

Développement d'un matériaux composites auxétiques à renfort fibreux

Development of an auxetic fiber-reinforced composite material

Eloi Facon^{1,2}, François Rault², Eric Deletombe¹ et François Boussu²

1 : DMAS, ONERA
5 rue des fortifications, 59000, Lille, France
e-mail : eloi.facon@onera.fr

2 : GEMTEX
Univ. Lille, ENSAIT, ULR 2461 - GEMTEX - Genie et Materiaux Textiles
2 All. Louise et Victor Champier, 59100 Roubaix

Résumé

Les matériaux composites, connus pour leur rapport performance mécanique/masse très intéressant, sont de plus en plus utilisés en aéronautique et défense. L'intégration de technologies comme les « open rotors », visant à réduire la consommation de carburant, introduit de nouveaux défis de conception, notamment pour l'absorption d'énergie lors d'impacts. Les matériaux auxétiques, à coefficient de Poisson négatif, offrent un potentiel prometteur en résistance aux impacts grâce à leur capacité à se densifier lors d'une sollicitation en compression, améliorant ainsi leur résistance à l'indentation et leur capacité d'absorption d'énergie. Bien que souvent étudiés via des mousses ou des matériaux imprimés en 3D, leur association avec des composites renforcés par des fibres de para-aramide pourrait exploiter les synergies en absorption d'énergie. Cette étude se concentre sur les composites auxétiques à renfort fibreux, en alliant rigidité statique et absorption d'énergie dynamique. Elle inclut la conception et la fabrication d'échantillons, des essais de caractérisation et le développement de modèles numériques pour mieux comprendre leur comportement mécanique.

Abstract

Composite materials, renowned for their excellent mechanical performance-to-mass ratio, are increasingly utilized in aerospace and defense applications. The integration of innovative technologies such as open rotors, aimed at reducing fuel consumption, introduces new design challenges, particularly in energy absorption during impact events. Auxetic materials, characterized by their negative Poisson's ratio, hold significant promise for impact resistance due to their unique ability to densify under compressive loading. This behavior enhances their resistance to indentation and energy absorption capacity. While often explored in the form of foams or 3D-printed materials, their combination with para-aramid fiber-reinforced composites presents a compelling opportunity to leverage synergistic effects for enhanced energy absorption. This study focuses on auxetic composites with fibrous reinforcement, aiming to combine high static stiffness with dynamic energy absorption capabilities. It encompasses the design and fabrication of experimental specimens, comprehensive characterization tests, and the development of numerical models to provide deeper insights into their mechanical behavior.

Mots Clés : Matériaux auxétiques, architectures textiles, matériaux composites, comportement dynamique, absorption d'énergie.

Keywords : Auxetic materials, textile architectures, composite materials, dynamic behavior, energy absorption.

Objectif de l'étude

L'objectif principal de l'étude est d'améliorer la compréhension des mécanismes auxétiques mis en jeu dans le cas d'un matériau composite à renfort fibreux. Ce mécanisme ayant pour origine un effet de structure dans la cellule élémentaire, plusieurs questionnements scientifiques se posent. Ces cellules élémentaires, constituées de fils continus formant une structure spécifique, posent d'abord la question de savoir si cette continuité est bénéfique au regard de l'effet auxétique global ou non. Ces cellules étant périodiques et symétriques, il est tentant de vouloir les homogénéiser pour gagner en efficacité sur le plan des modélisations et simulations numériques. Toutefois, cette structure étant en réalité très

hétérogène, une question se pose quant à la pertinence de ce type de modélisation par rapport à la réalité physique.

Pour répondre à ces questions, plusieurs verrous techniques ont dû être levés. D'une part, la production d'une structure composite à géométrie auxétique à partir d'un renfort fibreux, et d'autre part la conception d'un essai de caractérisation ainsi qu'un modèle numérique pour étudier le caractère auxétique d'une telle structure.

1. Elaboration du matériau composite à géométrie auxétique dans l'épaisseur

Une première étude bibliographique montre que le comportement auxétique est très majoritairement issu de la structure du matériau [1]. Les solutions/architectures peuvent globalement être catégorisées en deux grandes familles : les rentrantes (figure 1a) et les chirales. Lors d'une sollicitation en compression, les zones sans matière (au centre des sabliers) permettent à la structure de se « replier » sur elle-même, permettant ainsi une densification du matériau. En ce qui concerne les matériaux composites, cet effet d'architecture est obtenu par l'intermédiaire du renfort. Dans le cadre de l'application souhaitée (résistance à l'impact), l'effet auxétique doit idéalement se développer dans l'épaisseur du matériau. C'est dans cette dimension, hors-plan, que la structure hexagonale sera tissée (figure 1c).

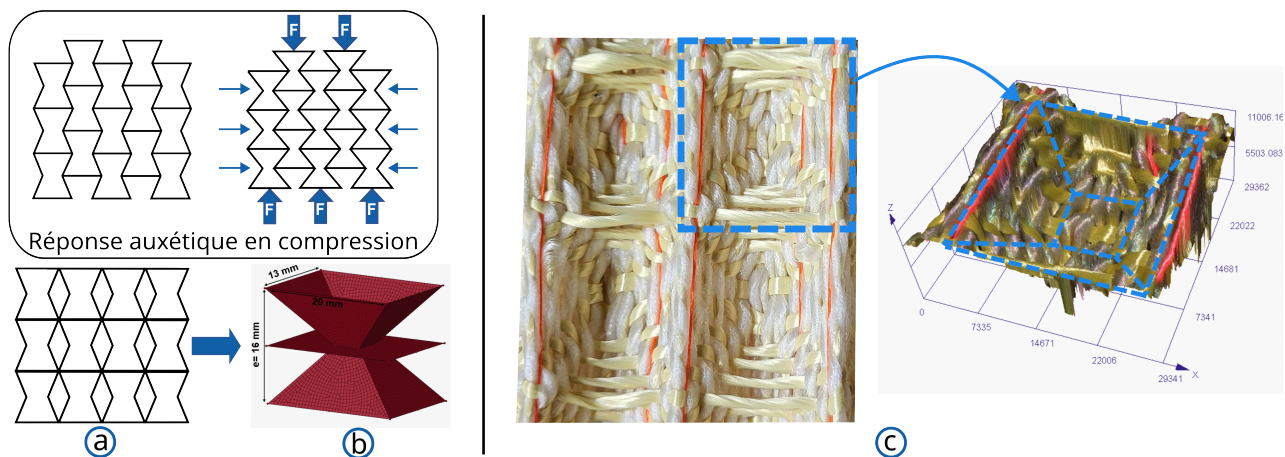


FIG. 1. – étapes du développement de la structure auxétique tissable. a) changement de la disposition des cellules dans la structure pour la rendre tissable, b) : simulation d'une sollicitation de compression sur une structure tissable, c) : tissage et métrologie de la structure avant la consolidation du composite.

La disposition des cellules au sein de notre type de structure est cependant moins importante que pour une disposition classique (figure 1a). Le rapport de déformation passe de -1 pour une disposition « traditionnelle » à -0,2 pour la structure tissée [2] [3]. Néanmoins, cela a pour effet de rendre la déformation plus stable et de limiter le glissement des cellules les unes sur les autres. C'est vers ce type de structure, tissable, que s'oriente l'étude.

Textilement parlant, l'effet hors-plan est obtenu par le biais de l'armure (schéma fondamental définissant l'entrecroisement des fils d'un tissu), dans le cas présent une armure « gaufrée ». En utilisant le déséquilibre dans le liage des fils de chaîne et de trame, une structure pyramidale hors-plan est réalisée. La géométrie de sablier de l'architecture hexagonale rentrante (figure 1b) peut être retrouvée en assemblant deux pyramides tronquées à leur sommet. Cet assemblage est obtenu en tissant deux couches symétriques en parallèle. Le liage entre les deux couches est assuré par l'inversion des fils de trame d'un tissu vers un autre en différents points du tissu. À la différence de la structure hexagonale rentrante simple, ce type de solution permet de générer des géométries pyramidales. Cela permet d'obtenir une géométrie auxétique (hexagonale rentrante) dans deux directions (figure 1c).

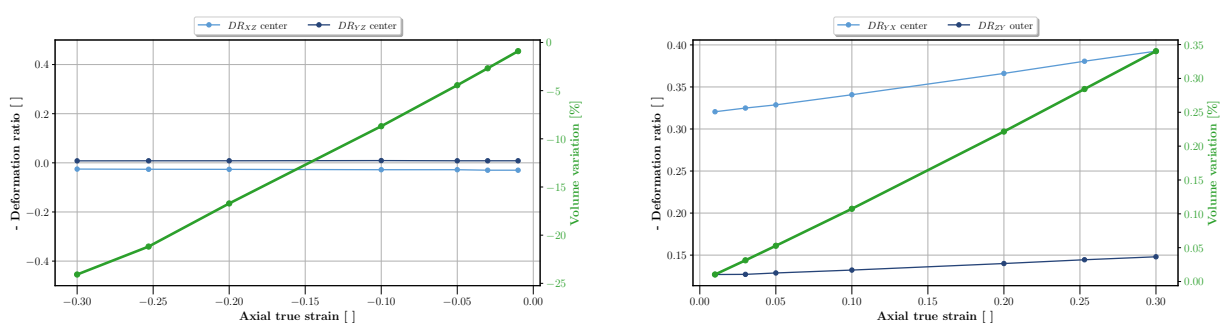
Le renfort, une fois tissé, sera consolidé par thermoformage. La résine thermoplastique étant déjà intégrée au renfort grâce à une étape de filature, le tissu est en réalité un pré-imprégné thermoplastique tissé en forme.

2. Simulation numérique

Cette structure possède une géométrie hexagonale rentrante dans deux directions de l'espace en vue de coupe et serait donc possiblement auxétique dans deux directions. Cependant, les problématiques dues aux procédés de fabrication, comme la nature continue des fils la composant et la disposition des cellules au sein de la structure, impliquent des différences par rapport aux agencements de la littérature. Cela se traduit, par exemple, par une intersection relativement rigide entre les sabliers, à cause de la densité de fils plus importante due au liage. Au regard de ces modifications, une étude numérique est nécessaire pour estimer le caractère auxétique de la structure.

La numérisation de la structure composite a permis d'extraire les informations géométriques nécessaires à la réalisation d'un modèle numérique reprenant des dimensions réalistes. La cellule modélisée est constituée d'éléments de coques minces bi-linéaires quadrilatéraux. Ainsi, la cellule est géométriquement parfaite, sans défauts de vides ni d'alignement local particulier des fils. Cela n'est pas exactement réaliste par rapport à la structure composite réelle. Pour tenir compte de ces « défauts », les propriétés mécaniques des pans ont été homogénéisées, à travers une loi des mélanges, de façon à inclure les zones de vide inhérentes au renfort tissé, mais aussi les différents taux volumiques de matrices au sein de la cellule élémentaire.

À ce stade de l'étude, une loi linéaire orthotrope est utilisée avec des paramètres différents selon cinq zones de la cellule élémentaire, en raison de leurs différents taux de matrice et de l'orientation locale des fils. La figure 2a montre le rapport de déformation (dénomination « structure » du coefficient de Poisson davantage « matériau ») déterminé pour une sollicitation en compression hors-plan. Les rapports de déformation dans les deux plans (XZ et YZ) sont proches de zéro. Cependant, un corollaire au rapport de déformation négatif est une densification du matériau sous charge ou, à isomasse, une diminution du volume occupé par une cellule élémentaire. En prenant comme référence les arêtes extérieures de la cellule hexagonale rentrante, la variation de son volume en fonction de la déformation imposée peut être étudiée. Dans le cas présent, une diminution du volume est mesurée avec l'augmentation de la compression, signe du caractère « densifiant » de la géométrie étudiée.



(a) Résultats de simulations en compression hors plan. (b) Résultats de simulations en traction sens chaîne.

FIG. 2. – Rapports de déformations et variations de volume de la cellule élémentaire formée.

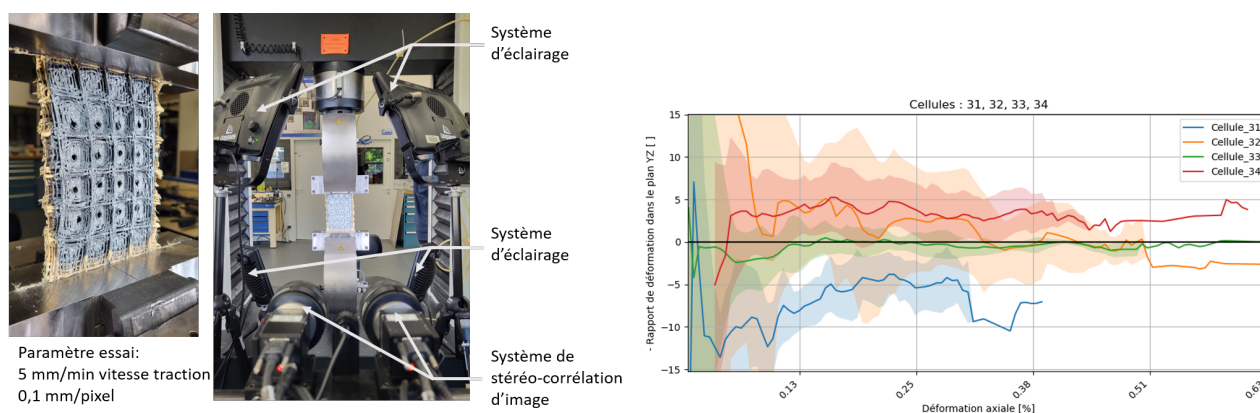
Inversement, la variation d'épaisseur a été simulée pour une sollicitation en traction dans le plan. L'évolution du rapport de déformation par rapport à la déformation axiale est présentée à la figure 2b. Dans l'épaisseur, le rapport est clairement positif et tend vers 0,15. Par ailleurs, l'étude de la variation du volume occupé montre, cette fois-ci, une augmentation du volume occupé. Cela est en accord avec le corollaire de la définition de l'auxétisme.

Au-delà de statuer sur le caractère symétrique du comportement de la structure, cela permet de préparer l'essai de caractérisation mécanique. La confrontation de la simulation et des essais permettra de statuer sur la viabilité d'une simulation homogénéisée de ce type de structure hétérogène.

3. Experimental

L'essai de caractérisation du caractère auxétique est réalisé en sollicitation de traction afin de parer aux difficultés d'observation des cellules centrales de l'échantillon lors d'un essai de compression (figure 3a). Ce type d'essai permet ainsi de visualiser le comportement de l'ensemble des cellules pendant l'essai. Cela pourrait potentiellement permettre de statuer sur la question scientifique de l'intérêt ou non d'une armature tissée pour ce type de structure.

Les déformations des cellules et de la structure globale sont observées grâce à un système de stéréocorrélation d'image permettant de visualiser les déformations dans le plan et hors-plan. Cette dernière possibilité est utilisée pour mesurer la variation d'épaisseur de la structure, l'angle des sabliers, ou encore la longueur de la zone centrale des motifs.



(a) Montage expérimental pour la caractérisation du composite auxétique.

(b) Premiers résultats de calcul des rapports de déformations locaux pour les cellules centrales.

FIG. 3. – Essai de caractérisation expérimentale du composite auxétique.

La confrontation de ces résultats d'essais (figure 3b) avec la simulation numérique permettra de les vérifier ou de les modifier. Une fois en accord avec la réalité expérimentale, le comportement en compression pourra être étudié numériquement.

Conclusion

La production des échantillons de composites auxétiques a été réalisée. Un modèle numérique de la structure et une expérience de caractérisation de l'auxétisme ont été mis en place. Ces deux moyens devraient permettre de répondre aux questions concernant la possibilité d'homogénéisation de ce type de composite, et de statuer sur l'influence du procédé d'élaboration du matériau sur les propriétés auxétiques de la structure.

Références

- [1] Jianjun ZHANG, Guoxing LU et Zhong YOU. « Large Deformation and Energy Absorption of Additively Manufactured Auxetic Materials and Structures : A Review ». In : *Composites Part B : Engineering* 201 (15 nov. 2020), p. 108340. ISSN : 1359-8368. DOI : 10.1016/j.compositesb.2020.108340.
- [2] Ebba MONTGOMERY-LILJEROTH, Silvia SCHIEVANO et Gaetano BURRIESCI. « Elastic Properties of 2D Auxetic Honeycomb Structures- a Review ». In : *Applied Materials Today* 30 (1^{er} fév. 2023), p. 101722. ISSN : 2352-9407. DOI : 10.1016/j.apmt.2022.101722.

- [3] Arun ARJUNAN et al. « Additively Manufactured AlSi10Mg Inherently Stable Thin and Thick-Walled Lattice with Negative Poisson's Ratio ». In : *Composite Structures* 247 (1^{er} sept. 2020), p. 112469. ISSN : 0263-8223. DOI : [10.1016/j.compstruct.2020.112469](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112469).