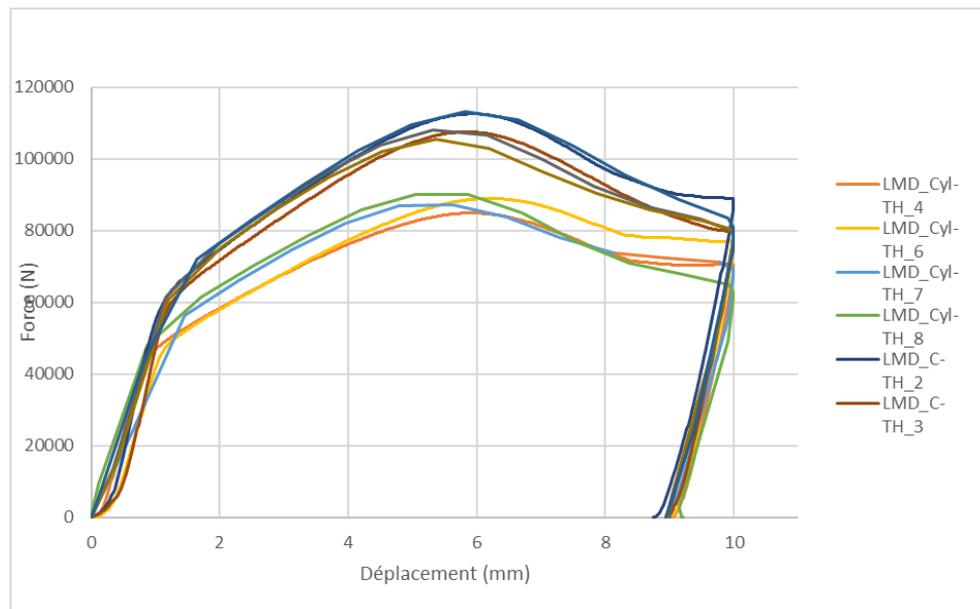


Figure 7 : Comportement en compression uniaxiale de structures architecturées tri-hexagonales en acier obtenues par LMD-P

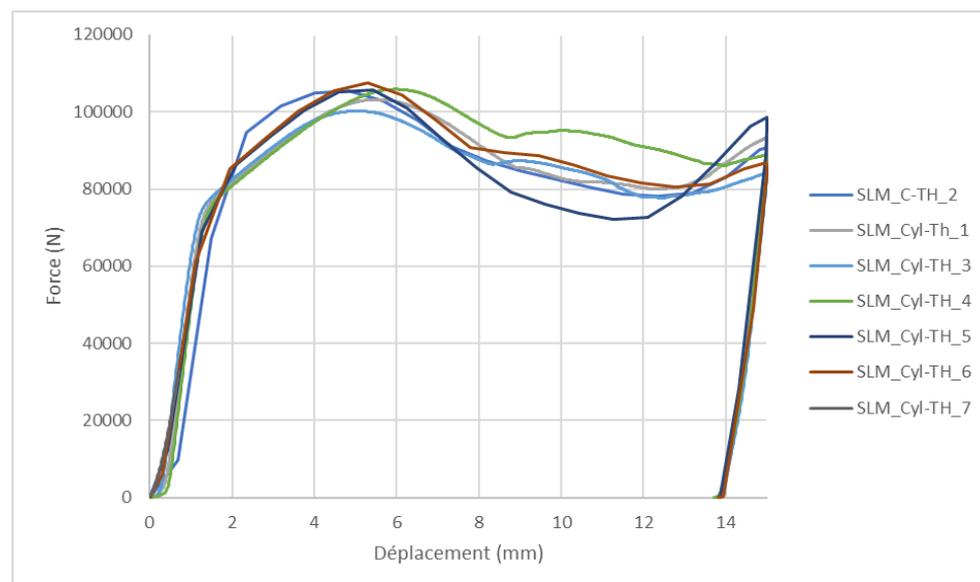


Figure 8 : Comportement en compression uniaxiale de structures architecturées tri-hexagonales en acier obtenues par SLM

On retrouve le comportement classique d'un matériau cellulaire sous sollicitations de compression : pendant la phase de charge – pour les deux procédés de FA – on observe une région élastique linéaire, caractérisée par une pente linéaire, suivie d'un plateau plastique caractérisé par une ondulation, puis d'une région de densification caractérisée par l'effondrement des cellules de la structure.

Avec les images capturées au cours de l'essai, la déformation de la structure pour différents déplacements imposés par la traverse de la machine est observée sur la figure 7.

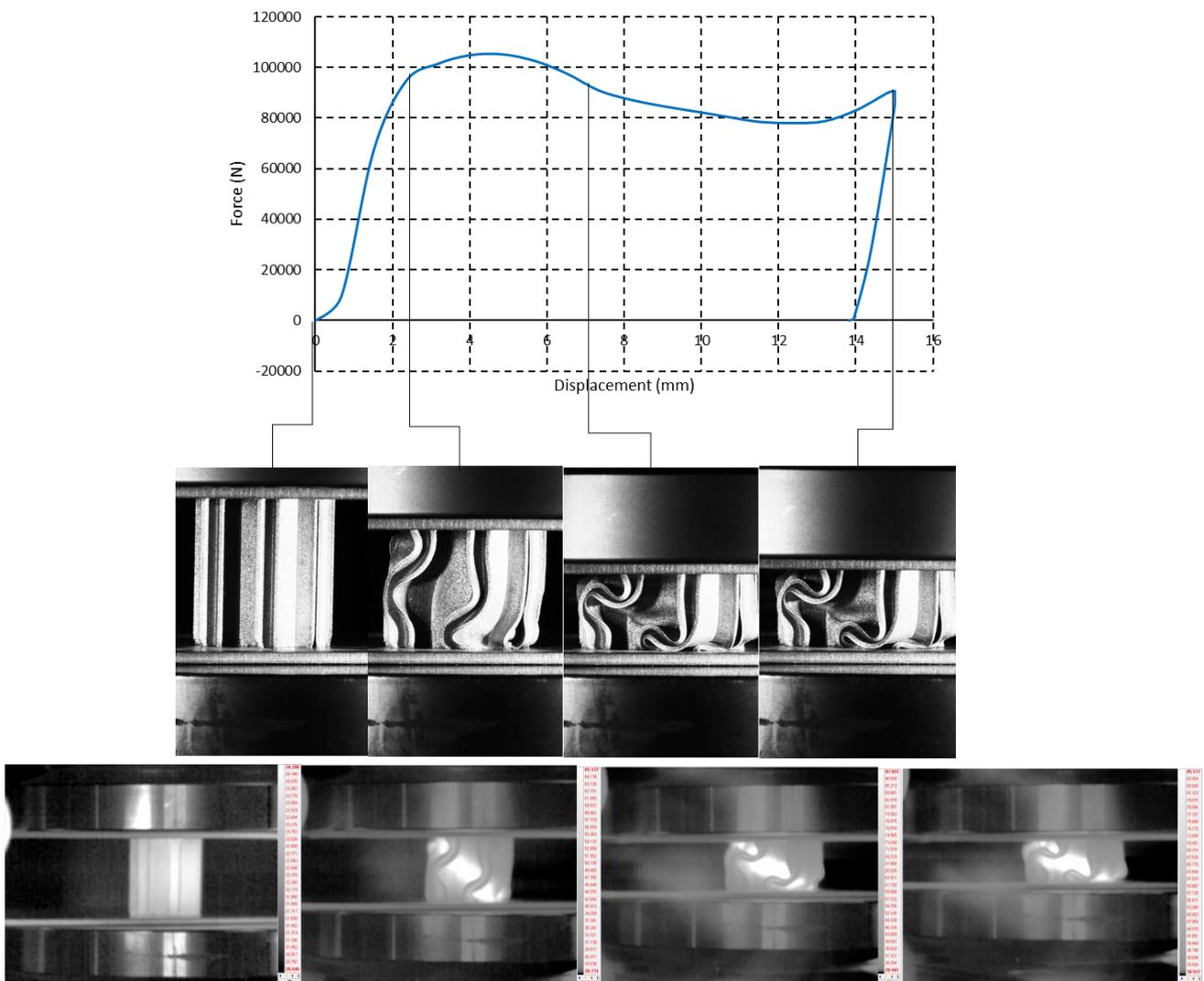


Figure 9 : Comportement en compression uniaxiale d'une structure architecturée tri-hexagonale par SLM à une vitesse de 500 mm/min

Le phénomène de flambement des parois de la structure, caractérisé par l'ondulation sur la courbe de compression, est visible sur la figure 7. La structure présente un comportement élasto-plastique - comme défini par Gibson & Ashby (1997) - c'est-à-dire, que l'effondrement des cellules est dû au flambement plastique des parois. Dans ce cas, le matériau est endommagé de manière permanente. Le flambement observé induit une plasticité locale et témoigne de la qualité de la pièce qui présente peu de porosités dans la microstructure qui auraient pu initier des fissurations. La température locale est quantifiée par la caméra thermique au cours des essais à 500 mm/min et atteint une température maximale de 100°C.

Comparé aux mousses (matériaux stochastiques), les matériaux architecturés présentent une résistance plus élevée. Cela est dû au fait qu'au cours de la déformation, les parois des mousses se tordent alors que celles qui composent les matériaux architecturés s'étirent et se compriment [1, 3]. Les matériaux architecturés se comportent de façon similaire aux mousses à cellules ouvertes, les rendant particulièrement adapté pour des applications d'absorption d'énergie. L'énergie absorbée pour ce type de matériaux peut être calculée à partir de l'aire sous la courbe force déplacement [1].

Par la suite, pour modéliser des problématiques d'impact, il est nécessaire d'identifier le comportement dynamique des matériaux cellulaires. Les problématiques dynamiques correspondent aux phénomènes durant lesquels les vitesses de déformation engendrées sont grandes. L'identification du comportement de nos structures à de grandes vitesses de déformations sera réalisée par des techniques de barres d'Hopkinson. Le dispositif classique comprend un projectile, deux barres entre lesquelles sont placées l'échantillon, et éventuellement, un piègeur d'onde. Au cours de l'essai, le projectile impacte l'extrémité d'une barre et génère donc une onde de compression. L'onde incidente est guidée le long de la barre et rencontre l'interface de l'échantillon testé. Une partie de cette onde est transmise dans l'échantillon, et l'autre partie est réfléchiée dans la barre d'entrée. La réverbération répétée de l'onde dans l'échantillon testé génère le chargement dynamique. La vitesse de sollicitation dépend de la vitesse de propagation de l'onde dans le dispositif, des vitesses particulièrement élevées sont atteignables.

5 Conclusions et perspectives

Le comportement des matériaux architecturés dépend des caractéristiques intrinsèques au matériau telles que, la réponse du matériau constitutif, la densité du matériau, le motif de la structure, la microstructure et les paramètres de sollicitation qui peuvent être la déformation, le mode de sollicitation... Une première étape de caractérisation macroscopique du comportement du matériau architecturé a été menée à travers des essais de compression quasi-statique. Le comportement typique en compression des matériaux cellulaires a été mis en évidence. Pour la suite des travaux, une seconde étape de caractérisation macroscopique du comportement du matériau architecturé sera réalisée à travers des essais dynamiques à de grandes vitesses de déformations. Ces essais seront réalisés avec des barres d'Hopkinson. La suite des travaux se concentrera sur également sur la dégradation des propriétés macroscopique lors de la fabrication de pièces par LMD-P, dans le but de cibler un comportement mécanique et notamment de dissiper de l'énergie.

Références

- [1] Gibson, L. & Ashby, M., 1997. Cellular solids Structures and properties. 2e éd. s.l.:Cambridge University Press.
- [2] Benedetti, M. et al. (2021) 'Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication', Materials Science and Engineering R: Reports. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.mser.2021.100606.
- [3] Ashby, M. (2013) 'Designing architected materials', Scripta Materialia, 68(1), pp. 4–7. doi:10.1016/j.scriptamat.2012.04.033.
- [4] ADDISPACE (2017) DIAGNOSIS AND STUDY OF OPPORTUNITIES OF METALLIC ADDITIVE MANUFACTURING ON SUDOE AEROSPATIAL SECTOR. Available at: www.addispace.eu.
- [5] Costa, L. & Vilar, R., 2009. Laser powder deposition. Rapid Prototyp., 15(4), pp. 264-279.
- [6] Liverani, E. et al. (2017) 'Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel', Journal of Materials Processing Technology, 249, pp. 255–263. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042.
- [7] Barkia, B. et al. (2020) 'On the origin of the high tensile strength and ductility of additively manufactured 316L stainless steel: Multiscale investigation', Journal of Materials Science and Technology, 41, pp. 209–218. doi:10.1016/j.jmst.2019.09.017.
- [8] Godec, M. et al. (2020) 'Quantitative multiscale correlative microstructure analysis of additive manufacturing of stainless steel 316L processed by selective laser melting', Materials Characterization, 160(December 2019). doi:10.1016/j.matchar.2019.110074.

- [9] Ma, M. et al. (2013) ‘Control of shape and performance for direct laser fabrication of precision large-scale metal parts with 316L Stainless Steel’, *Optics and Laser Technology*, 45(1), pp. 209–216. doi:10.1016/j.optlastec.2012.07.002.
- [10] Saboori, A. et al. (2020) ‘Microstructure and mechanical properties of AISI 316L produced by directed energy deposition-based additive manufacturing: A review’, *Applied Sciences (Switzerland)*. MDPI AG. doi:10.3390/app10093310.
- [11] Donnard, A. (2018) Etude du comportement mécanique multiaxial de matériaux cellulaires. Available at: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01883415>.
- [12] Viot, P. (2010) ‘Comportement des matériaux cellulaires sous sollicitations dynamiques. Partie 1: Approche macroscopique’, *Mécanique et Industries*, 11(1), pp. 1–23. doi:10.1051/meca/2010012.