

Etude numérique de la réponse dynamique d'âmes composites à architecture auxétique

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

¹DMAS, ONERA, 59000, Lille, France, eloi.facon@onera.fr, eric.deletombe@onera.fr

²Univ. Lille, ENSAIT, ULR 2461 - GEMTEX - Génie et Matériaux Textiles, F-59000 Lille, France, francois.boussu@ensait.fr, francois.rault@ensait.fr

Résumé — L'article concerne l'étude numérique de la réponse dynamique en compression d'une structure auxétique composite (géométrie hexagonale rentrante) réalisée à partir d'un renfort textile de type gaufré, et d'une résine polypropylène. Après un rapide rappel concernant l'étude de faisabilité d'une telle structure en composite, et sa caractérisation mécanique quasi-statique, un exercice purement numérique est mené afin d'étudier le potentiel d'absorption d'énergie de ce type de structure, et l'importance de l'influence de la vitesse de déformation sur sa performance à l'impact. Pour ce faire, les propriétés matériau d'un composite Kevlar/époxy ayant antérieurement fait l'objet d'une caractérisation mécanique complète à l'ONERA, est considéré.

Mots clés — Auxétisme, Architecture textile, Matériau Composite, Absorption d'énergie.

1. Introduction

Afin d'assurer la sécurité des passagers dans les avions, différentes stratégies sont mises en place pour stopper les impacteurs avant qu'ils ne conduisent à une ruine structurale catastrophique de l'appareil. L'une d'entre elles repose sur le développement de matériaux protecteurs et autres absorbeurs d'énergie. L'une des difficultés dans ces cas de figure est de trouver le juste milieu entre les capacités de résistance et d'absorption d'énergie et la masse ajoutée qui pénalisera les performances de l'appareil. Parmi les solutions en cours d'étude dans la littérature (le but étant d'améliorer l'existant), les matériaux auxétiques pourraient présenter des propriétés prometteuses pour l'absorption d'énergie en cas d'impact. Ces derniers possèdent en effet la propriété d'avoir un coefficient de Poisson négatif, ce qui leur permet de se contracter latéralement sous une contrainte de compression longitudinale, ce qui entraîne une densification du matériau, améliorant ainsi certaines propriétés mécaniques telles que la résistance à la perforation et, pour certains, la capacité d'absorption d'énergie. Les matériaux auxétiques architecturés connaissent aujourd'hui un développement rapide, grâce aux nouvelles capacités d'élaboration apportées par la fabrication additive (impression 3D), en particulier les techniques basées sur l'usage de poudres métalliques. Pour limiter l'ajout de masse pour la protection, des efforts d'allègement peuvent être réalisés en s'appuyant sur d'autres améliorations matérielles aujourd'hui plébiscitées par les constructeurs : le recours aux matériaux composites, aux propriétés mécaniques très intéressantes. Ces dernières sont obtenues grâce aux renforts fibreux qui les composent. Ainsi, en termes de protection à l'impact, dans d'autres secteurs que l'aéronautique (e.g. la protection balistique), les renforts tissés à base de para-aramide sont reconnus pour leur capacité à absorber l'énergie lors d'impacts, grâce à leur grande ténacité et leur déformabilité. L'hypothèse de départ ayant motivé les travaux présentés repose sur l'éventuel effet cumulatif des propriétés à l'impact des structures auxétiques et des composites à renfort fibreux à base de para-aramide. Des recherches matérielles, expérimentales et numériques [2] [3] [4] ont été menées sur une structure auxétique réalisée en composite à renfort de fibres de para-aramide, le présent article s'intéresse plus particulièrement à la partie numérique de ces travaux qui

cherche à statuer sur l'éventuel intérêt de l'utilisation d'architectures composites auxétiques dans les situations de protection à l'impact.

2. DESCRIPTION DU MATERIAU ET ETUDE EXPERIMENTALE

Dans les travaux de thèse [1] [2], une proposition de structure composite thermoplastique reposant sur une géométrie hexagonale rentrante dans l'épaisseur à partir d'un renfort tissé en fibres de para-aramide (Kevlar®29), a été imaginée, élaborée et testée. Un polypropylène constitue la résine thermoplastique, une technique de guilage étant utilisée pour associer les deux matériaux lors de l'opération de tissage, avant de procéder à la thermocompression. Le tissage d'une armure de type gaufré-bicouche permet d'obtenir un échantillon constitué d'un ensemble de cellules hexagonales rentrantes, formées de deux pyramides tronquées symétriques, liées mécaniquement en leurs sommets par des fils de trame. L'étape de thermocompression est pensée pour permettre de repousser les fils du plan médian de la structure de façon à générer une zone sans matière au centre de la cellule élémentaire composite, à l'instar des géométries rentrantes 3D de la littérature (l'absence de matière permettant l'effondrement/le repliement latéral de la cellule vers son centre lors d'une sollicitation de compression, et donc générant l'effet auxétique). La structure hexagonale rentrante 3D composite obtenue est cependant légèrement différente des solutions proposées dans la littérature scientifique en raison des contraintes techniques textiles qui ont orienté son élaboration. Les travaux ont néanmoins permis de démontrer la faisabilité technique de tissage d'architectures rentrantes 3D de type auxétique, et la réalisation d'une structure composite thermoplastique à renforts de fibre de para-aramide.

L'étude expérimentale de la réponse mécanique du composite à géométrie hexagonale rentrante 3D élaboré dans le cadre de cette recherche a pu être menée [1], pour cela des éprouvettes de 6x6 cellules élémentaires ont été élaborées. Les essais de traction dans le plan XY, ont été instrumentés par stéréocorrélation d'images numériques, pour permettre l'observation des champs de déplacement dans le plan (YX) et hors-plan (suivant Z), ainsi que des champs de déformation dans le plan YX. La technique de stéréocorrélation d'images numériques permettant d'obtenir une exploitation particulièrement riche de l'essai, une méthode de dépouillement adaptée a dû être mise en place. L'étude du comportement jusqu'à la rupture de l'éprouvette a été réalisée dans un premier temps pour une sollicitation de traction à 5 mm/min. Un second essai avec une sollicitation plus rapide a ensuite été réalisé, à 100 mm/min, qui n'a pas révélé de différence notable avec l'essai quasi-statique : l'effet de la vitesse n'a pas pu être étudié de manière plus étendue, faute d'éprouvettes et de temps pour la réalisation et l'exploitation des essais. De même, les essais n'ont pas permis de conclure à un effet auxétique franc, à l'échelle du pan ou de la cellule, ce résultat étant principalement imputable au caractère artisanal de la fabrication des éprouvettes de démonstration.

3. MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE DE LA REPONSE DYNAMIQUE DU MATERIAU

Pour poursuivre l'exercice, et éventuellement élargir le champ des potentiels, une étude numérique a été proposée. Dans un premier temps, le modèle numérique a été élaboré en regard du matériau réalisé, et le modèle évalué et calibré par rapport aux résultats expérimentaux. Cette étape a principalement permis d'opérer quelques choix généraux de modélisation (type d'éléments finis, taille de maille, conditions aux limites, lois de comportement, schéma de résolution, etc.).

Pour développer le modèle, il a été choisi d'utiliser la suite de logiciels HyperWorks® d'Altair® : cette suite de logiciels permet d'utiliser des solveurs implicite Optistruct® (utilisé pour mener une étude sur le VER et l'homogénéisation du matériau [1]) et explicite Radioss® (pour l'évaluation des performances de l'éprouvette composite sous chargement dynamique). Le modèle de cellule élémentaire utilisé est présenté sur la figure ci-dessous. Le choix d'utiliser des éléments de coque plutôt que des

éléments volumiques résulte d'une anticipation de la phase de simulation pour des sollicitations dynamiques sur une éprouvette 5x5 cellules, afin de limiter les coûts de calcul et assurer une cohérence dans l'élaboration du modèle. Pour les mêmes raisons, une étude de sensibilité à la finesse de maillage a été réalisée dans un premier temps.

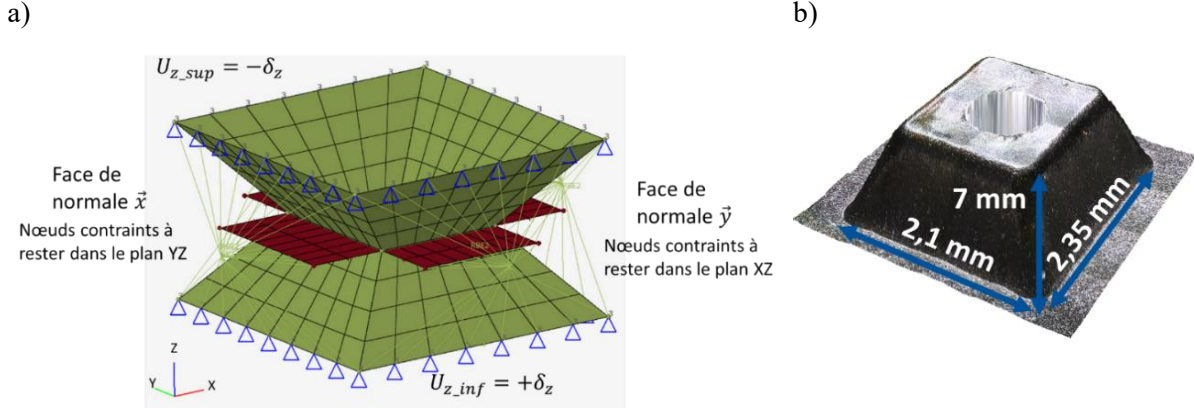


Figure 1 – Modèle éléments-finis simplifié de cellule élémentaire utilisé pour les simulations Optistruct® (a) et dimensions d'une demi-cellule unitaire / moule (b)

Le développement progressif du modèle de la cellule hexagonale rentrante 3D composite a été initié dans un premier temps, à l'aide d'un modèle linéaire simple [1] [3]. Néanmoins, pour déterminer l'énergie absorbée ou dissipée par la structure, l'utilisation de lois de comportement non-linéaire est nécessaire. Pour cela, et pour la prise en compte de la dynamique, le code de calcul Radioss® a été utilisé [4]. La modélisation du comportement linéaire élastique du composite est classique, et repose sur la définition du tenseur de Hooke pour les matériaux orthotropes. Des éléments de coque étant utilisés, ce tenseur est réduit à ses composantes dans les deux plans (E_{11} , E_{22} , G_{12} et coefficients de Poisson associés). Pour définir le comportement non linéaire du matériau, l'enveloppe de comportement élastique de celui-ci est modélisée avec le critère de Tsai-Wu (1).

$$\begin{aligned}
 F &= F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{44}\tau_{12}^2 + F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} \\
 F_i &= 1/\sigma_{iy}^t - 1/\sigma_{iy}^c \quad i = 1,2 \\
 F_{ii} &= 1/\sigma_{iy}^t \sigma_{iy}^c \quad i = 1,2,4 \\
 F_{12} &= -\sqrt{F_{11}F_{22}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

L'évolution de l'enveloppe élastique lors du chargement non-linéaire ($F > 1$) est assurée à travers la fonction $F(W_p^*, \dot{\epsilon})$ définie par l'équation (2) avec b et n les coefficients d'une loi puissance pilotant la non-linéarité, W_p^{ref} le travail anélastique de référence, c et $\dot{\epsilon}_0$ les coefficients définissant une dépendance logarithmique à la vitesse de déformation.

$$\begin{aligned}
 F(W_p^*, \dot{\epsilon}) &= [1 + b(W_p^*)^n] \cdot \left[1 + c \cdot \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] \\
 \text{Avec } W_p^* &= \frac{W_p}{W_p^{ref}}
 \end{aligned} \tag{2}$$

La loi de comportement retenue permet enfin d'inclure un critère de rupture, en déformation de traction. Lorsque la valeur du critère est atteinte, l'élément concerné est progressivement rompu puis

supprimé. En plus de ce critère, certaines conditions peuvent être ajoutées, l'activation de la rupture peut être limitée à l'une ou l'autre des directions matériau 1, 2.

Les matériaux constitutifs de l'architecture auxétique élaborée n'ayant pas pu faire l'objet d'une caractérisation mécanique au cours de la thèse, l'objectif de l'exercice présenté ci-dessous n'a pas été de comparer les résultats de simulation avec les résultats des essais, mais de réaliser une étude numérique prospective. Le but étant d'étudier la performance à l'impact, en absorption d'énergie, il a été décidé d'utiliser les propriétés matériau d'un composite para-aramide/époxy, pour lequel les paramètres de la loi de comportement Radioss® avaient été spécifiquement identifiés lors d'une étude antérieure réalisée à l'ONERA, dont les résultats avaient fait l'objet d'un rapport interne de l'ONERA [5]. Cette étude visait à identifier les paramètres de la loi de comportement décrite ci-dessus pour différents matériaux. Des essais avaient été réalisés sur des éprouvettes orientées à 0°, 90° et ±45° (test de Rosen) en traction et compression, en quasi-statique ($8,33 \times 10^{-5}$ m/s) et en dynamique (de 0,2 à 4 m/s en traction et 0,1 et 0,4 m/s en compression). Parmi les matériaux testés, se trouvait un composite à base de renfort tissé de para-aramide et matrice époxy (renfort tissé équilibré de para-aramide avec une résine Epoxy/Vicotex SX1458, le taux volumique de fibre est de 40% et le taux volumique de matrice de 60%, pour une densité de $1,3 \times 10^{-3}$ g/mm³). En effet, pour réaliser cet exercice, il nous a semblé intéressant de nous projeter vers une structure qui serait composée d'un composite de qualité aéronautique. Cela permet d'allier la géométrie « parfaite » du modèle numérique et une loi matériau basée sur un matériau caractérisé dans les règles de l'art, permettant ainsi de définir les performances d'une structure idéale. Les propriétés de ce matériau, présentées dans le tableau 1, ont été utilisées dans le cadre de l'exercice numérique. Pour ce qui est de la rupture, le rapport indique une rupture en sens 1 et 2 (chaîne et trame) à 2 % de déformation : par conséquent, dès que ce niveau de déformation sera atteint en sens 1 ou 2, les éléments seront supprimés.

Table 1 – Propriétés mécaniques utilisées pour la modélisation de la partie linéaire et non linéaire d'après le rapport ONERA [5].

	E ₁₁ (MPa)	E ₂₂ (MPa)	ν ₁₂ ()	G ₁₂ (MPa)	G ₂₃ (MPa)	G ₃₁ (MPa)
Zone unique	25333	25333	0,07	1481	1481	1481

σ _{1y} ^c (MPa)	σ _{1y} ^t (MPa)	σ _{2y} ^c (MPa)	σ _{2y} ^t (MPa)	σ _{12y} ^c (MPa)	σ _{12y} ^t (MPa)	ε _R (%)	α	b	W _p ^{ref} (mJ/mm ³)	n	c	ε̇ ₀ (s ⁻¹)
83	559	83	559	46,5	43	2	0	0,31	1	1	0	1

A partir d'une courbe contrainte-déformation, l'énergie dissipée par la structure modélisée peut être simplement calculée. Les équations (3) donnent en effet les relations entre l'énergie volumique (w) et l'aire sous le cycle décrit par la courbe contrainte-déformation d'un matériau. Pour obtenir l'énergie dissipée, il suffit de multiplier la première valeur par le volume de la structure sollicitée.

$$w = \oint \sigma d\varepsilon \quad (3)$$

$$E_{dissipée} = w \times V_{structure}$$

Le pré-processing de Radioss® permet l'extraction de la masse de la structure simulée. L'énergie absorbée spécifique peut alors être simplement calculée à partir de la relation (4):

$$EAS = \frac{E_{dissipée}}{masse_{structure}} \quad (4)$$

Pour obtenir la courbe contrainte-déformation du matériau équivalent dans une direction donnée de sollicitation, un déplacement est imposé aux nœuds appartenant à la section normale à cette direction, suivant cette direction. La déformation macroscopique est calculée à partir de ce déplacement uniforme divisé par la longueur caractéristique initiale de l'éprouvette (selon la direction de sollicitation). La somme des forces aux nœuds sollicités est extraite du calcul éléments-finis, et divisée par la surface sur laquelle la sollicitation est appliquée (voir Figure 2), pour déterminer la contrainte. Six cas d'étude ont été considérés dans le cadre de l'étude numérique, mais nous ne présentons que les résultats de compression dans la direction Z qui correspond à l'épaisseur des éprouvettes.

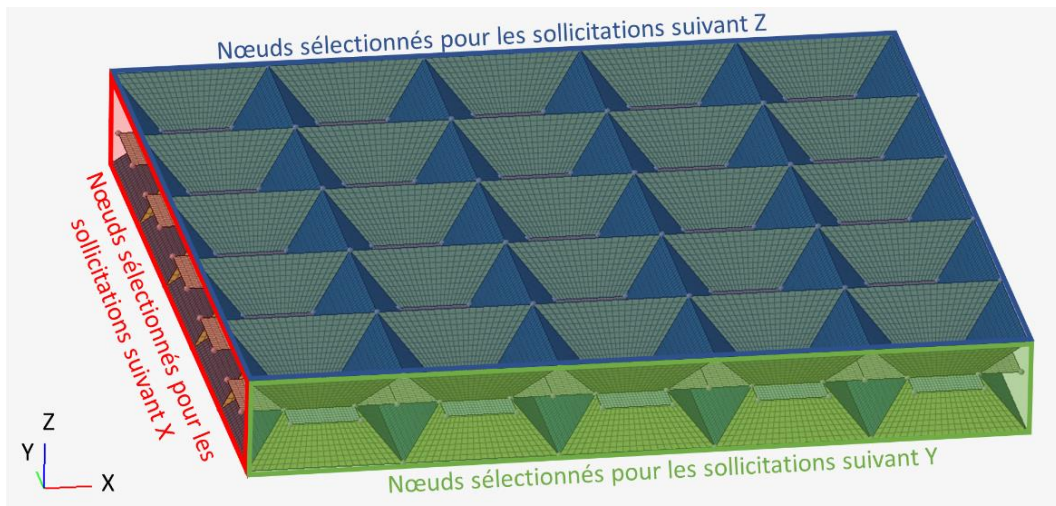


Figure 2 – Représentation des surfaces utilisées pour sélectionner les points d'application des conditions aux limites pour l'étude numérique

La courbe contrainte-déformation permettant le calcul de l'énergie volumique matérielle absorbée, correspondant à un cas quasi-statique (pas d'effet de vitesse de déformation sur le comportement du matériau) est présentée sur la Figure 3. L'énergie absorbée est dans ce cas de 86 J (soit une énergie dissipée spécifique de 3,9 J/g). La longueur et la hauteur de plateau sont pilotées par la rupture du matériau.

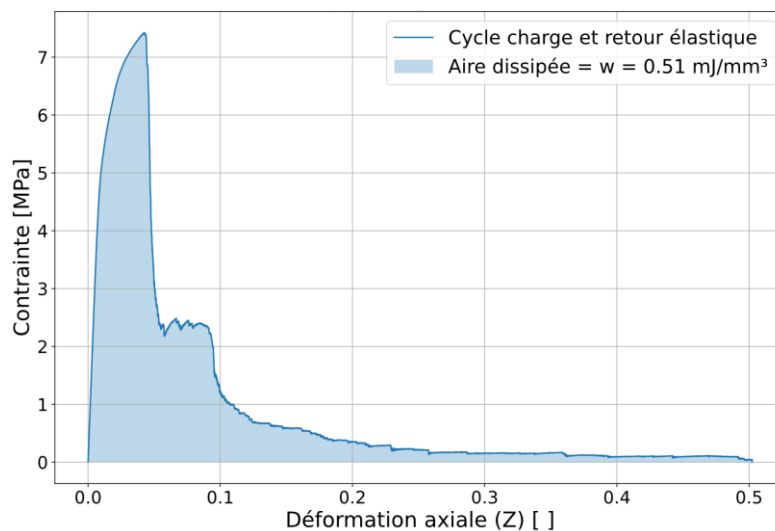


Figure 3 – Courbe contrainte-déformation utilisée pour la détermination de l'énergie absorbée, lors d'un chargement quasi-statique sans prise en compte de l'effet de la vitesse de déformation sur le matériau

L'influence de la vitesse de sollicitation sur le comportement du matériau est ensuite introduite. Pour activer les effets de vitesse, $\dot{\epsilon}_0$ est fixé à $0,001 \text{ s}^{-1}$. Trois ordres de grandeur de vitesses de sollicitation pouvant être rencontrées lors de diverses situations accidentelles aéronautiques sont étudiées : 1 m.s^{-1} pour un cas d'amerrissage (Figure 4a), 10 m.s^{-1} pour un cas d'atterrissage d'urgence train rentré (Figure 4b) et 150 m.s^{-1} pour un cas d'impact aviaire (Figure 4c). Les résultats, courbes contrainte-déformation et énergie dissipée, sont présentées ci-dessous, dans l'ordre croissant des vitesses de sollicitation étudiées.

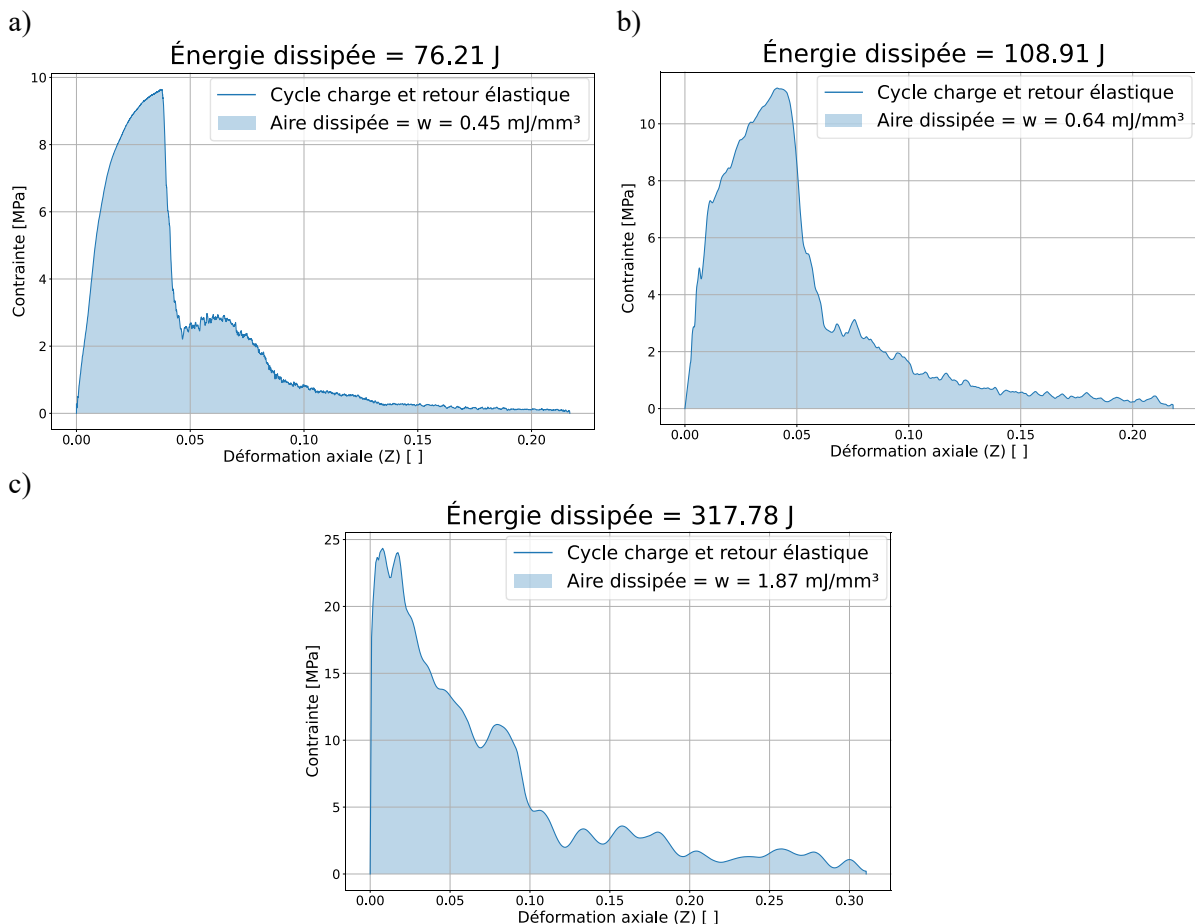


Figure 4 – Courbes contrainte-déformation utilisée pour la détermination de l'énergie absorbée, en considérant le composite caractérisé dans le rapport ONERA, incluant la dépendance à la vitesse pour une sollicitation de 1 m.s^{-1} , 10 m.s^{-1} et 150 m.s^{-1}

Au regard des trois courbes de la figure ci-dessus, il apparaît que la vitesse de sollicitation a un effet notable sur la réponse mécanique de la structure composite auxétique étudiée. Plus la vitesse augmente, plus le pic de contrainte est élevé (ce qui était attendu), mais moins le plateau est long et distinguable. La quantité d'énergie dissipée semble varier de façon monotone en fonction de la vitesse d'impact. Néanmoins, prédire le comportement de la structure reste complexe : dans le cas présent, l'ajout de la rupture implique une compétition entre la non-linéarité matériau (au niveau de la loi de comportement) et la ruine de la structure (dépendant elle aussi de la vitesse de chargement), qui plus est les éventuels contacts entre les différentes parties des cellules unitaires s'effondrant sur elles-mêmes ne sont pas ici pris en compte.

4. CONCLUSION

Les travaux présentés dans cet article ont permis de s'intéresser à l'exercice de modélisation numérique d'une structure composite définie à partir d'une géométrie de cellule élémentaire de type hexagonale rentrante. Cette structure a fait l'objet d'une étude de faisabilité concernant sa possible élaboration, suivie d'une étape de caractérisation mécanique expérimentale, dont les résultats sont disponibles dans [1][2][3]. Le développement du modèle numérique s'est ensuite fait de manière incrémentale, en augmentant progressivement la complexité des lois de comportement utilisées, afin de jaloner l'exercice au mieux, et le faire reposer sur des bases plus facilement analysables et justifiables. Pour permettre l'utilisation de lois de comportement orthotropes non-linéaires et simuler le comportement dynamique de la structure, le modèle initialement développé sur solveur implicite a été transféré sur un solveur explicite. Le comportement de la structure a été évalué en utilisant des propriétés matérielles d'un composite aramide/époxy antérieurement étudié par l'ONERA (linéaires et non-linéaires, incluant la rupture). La courbe contrainte-déformation en compression de la structure s'apparente à celle attendue des matériaux absorbeurs d'énergie (pic suivi d'un plateau de contrainte). Elle présente une énergie dissipée spécifique de 3,9 J/g. Sur les bases de cette simulation, une forte influence de la vitesse de sollicitation sur la réponse mécanique de la structure a pu être constatée. Son interprétation reste néanmoins assez délicate, en raison de la mise en compétition entre la dépendance du comportement non linéaire à la vitesse de sollicitation, et la dépendance des modes de rupture structuraux à cette même vitesse, la modélisation de la rupture restant un point dur pour la simulation du comportement des matériaux composites.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article tiennent à remercier la Région Hauts-de-France pour le co-financement des travaux de thèse dont est extraite cette publication. Pour les équipements expérimentaux utilisés dans ces travaux et les ressources associées, nos remerciements vont également au gouvernement français (MinArm), à l'Union européenne (FEDER) et à la région Hauts-de-France.

Références

- [1] Eloi Facon, Développement de matériaux composites auxétiques pour des propriétés au choc améliorées, Thèse de mécanique des solides, des matériaux, des structures et des surfaces, l'Université de Lille, 12 Décembre 2025.
- [2] E. Facon, F. Rault, E. Deletombe, F. Boussu. Characterization of an auxetic woven reinforced composite material. Proceedings of the Autex 2025 World Conference, Dresden, Allemagne, 2025. DOI : À paraître.
- [3] E. Facon, F. Rault, E. Deletombe, F. Boussu. Design and manufacturing of a textile-based auxetic composite core. Proceedings of the 39th Technical Conference of the American Society of Composites, San Diego, USA, 2024. DOI : À paraître.
- [4] Manuel utilisateur RADIOSS, <https://help.altair.com/hwsolvers/rad/index.htm>
- [5] E. Deletombe et D. Delsart, « Caractérisation matérielle et Simulation paramétrique 3D élémentaire et structurale », ONERA, Lille, Rapport technique 98/06, févr. 1998.