

COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE MATÉRIAUX ARCHITECTURÉS HYBRIDES

Albertini Frédéric ^a, J. Dirrenberger ^a, C. Sollogoub ^a, A. Molotnikov ^b

^a Arts&Métiers/CNAM/CNRS, Paris, France. Contact : frederic.albertini@ensam.eu ;

^bDMSE Monash University, Clayton, Victoria 3800 Australia

Mots-clés : Matériaux Architecturés, Hybrides, Lattices, Fabrication Additive (FA).

Résumé

Afin de corriger les conséquences sur les propriétés mécaniques de l'importante rugosité de surface des structures imprimées par fabrication additive (FA) une stratégie d'hybridation de structure est développée. L'hybridation désigne l'association de matériaux aux propriétés mécaniques très différentes. Cette étude est centrée sur l'étude des propriétés mécaniques de matériaux architecturés hybrides, constitués d'une structure rigide dont les vides sont comblés par un polymère mou. Dans un premier temps, une comparaison numérique par éléments finis (EF) a permis de choisir les structures lattices les plus performantes à hybrider. Les structures ont par la suite été réalisées via un procédé de FA, avec et sans remplissage. Enfin, une comparaison expérimentale a été menée afin de comparer les propriétés mécaniques des structures à celles des hybrides correspondants.

1 Introduction

Les matériaux architecturés sont une classe émergente de matériaux qui permettent de nouvelles possibilités en termes de propriétés fonctionnelles, repoussant les limites des cartes de performances des matériaux d'Ashby [1].

Le terme matériaux architecturés englobe tout matériau hétérogène conçu de manière réfléchi, de sorte que certaines de ses propriétés matérielles soient améliorées par rapport la celles de ses constituants, du fait d'effets structurels et composites, qui dépendent de l'arrangement topologique relatif entre chacun des constituants.

Le développement des méthodes de fabrication dites additives a permis de dynamiser leur développement, rendant possible la fabrication de pièces jusqu'alors irréalisables par les moyens de fabrication conventionnels.

Cependant, les moyens de FA métalliques produisent des pièces dont l'importante rugosité de surface réduit considérablement les propriétés mécaniques, notamment la tenue en fatigue.

C'est dans l'objectif de corriger ces défauts de surface qu'une stratégie d'hybridation par ajout de polymère dans la structure a été développée, appliqué ici à la fabrication de structures lattice.

2 Rugosité de surface des procédés de FA

Il existe de nombreux types de procédés de fabrication additive pour matériaux métalliques. Les plus utilisés sont les procédés par fusion de poudre : un lit de poudre métallique est localement fondu par un laser, permettant de générer un volume couche par couche.

Cependant, les grains de poudre se trouvant en périphérie de la zone fondue peuvent se trouver seulement partiellement fondus, s'agglutinant sur la face extérieure de la pièce imprimée. La surface extérieure de la pièce présente alors une importante rugosité de surface résultant de l'agglomération de grains semi-fondus :



FIGURE 1 – μ CT Reconstruction - $3\mu\text{m}$ voxel, scale : 5mm unit cell, $1000\mu\text{m}$ strut, Adhered particles : $10\text{-}60\mu\text{m}$

Cette rugosité de surface dépend du procédé utilisée, Vayre et al [3] montrent un Ra de 11 μm pour le procédé SLM, et entre 25 et 35 μm pour le procédé EBM. Elle s'accompagne d'une dégradation des propriétés mécaniques, notamment de la tenue en fatigue, cette rugosité étant propice à l'amorce de fissures (Hrabe et al [4]). Afin de corriger ses défauts de surface, de multiples solutions sont possibles. Ici une stratégie d'hybridation est explorée.

3 Hybridation de lattices

L'hybridation consiste à associer des matériaux aux propriétés très différentes. C'est une stratégie que l'on retrouve en de nombreux exemples dans la nature [5]. Nous envisageons ici cette stratégie afin de compenser les défauts de surface d'une structure réalisée par fabrication additive.

L'hybridation consiste ici à combler le vide de la structure par l'ajout d'une phase molle, notre choix s'étant porté sur un polymère de type élastomère :

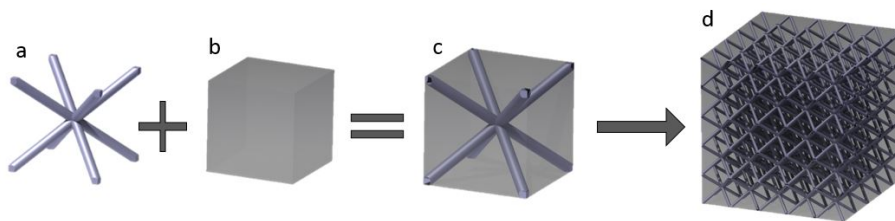


FIGURE 2 – (a) Cellule unitaire rigide (métallique); (b) Phase molle (élastomère); (c) Cellule hybride; (d) Structure hybride

Les avantages attendus de l'hybridation sont les suivants : remplir les défauts de surfaces liés au procédé de FA, retarder le flambage des poutres de la structure et ainsi la rupture, ajout d'un comportement dissipatif par la présence de l'élastomère.

Cependant, la fabrication ainsi que la simulation du comportement de tels matériaux constituent un challenge.

4 Choix de la géométrie

Afin de tirer au maximum partie de l'hybridation, le choix de la géométrie du lattice est prépondérante. Ainsi, pour choisir parmi les lattices existants celui qui maximisera l'effet de l'hybridation, une comparaison basée sur des simulations numériques par EF a été effectuée.

Les simulations sont faites sur des cellules unitaires, par l'application d'un déplacement imposé (en compression) ainsi que l'application de conditions aux limites périodiques (PBC).

La comparaison est faite entre le module d'Young et la limite d'élasticité des structures par rapport aux hybrides correspondants. Les matériaux considérés sont un alliage TA6V pour la structure, et du Polyuréthane pour la matrice.

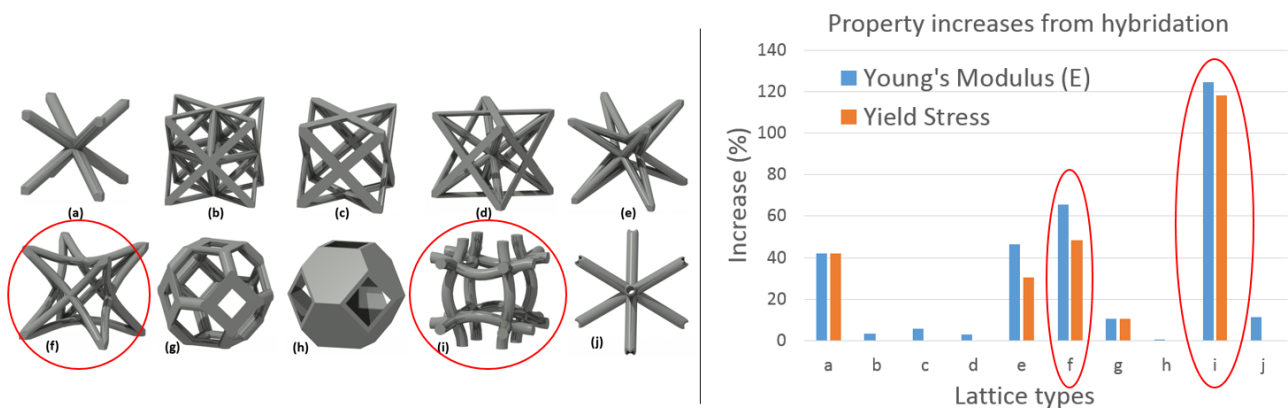


FIGURE 3 – A gauche, les cellules unitaires comparées. A droite, l'augmentation (en pourcent) des propriétés mécaniques, résultants de l'hybridation

Les cellules Hexaround et Re-entrant [6] ont montrées les plus fortes augmentation de propriétés mécaniques par hybridation. Elles ont donc été sélectionnées pour une étude expérimentale.

5 Comparaison expérimentale des propriétés mécaniques

Les structures lattices et hybrides constituées des géométries sélectionnées précédemment ont alors été imprimées via une imprimante 3D Connex Objet500, en 4 exemplaires pour chacun d'entre eux. Les matériaux utilisés sont le VeroWhite (photopolymère rigide, blanc) pour la structure, et le TangoBlack+ (photopolymère souple, noir) pour la matrice.

Dimensions des éprouvettes : 15*15*15 mm, 5 cellules/côté (1 cellule : 3*3*3mm).

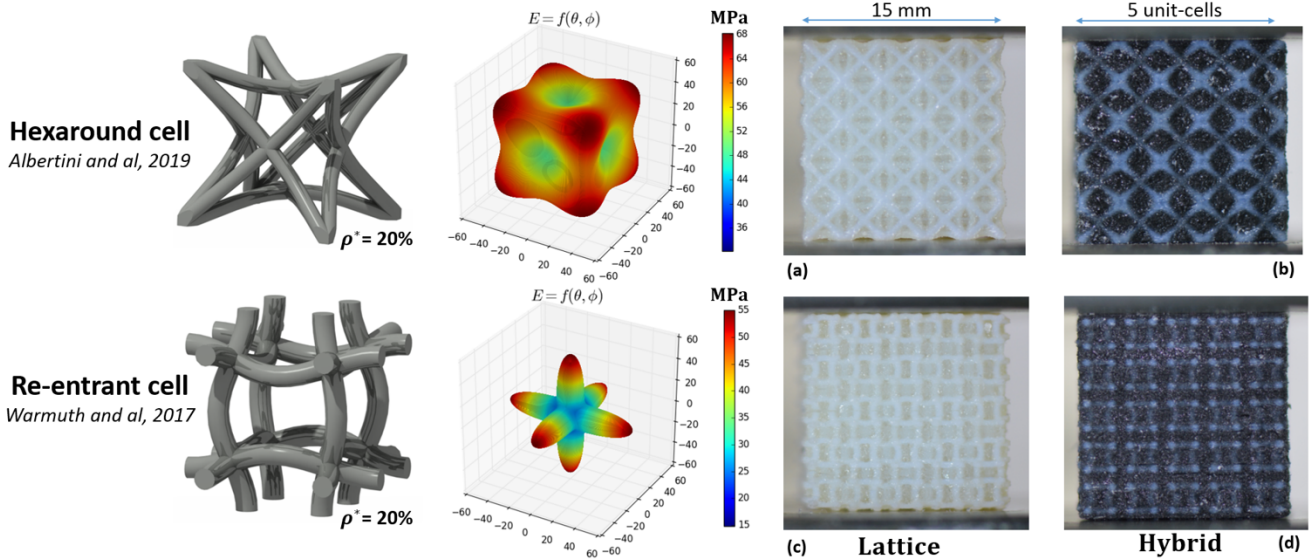


FIGURE 4 – (a) Hexaround lattice ; (b) Hexaround hybride ; (c) Re-entrant lattice ; (d) Re-entrant hybride

Ces structures ont alors été testées mécaniquement en compression, afin de comparer leurs propriétés mécaniques. Afin de comparer le lattice et l'hybride à une masse équivalente, la contrainte issue de la compression de l'hybride a été normalisée :

$$\sigma_{Normalized} = \frac{\sigma_{Hybrid}}{R} \quad \text{avec} \quad R = \frac{f_{matrix} * \rho_{matrix} + f_{lattice} * \rho_{lattice}}{f_{lattice} * \rho_{lattice}} \quad (1)$$

Dans notre cas :

$$f_{lattice} = 0.2 ; f_{matrix} = 0.8 \text{ et } \rho_{matrix} = 1.15 \text{gr/cm}^3 ; \rho_{lattice} = 1.17 \text{gr/cm}^3$$

$$\text{Ainsi, } R = 4.9 \text{ et } \sigma_{Normalized} = \frac{\sigma_{Hybrid}}{4.9}$$

On peut alors comparer la réponse mécanique pour chaque cellule :

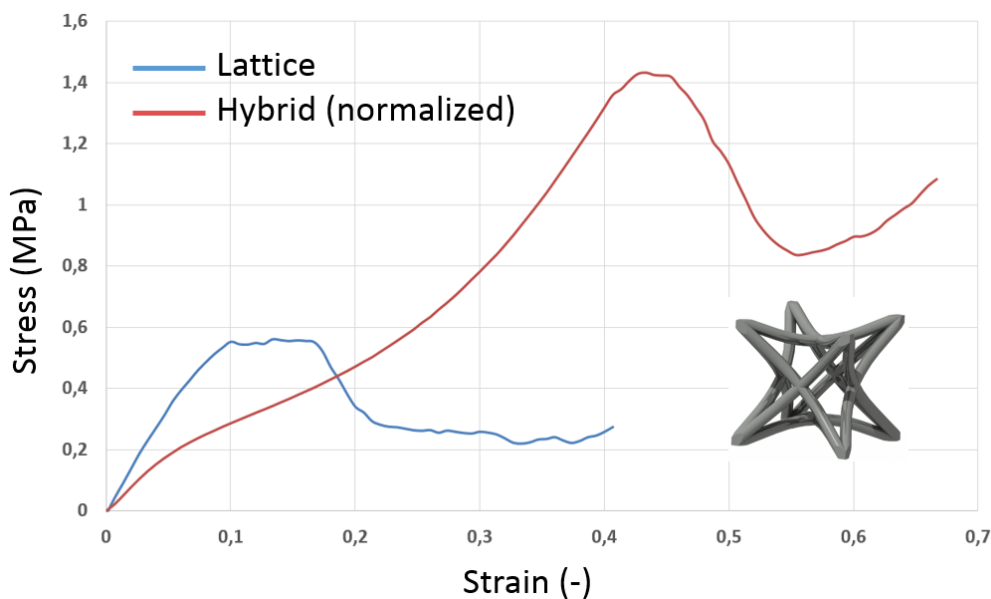


FIGURE 5 – Courbes Contrainte / déformation, cellule Hexaround

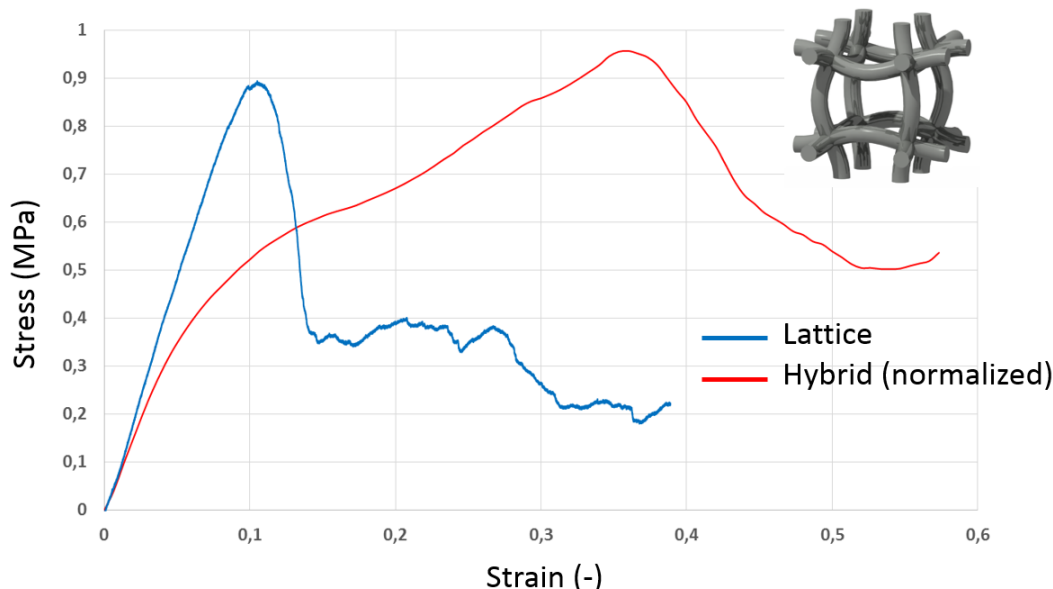


FIGURE 6 – Courbes Contrainte / déformation, cellule Re-entrant [6]

Ces essais ont permis de constater les phénomènes suivants :

L'hybridation retarde de manière importante la rupture de la structure (entre 30 et 35 % en déformation). L'énergie dissipée à la rupture est ainsi augmentée de plus de 300%.

Dans le cas de l'Hexaround, la contrainte à la rupture est également multipliée par 2.5 (contraintes normalisées).

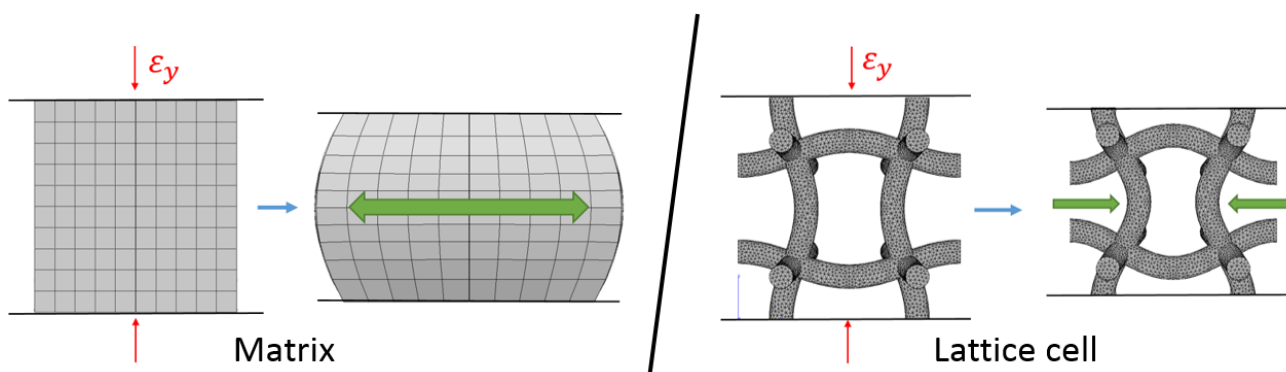
Un phénomène de transfert de charge entre la structure et la matrice a lieu pendant le chargement, expliquant le retardement de la rupture. L'augmentation de certaines propriétés mécaniques pourrait également s'expliquer par un phénomène de confinement de l'élastomère.

6 Phénomène de confinement

Les cellules Hexaround et Re-entrant possèdent toutes deux des coefficients de Poisson négatifs dans certaines directions de l'espace (on parle d'auxétisme : $\nu < 0$).

A l'inverse, l'élastomère possède un coefficient largement positif, proche de l'incompressibilité ($\nu \simeq 0.5$).

La structure et la matrice entre ainsi en opposition lors de leur déformation en compression :



Cette opposition de comportement provoque le confinement de l'élastomère, et permettrait d'expliquer l'augmentation de certaines propriétés mécaniques (contrainte à la rupture, retardement de la rupture, ...).

7 Conclusion

Les résultats expérimentaux montrent une synergie des effets d'architecture et d'hybridation, provoquant une modification importante du comportement mécanique des structures.

L'hybridation permet alors de retarder la rupture des structures, augmentant la dissipation d'énergie à la rupture, mais aussi la contrainte à rupture pour certaines géométries.

L'étude expérimentale sera bientôt transposée à l'hybridation de structure fabriquée par procédé SLM.

Références

- [1] M.F Ashby, L.J Gibson. *Cellular solids : structure and properties* , 1999.
- [2] M.F Ashby. *Materials selection in mechanical design* Butterworth-Heinemann, Oxford, 2011.
- [3] B. Vayre, F. Vignat, F. Villeneuve. *Metallic additive manufacturing state of the art review and prospects* *Mechanics & Industry*, p.89-96, 2012.
- [4] N.W Hrabe, P. Heintz, B. Flinn, C. Korner, R.J Bordia. *Compression-compression fatigue of selective electron beam melted cellular titanium (Ti6Al4V)* *Journal of Biomedical Materials Research Part B : Applied Biomaterials*, 2011.
- [5] U.G.K Wegst, H. Bai, E. Saiz, A.P Tomsia, R.O Ritchie. *Bio-inspired structural materials* *Nature materials*, 2015.
- [6] F. Warmuth, F. Osmanlic, L. Adler, M.A Lodes, C. Korner *Fabrication and characterisation of a fully auxetic 3D lattice structure via selective electron beam melting* *Smart Materials and Structures*, 2017.