

Soutenance de thèse

Philippe GUY soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'Institut Clément Ader et intitulée « *Contribution à l'étude et la caractérisation des propriétés mécaniques de structures lattices métalliques obtenues par Fabrication Additive (procédé SLM)* »

Le 27 janvier 2025 à 14h00,

Salle Clément Ader Espace Clément Ader - Toulouse

devant le jury composé de

M. Guilhem MICHON	ISAE-SUPAERO	Directeur de thèse
M. François LOUF	École Normale Supérieure Paris-Saclay	Rapporteur
M. Olivier DORIVAL	Université Toulouse III Paul Sabatier	Co-directeur de thèse
M. Yann QUINSAT	École Normale Supérieure Paris-Saclay	Rapporteur
Mme Sandra GUÉRARD	Dassault Aviation	
M. Vincent PATELOUP	Université de Limoges	

Résumé : La fabrication additive s'est beaucoup développée ces dernières années dans l'industrie, notamment dans le secteur spatial. Cette technologie permet de concevoir et de fabriquer des pièces de géométrie complexe souvent impossible à obtenir par les procédés conventionnels. C'est le cas en particulier des structures lattices qui restent à ce jour difficiles à dimensionner et qui sont encore délicates à maîtriser en matière de stabilité de fabrication. Cette thèse avait pour objectifs d'améliorer la compréhension et la prédiction du comportement mécanique des structures lattices, structures qui sont de plus en plus présentes dans les satellites. Des éprouvettes sandwichs avec âme lattice de type BCC ou Dode-Thin (DT) ont été mises à disposition par Thales Alenia Space – France. Ces éprouvettes en aluminium AS7G06 ou en titane TA6V ont été fabriquées par fusion laser sur lit de poudre. De nombreux essais statiques et dynamiques ont été réalisés ainsi que différents calculs prédictifs analytiques et numériques. Les propriétés mécaniques équivalentes de cellules parfaites sans défauts ont été déterminées par Éléments Finis (EF) et ont été comparées à la théorie des poutres. Un modèle théorique de la poutre DT a été particulièrement développé permettant de modéliser par EF les cellules DT comme un ensemble d'éléments poutres 1D ou un matériau homogénéisé équivalent. Les essais mécaniques ont permis de mesurer la rigidité des éprouvettes sandwichs. Des mesures complémentaires par microscopie optique, MEB et microtomographie RX ont permis de mesurer la géométrie réelle des sections des poutres. Les rigidités mesurées sont le plus souvent inférieures à celles prédites par calculs. Les écarts observés sont dus aux imperfections géométriques des poutres réellement fabriquées, à la présence de porosités internes et aussi au fait que les matériaux imprimés ont des propriétés moindres que celles des matériaux de fonderie, notamment des modules de Young plus faibles. Un outil informatique de post-traitement des images de la tomographie a été développé pour quantifier les différences de rigidité et de masse et les comparer aux valeurs nominales. Les modèles mis à jour suite à ces observations ont conduit à une nette amélioration de la corrélation entre essais et calculs. À l'issue de ces travaux, les ingénieurs et les chercheurs bénéficient maintenant de méthodes et de formules permettant de modéliser simplement des structures BCC et Dode-Thin. Grâce aux nombreuses mesures et observations expérimentales, ces travaux ont aussi contribué à une meilleure compréhension du comportement des structures lattices. D'autres axes de recherche peuvent être envisagés pour continuer à développer et à améliorer leur dimensionnement. Il faudrait

continuer à étudier l'influence de la non rectitude des fibres moyennes et du désalignement des nœuds d'intersection. Il serait aussi intéressant de réaliser des mesures et essais supplémentaires pour observer la qualité de fabrication actuelle. Le développement d'outils informatiques de traitement des images de tomographie RX rend possible la création de modèles EF 3D représentatifs de la géométrie réelle des poutres fabriquées et aussi la construction à terme de jumeaux numériques en s'appuyant sur l'intelligence artificielle.

Mots-clés : Structures lattices, Propriétés mécaniques, Théorie des poutres, Fabrication Additive, Essais mécaniques, Matériau équivalent

Summary: Additive manufacturing technology has created new possibilities in design for aerospace components, particularly using lattice structures. The industrial challenge remains to size these structures within a reasonable lead time. This research aimed to improve the understanding and prediction of the mechanical performance of lattice structures that are increasingly used in spacecraft components.

Thales Alenia Space – France provided lattice core sandwich beams manufactured by the powder bed laser beam melting process. The mechanical properties of two types of cell, BCC and Dode-Thin, were investigated for two metal alloys, AS7G06 aluminium and TA6V titanium. We performed a number of static and vibration tests and predicted the mechanical behaviour of the specimens using both analytical and numerical calculations. Various Finite Element (FE) models were developed to calculate the effective mechanical properties of a defect-free structure and compared with the beam theory. In particular, we established a theory of cross-sectional properties for the specific Dode-Thin strut. This allowed the Dode-Thin lattice cell to be modelled as a set of 1D beam elements or an equivalent 3D-orthotropic homogenised material. Tests were also carried out to measure the stiffness of the sandwich beams. Optical and SEM observations and X-ray computed tomography (CT) determined the actual cross-sectional properties of the struts. The experiments in this study generally showed that theoretical and numerical predictions significantly overestimated the stiffnesses. Porosity rate and geometrical imperfections were the main causes of the discrepancy between the prediction and the as-built parts. In addition, the 3D-printed materials exhibited a lower Young's modulus. An in-house code was developed to calculate the cross-sectional properties directly from the CT data and compare them with the nominal properties. These observations and results helped to explain the differences in stiffness and mass and were used to update the predictive models, resulting in a better correlation with the experimental results for static and dynamic behaviour. Finally, this study provided the engineer with a simple method for replacing BCC and Dode-Thin cells with equivalent beams of solid circular cross-section, or with homogenised mechanical properties. This study also deepened the knowledge of the as-built lattice structures and their mechanical behaviour.

Further research should explore the effect of strut waviness and the misalignment of the junction centres. Additional tests with other samples manufactured more recently and benefiting from developments in the SLM technique could be conducted. The in-house code we have started to develop for post-processing digital CT images could be enhanced with new functions. We could envisage the construction of a full FE tetrahedral volumetric mesh capturing the geometric imperfections of each strut. This could make it possible to identify the true effective stiffness of the strut geometry. This approach could pave the way for the creation of a digital twin consisting of a FE lattice model constructed directly from CT data.

Keywords: Lattice Structures, Mechanical Properties, Beam Theory, Additive Manufacturing, Mechanical Testing, Equivalent Material Mode