

Développement de matériaux cellulaires avec mise en œuvre par fabrication additive bimatière

**H. RAMEZANI DANA^a, M. BEN AZZOUNA^b, T. BRETEAU^c,
L. DELBREILH^d, A. GUILLET^e, F. BARBE^f,**

Normandie Univ, INSA Rouen, UNIROUEN, CNRS, GPM, 76000 Rouen, France

a. hossein.ramezani-dana@insa-rouen.fr

b. mouldi.ben-azzouna@insa-rouen.fr

c. thomas.breteau@insa-rouen.fr

d. laurent.delbreilh@univ-rouen.fr

e. alain.guillet@insa-rouen.fr

f. fabrice.barbe@insa-rouen.fr

Résumé :

Cette étude concerne l'analyse des propriétés mécaniques de pièces obtenues par Fabrication Additive Polymères (FAP). Utilisées traditionnellement pour des opérations de prototypage rapide, l'intégration de pièces FAP dans un cadre fonctionnel reste peu courante en comparaison aux pièces élaborées par injection sous pression, car leurs propriétés sont mal connues et souvent dégradées. Une nouvelle technologie exclusive de FAP a été intégrée dans la machine Freeformer-Arburg [1], qui consiste à construire la pièce par dépôt de gouttelettes de polymère extrudé. Cette étude porte d'une part, sur la caractérisation mécanique de pièces polymères thermoplastiques en acrylonitrile butadiène styrène (ABS) obtenues par fabrication additive Freeformer en fonction de différents paramètres de fabrication (tels que la trajectoire de dépôt de matière), et d'autre part, sur la comparaison de ces résultats avec les propriétés mécaniques de pièces obtenues par moulage par injection. La caractérisation mécanique en traction uniaxiale d'éprouvettes obtenues par les deux procédés a été réalisée. Des analyses microstructurales ont été effectuées afin de mieux comprendre la relation entre le procédé de fabrication et les propriétés mécaniques finales du matériau. Enfin, l'étude de matériaux architecturés a été abordée dans le but d'optimiser leurs propriétés mécaniques effectives. Cette partie sera complétée dans un deuxième temps, en abordant notamment l'aspect bimatière.

Abstract:

The present study relates to the Polymers Additive Manufacturing (PAM), traditionally used for rapid prototyping operations. The use of PAM components as functional parts is still marginal compared to injection molded components. This is related to the degradation of their mechanical properties and the relatively poor knowledge on the PAM products. An exclusive new technology of additive manufacturing was integrated in the Freeformer-Arburg machine [1]. It was inspired from injection molding technology and creates plastic parts using layers built up from tiny droplets of plastic. In this work, the mechanical characterization of thermoplastic polymer parts obtained by Freeformer PAM is

studied. The mechanical properties are evaluated via uniaxial tensile tests by varying some manufacturing parameters such as the printing path. Then, the mechanical properties of both PAM and molded samples are discussed. Microstructural analyses were performed to better understand the relationship between the manufacturing process and the final mechanical properties. Eventually, a first step about architected materials is addressed, with the aim of optimizing their mechanical properties. This part will be completed by addressing the bimaterial aspect of the study.

Mots clefs: Fabrication additive polymère, caractérisation mécanique, matériaux architecturés, optimisation

1 Introduction

La fabrication additive ou impression 3D polymères est un procédé de fabrication apparu depuis trois décennies, initialement pour des opérations de prototypage rapide. Ce procédé prend de l'ampleur depuis quelques années au vu des nombreux avantages qu'il offre, notamment en termes de complexité géométrique des pièces produites, permettant de diminuer le nombre des composants et des assemblages, la possibilité de produire des géométries difficiles voire impossibles à produire avec des procédés plus classiques. Cela ouvre de nouvelles voies dans la conception des matériaux et des structures, et rend le couplage avec les outils d'optimisation très pertinent. La compréhension de ce ou ces procédés est alors primordiale lorsqu'il est question de produire des pièces fonctionnelles [2]. En effet, il est essentiel de connaître la qualité des pièces produites et de comprendre l'impact du procédé sur les propriétés finales. Une panoplie de techniques de fabrication additive existe aujourd'hui. Il s'agit de problèmes multi physiques qui peuvent être très différents d'une technique à l'autre, ce qui nécessite un choix de technique et une appréhension du procédé mis en jeu. Parmi les techniques existantes on peut citer la stéréolithographie (SLA) [3], le frittage laser sélectif (SLS) [4] et le dépôt de matière fondue (FDM) [5]. Une nouvelle technique relevant de la fabrication additive par dépôt de matière fondue a été intégrée dans la machine *Freeformer-Arburg* [1]. Elle consiste à construire la pièce par dépôt de gouttelettes de polymère extrudé. Communément appelée « Arburg Plastic Freeforming » (APF), cette technique est principalement orientée R&D, et vise des applications diverses (médicales, automobiles, etc). Cette première étude vise à évaluer la technique APF sur la base des propriétés mécaniques de pièces en ABS, matériau considéré comme « qualifié » pour la technique. La caractérisation des pièces en ABS a été réalisée en variant la trajectoire de dépôt des couches de polymère. Les propriétés mécaniques de pièces obtenues par APF sont comparées à celles obtenues par moulage par injection, considérée comme technique de référence dans cette étude. La caractérisation mécanique des éprouvettes élaborées a été réalisée à travers des essais de traction quasi-statique. L'étude des matériaux auxétiques a été aussi abordée afin d'optimiser leurs propriétés mécaniques effectives. A noter que cette étude est une étape préliminaire dans le but de développer la fabrication de structures architecturées cellulaires bimatière. En complément, des observations microstructurales permettent d'évaluer la morphologie des pièces et d'appréhender la relation entre le procédé d'élaboration et les propriétés mécaniques finales des pièces.

2 Description du procédé APF

Le procédé APF s'inspire du moulage par injection et est constitué d'une vis qui conduit le matériau utilisé sous formes de granulés du trémie jusqu'à la buse d'injection (Figure 1). Les granulés sont alors graduellement chauffés jusqu'à atteindre la température la plus élevée en bout de vis. La fusion des

granulés résulte de l'action combinée de l'énergie thermique dégagée par le chauffage du fourreau et de l'énergie mécanique résultant du frottement visqueux généré par la rotation de la vis. Un piézo-actionneur permet d'injecter les gouttelettes de polymère à une fréquence donnée. L'épaisseur de couche, directement liée au diamètre de la goutte obtenue, dépend aussi du diamètre de la buse d'injection utilisée. Dans cette étude, les buses utilisées ont un diamètre de 0,15 mm. Avec les paramètres de fabrication choisis, les couches déposées ont une épaisseur de 0,21 mm.

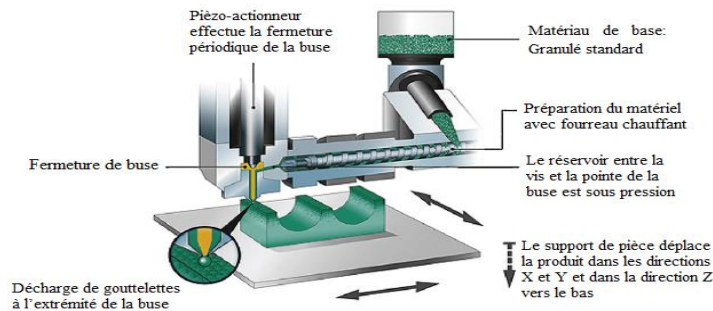


Figure 1 : Schéma explicatif du procédé APF (d'après Arburg)

En sortie de buse, un chapelet de matière est déposé sous la forme d'un filament et est constitué de gouttes adjacentes de polymère. Le procédé tient compte du diamètre des gouttes pour définir la densité de remplissage préalablement choisie (inférieure ou égale à 100%) et donc l'espacement entre les gouttes. Comme dans tous les procédés de fabrication additive, la chaîne de fabrication APF commence par un fichier CAO préalablement tranché en une succession de couches (généralement au format .stl). Ce fichier permet d'imprimer la pièce couche par couche. L'utilisation de matériaux sous forme de granulés constitue ici un grand avantage car élargit le panel des matériaux utilisables. Parmi les spécificités de la machine utilisée, la présence de deux buses de dépôt indépendantes, permettant de fabriquer des pièces bimatière. La fabrication de pièces bimatière nécessite de dédier la deuxième buse à un deuxième matériau faisant partie intégrante de la pièce finale. Cela permettrait de fabriquer des pièces avec différents gradients : de couleur et/ou de rigidité. Ces pièces devront être sans support ou avec des supports accessibles lors du post-traitement. Enfin, la pièce est fabriquée sur un plateau de dimensions 190x135 mm dans le plan de dépôt (X, Y). La hauteur des pièces selon Z est de 250 mm.

3 Caractérisation mécanique

3.1 Fabrication d'éprouvettes

Dans le cadre de cette étude, un matériau déjà qualifié pour l'APF a été choisi. Il s'agit d'un ABS commercialisé sous le nom Terluran GP-35. Ses principales caractéristiques sont énumérées dans Tableau 1. L'ABS est un polymère non cristallin qui est caractérisé par la présence de deux phases distinctes : une phase continue constituée de résine copolymère polystyrène/acrylonitrile (SAN), une phase constituée de nodules de polybutadiène greffé dispersés dans la matrice. La présence de nodules dans la matrice de SAN permet d'améliorer la résistance aux chocs. Dans l'optique d'une comparaison entre les procédés APF et moulage par injection, l'éprouvette de traction a été choisie en accord avec le moule à injecter à disposition. Il s'agit du type 1BA qui a été fabriquée selon les dimensions nominales de la norme ISO 527-2. L'éprouvette a été fabriquée avec les deux procédés : moulage par injection et APF. En fabrication additive, différentes orientations de couches ont été choisies.

Propriété	ABS
Densité	1.04 gr/cm ³
Module de traction	2.3 GPa
Température de ramollissement Vicat (VST)	95 °C
Température de transition vitreuse (Tg)	105 à 115 °C

Tableau 1 : Quelques propriétés de l'ABS Terluran GP-35 [6]

Ce paramètre est modifié via un logiciel dédié à la fabrication additive, et faisant l'interface entre les logiciels de CAO et la machine. Il permet notamment de définir les matériaux utilisés, les orientations des couches, les propriétés des gouttes déposées (diamètre, ratio largeur/hauteur mesuré), la densité de remplissage de la pièce, les facteurs d'expansion, etc. Ces paramètres doivent être mesurés et indiqués avec précision afin de s'approcher le plus possible du résultat voulu en termes densité de remplissage et d'épaisseur de couche. Les possibles erreurs dans ces paramètres se cumulent de couche en couche. Lorsqu'elles n'occasionnent pas un arrêt de fabrication, ces erreurs engendrent des pièces avec des défauts s'ajoutant à ceux du procédé lui-même et l'instabilité machine. Dans le but d'évaluer le procédé, il est primordial d'optimiser ces paramètres en amont. Seule l'orientation des couches a été changée dans cette étude. Aussi, toutes les éprouvettes en ABS ont une densité de remplissage de 100 %, et ce afin d'être comparables aux éprouvettes obtenues par injection. Pour chaque orientation, sept éprouvettes ont été fabriquées.

3.2 Résultats et discussion

3.2.1 Effet de l'angle d'orientation des couches

Dans le cas des éprouvettes obtenues par fabrication additive, les couches ont été superposées en sélectionnant un certain angle d'orientation. Nous pouvons émettre l'hypothèse qu'au vu de cette disposition particulière des couches les unes par rapport aux autres, les propriétés mécaniques du matériau résultant seront différentes selon l'orientation choisie. Ces différences pourront être mises en exergue à travers des courbes de traction. On peut faire une analogie avec le comportement des composites stratifiés soumis à une contrainte imposée. Chaque pli d'un stratifié possède une orientation que l'on repère par l'angle formé entre la direction des fibres et une direction de référence liée à la structure et a une rigidité qui dépend de l'angle entre la direction des fibres et la direction des sollicitations. Carneiro et al. [7] proposent de faire une analogie entre le comportement des éprouvettes composites stratifiés et des éprouvettes obtenus par le technique dépôt de fil fondu afin d'évaluer influence de l'angle d'orientation sur les propriétés mécaniques. De manière similaire, nous allons évaluer l'influence de la conception d'éprouvettes en ABS dont les couches sont déposées suivant un seul angle (analogie au composite unidirectionnel) ou deux angles (analogie au composites stratifiés), sur les propriétés mécaniques. Cette analogie doit être considérée avec prudence. En effet, bien que l'on retrouve des points en commun entre les composites stratifiés et la fabrication couche par couche du Freeformer, les différences sont de taille. On fabrique ici des éprouvettes mono-matière, l'aspect composite est absent et il n'y aura pas un quelconque phénomène de décohésion fibre-matrice ou encore de délaminage. Seules les porosités, inhérentes à la fabrication additive, constituent des faiblesses au sein d'une couche ou encore entre deux couches successives, diminuant ainsi la densité du matériau. Dans le but d'identifier l'effet de l'angle d'orientation sur les propriétés mécaniques, nous avons comparé les propriétés mécaniques des échantillons élaborés avec les différentes orientations (0, 90, 45, +45/-45, +15/-15, +30/-30, +60/-60). Pour l'ensemble des éprouvettes fabriquées (Figure 2), le module est toujours inférieur à la valeur que l'on retrouve dans la littérature (qui est de 2,3 GPa) [6].

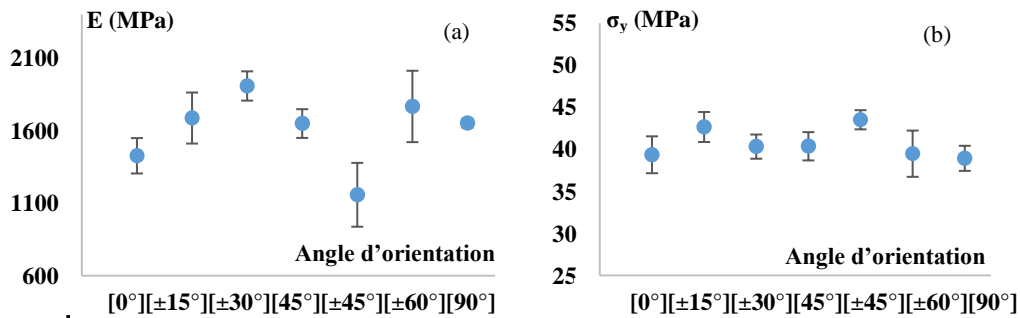


Figure 2. Propriétés mécaniques des échantillons élaborés par APF avec différentes orientations des couches (a) module d'élasticité E ; (b) limite d'élasticité σ_y

Cette baisse pourrait être attribuée à la présence de porosités dans les éprouvettes. La présence de porosités amène une fragilité et dégrade la tenue mécanique du matériau. La valeur la plus élevée pour le module d'Young est de 1910 MPa pour les couches orientées à +30°/- 30.

3.2.2 Comparaison avec le moulage par injection

La figure 3 représente l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation pour les éprouvettes en ABS réalisées par injection. Ces courbes présentent d'abord une partie linéaire entre 0 et 4% de déformation, puis un plateau avant d'observer la rupture.

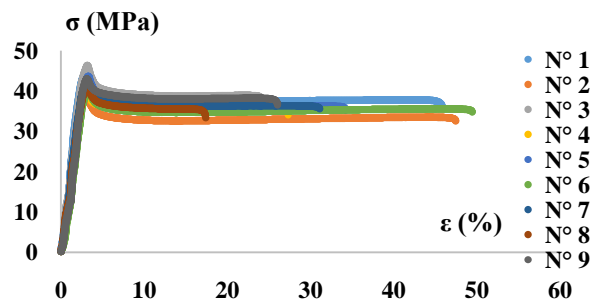


Figure 3 : le comportement mécanique pour les éprouvettes réalisées par injection.

Nous pouvons noter que la limite élastique est quasi-identique pour toutes les éprouvettes testées. En moyenne, elle s'élève à 42 MPa pour une déformation d'environ 3%. Nous pouvons néanmoins identifier des comportements différents vis-à-vis à l'allongement à la rupture. Ce dernier varie entre 20 % et 50 %. La valeur moyenne de l'élongation à rupture pour ces éprouvettes est égale à 33 ± 11 %. On peut en déduire que les éprouvettes qui rompent relativement tôt (typiquement à 20 % de déformation) comportent des défauts comme des impuretés. La valeur moyenne du module d'Young pour les éprouvettes élaborées par moulage par injection est égale à 1690 ± 140 MPa. A supposer que les éprouvettes réalisées en Fabrication Additive sont donc caractérisées par un taux de porosité plus ou moins marqué selon l'orientation des couches choisie, mais tout de même plus important que les éprouvettes réalisées en injection, elles seraient a priori plus fragiles. Afin de comparer les deux techniques de fabrication, nous avons considéré les éprouvettes réalisées en FA présentant les meilleures propriétés mécaniques, à savoir celles orientées à +30°/-30° (Figure 4). La valeur moyenne du module d'Young pour ces échantillons est de 1.9 GPa, valeur relativement proche de la théorie (2,3GPa). Les moyennes de la limite élastique et de l'allongement à la rupture pour ces échantillons sont respectivement de 40,32 MPa et 5,4%. A l'exception de cette dernière valeur, les résultats sont relativement proches de ceux que l'on retrouve dans la fiche technique de l'ABS La déformation à la

rupture est de 5% pour les éprouvettes réalisées en FA (donc la striction a lieu très tôt : il n'y a pas vraiment de striction avec l'ABS : on ne voit rien à l'œil nu du moins) contre 33,66% pour les éprouvettes moulées en injection. Ceci provient très probablement des porosités (plus ou moins importantes selon l'angle d'orientation des couches sélectionnées) au sein des échantillons ce qui accroît la fragilité.

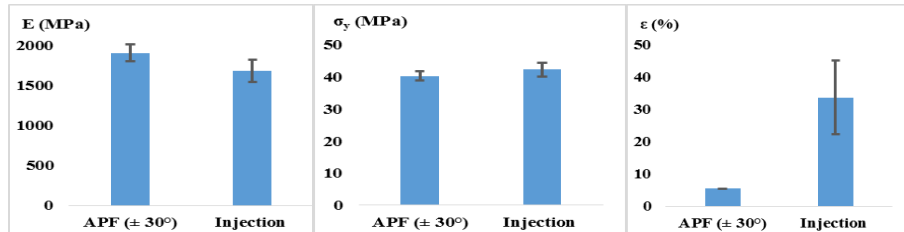


Figure 4 : Comparaison de propriétés mécaniques obtenues par deux techniques

3.2.3 Observations au MEB

Les faciès de rupture de plusieurs échantillons ont été observés avec un microscope électronique à balayage de type LEO-1530 XB. Les échantillons ont été préalablement métallisés à l'or.

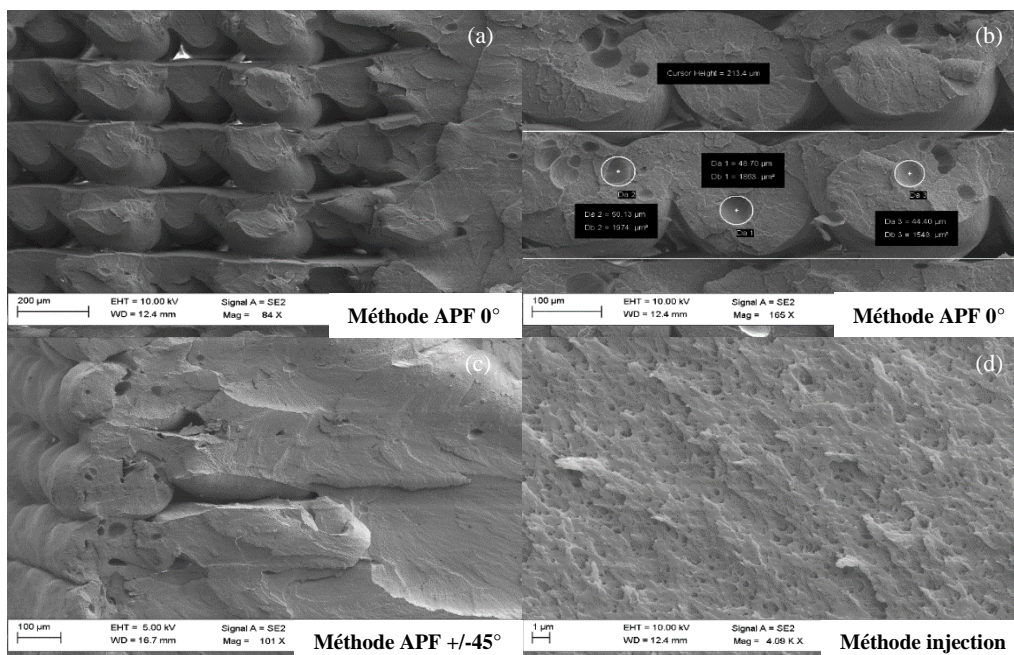


Figure 5 : Observations des faciès de rupture de différents échantillons testés. Les segments d'échelle représentés sur chaque figure correspondent respectivement à 200μm, 100μm, 100μm et 1μm.

La Figure 5 montre des porosités et des cavités dans un échantillon FA avec une orientation $+45^\circ$. Deux choses sont à noter : il existe des porosités au sein des gouttes et des cavités ou espacement intercouches (Figures 5-a,b); les chapelets déposés sont constitués d'une succession de gouttes (ici dans la tranche) et ne peuvent pas être assimilés à des fibres ou fils comme avec le procédé de dépôt de fil fondu (Figures 5-c). La figure 5-a montre un problème de diamètre de goutte : certaines gouttes ont un diamètre inférieur à la consigne, créant ainsi des cavités supplémentaires. Ceci serait dû à une instabilité machine. Par ailleurs, la Figure 5-d montre les porosités d'un échantillon obtenu en moulage

par injection. Comparée à la Figure 5-b, une grande différence en termes de taille de porosités est observée. Au final, les porosités sont visibles pour chaque orientation, qu'elles soient croisées (par exemple $+45^\circ/-45^\circ$) ou non ($90^\circ, 0^\circ, 45^\circ$).

4 Étude de structures auxétiques

On s'intéresse dans cette partie à l'étude de matériaux architecturés. Une première étude a simplement consisté à tester une structure dite auxétique obtenue par fabrication additive. Il sera question, dans un deuxième temps, d'optimiser une ou plusieurs structures architecturées en jouant sur les aspects bimatérial, paramètres de fabrication, topologie des cellules. Le terme «matériau architecturé» inclut toute structure conçue de manière réfléchie, de sorte que certaines de ses propriétés soient optimisées. Les exemples sont nombreux : composite fibreux et particuliers, matériaux cellulaires, structures sandwich, matériaux tissés et bien d'autres. La quasi-totalité des matériaux présente un coefficient de Poisson positif, cependant les matériaux présentant un effet de Poisson négatif, ont été réalisés depuis le milieu des années 1980 [8,9]. Il est attendu de tels matériaux qu'ils présentent des propriétés mécaniques améliorées telles que le module de cisaillement, la ténacité mais aussi l'amortissement. Deux orientations ont été choisies : orientation « debout » (Figure 6-a) et orientation « couchée » (Figure 6-b). Tous les échantillons ont été fabriqués en ABS avec une densité de remplissage de 100 %.

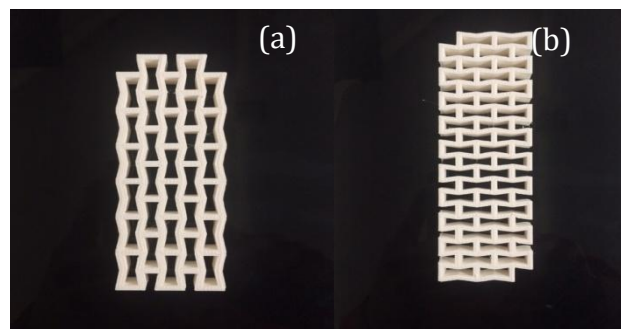


Figure 6. Structure auxétique avec deux types d'orientation : debout (a), couchée (b)

Des essais de traction-compression ont été effectués où les déplacements axiaux et transversaux ont été mesurés à l'aide de deux extensomètres. La Figure 7 présente les courbes de traction obtenues.

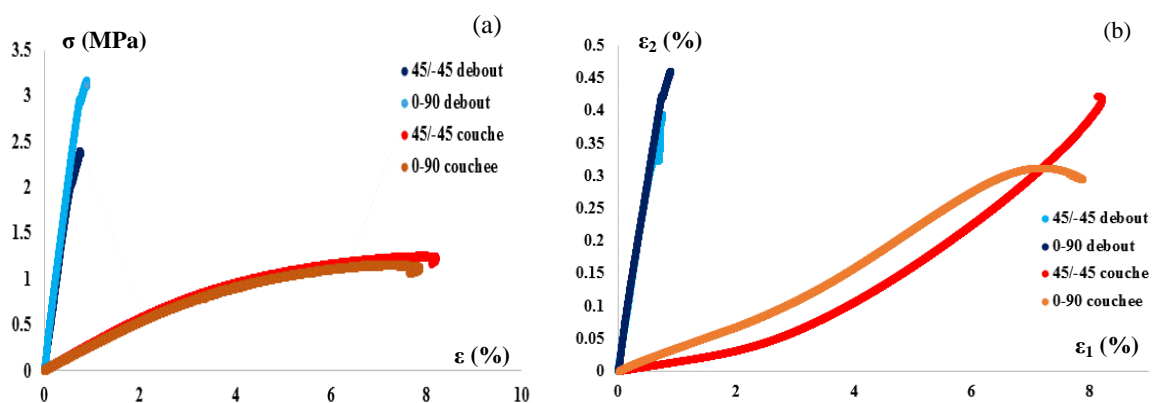


Figure 7 Comportement en traction des éprouvettes auxétiques.

La valeur moyenne du module d'Young pour les éprouvettes debout avec l'angle d'orientation 45/-45 et 0/90 sont respectivement 498.83 ± 67.66 MPa et 566.12 ± 174.34 MPa. Les éprouvettes couchées (quelque soit l'angle d'orientation) présentent un module d'élasticité moins important en comparaison aux éprouvettes auxétiques « debout ». Cela se déduit de la forme des cellules ayant une plus grande rigidité dans la configuration debout. Cette même orientation induit un effet Poisson plus important

pour les cellules debout, ce qui se confirme par les essais mécaniques réalisés. Les caractéristiques mécaniques des structures auxétiques testées sont résumées dans le tableau 2.

Description	ν	E (MPa)	σ_{\max} (MPa)	ϵ_{\max} (MPa)
0/90° debout	-0.82±0.27	566.12±174.34	2.30±0.67	0.52±0.28
0/90° couchée	-0.03±0.01	27.85±0.57	1.08±0.05	6.46±1.26
45/-45° debout	-0.75±0.09	498.83±67.66	2.25±0.25	0.48±0.15
45/-45° couchée	-0.02±0.01	29.55±1.09	1.10±0.08	6.44±1.16

Tableau 2. Résultats récapitulatif des essais de traction sur le matériau architecturé

5. Conclusion :

Une étude du procédé de fabrication additive polymère « Arburg Plastic Freeforming » a été mise en place. Elle repose, d'une part, sur la comparaison des propriétés mécaniques des pièces obtenues avec celles issues du procédé de moulage par injection, et d'autre part, sur l'étude de matériaux auxétiques. L'élongation à rupture des éprouvettes APF est la principale propriété dégradée par le procédé de fabrication additive, et est en lien avec les porosités et cavités observées sous microscope. Par ailleurs, l'orientation de dépôt des couches a une influence sur les propriétés mécaniques obtenues. L'étude de matériaux architecturés a été entamée avec des essais sur des structures auxétiques obtenues par APF. Ces derniers confirment la spécificité de ces structures, à savoir un effet Poisson négatif. Cela constitue une première étape dans l'optimisation de structures architecturées obtenues par AFP dans le but d'améliorer leurs propriétés effectives, en agissant sur la nature et la forme des cellules, les paramètres de fabrication tels que la trajectographie de fabrication, et enfin l'aspect biomatière au sein d'une même structure.

Remerciements :

Les auteurs remercient la Région Normandie pour le soutien financier, L. Chevalier et C. Keller pour les analyses MEB, et E. Baustert pour ses contributions sur le plan général de la Fabrication Additive.

Références

- [1] H. Gaub, Customization of mass-produced parts by combining injection molding and additive manufacturing with Industry 4.0 technologies, Reinforced Plastics, In Press (2015)
- [2] M. Sugavaneswaran, G. Arumaikkannu, Analytical and experimental investigation on elastic modulus of reinforced additive manufactured structure, Materials & Design 66 (2015) 29–36
- [3] F.P.W. Melchelsa, J. Feijena, D.W. Grijpma, A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering, Biomaterials 31 (2010) 6121-6130
- [4] I. Gibson, D. Shi, Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process, Rapid Prototyping Journal 3 (1997) 129-136
- [5] I. Durgun, R. Ertan, Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost, Rapid Prototyping Journal 20, (2014) 228-235
- [6] GRANTA MATERIAL INTELLIGENCE, technical data sheet, Terluran® GP-35 | ABS, 2016.
- [7] O.S. Carneiro, A.F. Silva, R. Gomes, Fused deposition modeling with polypropylene, Materials & Design 83 (2015) 768–776
- [8] R.S. Lakes, Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio, Science 235 (1987) 1038-1040
- [9] J. Dirrenberger, S. Forest, D. Jeulin, Effective elastic properties of auxetic microstructures: anisotropy and structural applications, Int. J. of Mechanics and Materials in Design 9 (2013) 21-33