

## Multi-scale analysis of low velocity impact performance of laminated composites glass fibres/Elium Acrylic resin

Matadi Boumbimba, Rodrigue<sup>1</sup>,  
 Kinvi-Dossou, Gbessilho<sup>1</sup>  
 Bonfoh, Napo<sup>1</sup>  
 Gerard, Pierre<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux, UMR CNRS 7239, Université de Lorraine, 7 rue Felix Savart BP 15082, 57073 Metz, Cedex 03, France, e-mail : [rodrigue.matadi-boumbimba@univ-lorraine.fr](mailto:rodrigue.matadi-boumbimba@univ-lorraine.fr)

<sup>2</sup>ARKEMA, Groupement de Recherche de Lacq, F-64170 Lacq, France

1

### Résumé :

Pour des besoins de recyclabilité, une résine acrylique (Elium 150) a été récemment développée pour l'élaboration de composites stratifiés à température ambiante. Cette nouvelle résine est dotée de propriétés mécaniques intéressantes qui lui permettent de remplacer les résines époxy dans certaines applications industrielles où une résistance accrue est requise. Dans cette étude, la Mécanique de la Structure Génome (MSG) et les approches d'homogénéisation numérique ont été menées pour évaluer les propriétés mécaniques effectives d'un stratifié composite fibres de verre / résine acrylique. Grâce à une approche d'homogénéisation asymptotique en deux étapes, la présente étude permet de prédire les propriétés élastiques des composites stratifiés fibres de verre / résine acrylique. Avant les simulations numériques, quelques observations ont été effectuées sur l'échantillon, afin de représenter au mieux la géométrie d'un élément de volume représentatif périodique (RVE). Ces résultats numériques ont été comparés à ceux issus d'investigations expérimentales antérieures sur des composites stratifiés macroscopiques. Un accord satisfaisant a été observé entre les prédictions numériques et les données expérimentales. Afin de tester la pertinence de la procédure numérique proposée, les effets de la vitesse de déformation et de la température ont ensuite été discutés. Enfin, un modèle d'éléments finis a été implémenté pour la simulation de l'impact basse vitesse sur le composite stratifié étudié.

## 1. Introduction

Encouragée par des exigences de recyclabilité des matériaux, l'utilisation des composites stratifiés à base de résines thermoplastiques liquides à température ambiante, constitue de nos jours un véritable défi. Ce défi réside en particulier dans la mise en place des procédés de fabrication adaptés pour cette nouvelle classe de matériaux. En effet, en plus de nécessiter des résines thermoplastiques liquides, le développement de ces matériaux doit se faire par l'utilisation de procédés classiques, déjà appliqués pour les stratifiés à base de matrices thermodurcissables. Cette exigence a conduit les ingénieurs d'ARKEMA à développer une nouvelle résine acrylique liquide, qui a la particularité de polymériser à température ambiante. Comme de nombreux polymères thermoplastiques amorphes de la famille des acryliques, cette nouvelle résine acrylique est recyclable et présente un comportement élastique rigide en traction. Pour la rendre plus tenace, nous avons entrepris dans cette étude d'y ajouter des copolymères à blocs, eux aussi développés par ARKEMA sous le nom commercial de Nanostrength. Ces copolymères ont la capacité d'être «solubilisés» et de s'organiser sous forme de nanostructures dans la résine [1-2]. Cette résine acrylique modifiée a été utilisée pour la préparation des plaques en composites stratifiés, utilisées dans cette étude. Le but de cette étude est d'évaluer la résistance aux chocs des composites stratifiés à base de cette résine acrylique modifiée choc et des fibres de verre. Les effets de la température, de l'énergie d'impact et de la concentration en copolymères à blocs seront tour à tour étudiés. L'analyse de l'endommagement au moyen d'analyses tomographiques a été réalisée afin de relier la résistance au choc, au type et à l'étendue des endommagements. Une modélisation numérique, basée sur une homogénéisation périodique (par une méthode dite de « Mécanique de la Structure Génome » (MSG)) [3] a permis de prédire les propriétés élastiques du composite. Afin de vérifier la pertinence de cette approche, les propriétés élastiques effectives issues de cette approche seront affectées au composite stratifié en vue de la simulation de son comportement lorsqu'il est soumis à un impact basse vitesse.

## 2. Mise en œuvre et caractérisation

### 2.1 Matériaux, mise en œuvre et caractérisation de la tenue à l'impact

La résine utilisée dans ce travail est une résine acrylique thermoplastique liquide de faible viscosité (150 cPs) (ELIUM 150), récemment développée par ARKEMA. En plus du monomère acrylique, la résine contient également un agent d'accélération visant à activer le catalyseur peroxyde pour amorcer la polymérisation. Le tissu de fibres de verre ayant servi à la fabrication des composites, est un tissé de type taffetas, fourni par Chomarat. La longueur de l'unité répétitive de tissu est  $T = 7,8 \text{ mm}$  et sa densité surfacique  $600 \text{ g / m}^2$ . Le copolymère tri-bloc acrylique M53, dénommé Nanostrength (figure 1a) et fourni par ARKEMA (GRL, France), est un copolymère MAM symétrique. Les copolymères MAM possèdent un bloc central en poly (acrylate de butyle) et deux blocs latéraux en poly (méthacrylate de méthyle) conçus pour des formulations époxy telles que l'éther diglycidyle de bisphénol A (DGEBA).

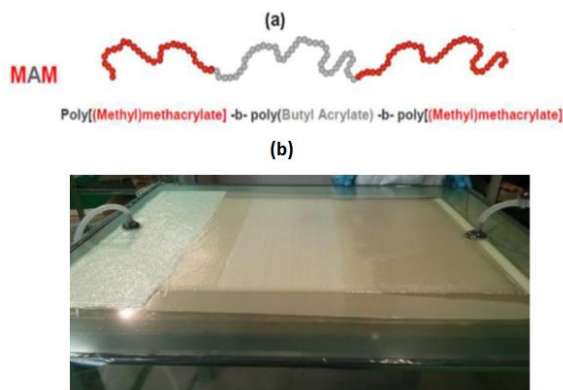


Figure 1. (a) structure du modifiant choc utilisé, copolymère tri-blocs acrylique (Nanostrength), (b) procédé d'infusion des plaques composites à base d'acrylique

Les plaques composites ont été élaborées par infusion (figure 1b). Pour un composite stratifié contenant les Nanostrength, la résine acrylique a d'abord été mélangée avec les Nanostrength pendant 2 heures à température ambiante, puis après dégazage, elle a été utilisée pour l'infusion des tissus de fibres de verre. Pendant le mélange, les Nanostrength sous forme de poudre ont été solubilisés dans la résine acrylique pour assurer une bonne dispersion. Trois concentrations massiques de Nanostrength (5, 10 et 15%), ont respectivement été utilisées pour les mélanges résine (acrylique + Nanostrength)/fibres de verre. Les plaques composites préparées sont composées de quatre plis en tissus de fibres de verre taffetas. La concentration massique en fibres de verre dans le composite est égal à 65%. Dans la suite, les composites ayant une concentration massique en Nanostrength de 0, 5, 10 et 15% seront respectivement nommés Pure\_Acry / GF, Acry\_Nano5 / GF, Acry\_Nano10 / GF et Acry\_Nano15 / GF.

Les essais d'impact ont été réalisés au moyen d'une tour de chute Instron CEAST 9350. L'installation, équipée d'une enceinte thermique réglable, permet d'effectuer des essais à différentes températures. Pour les essais à basse température, de l'azote liquide a été utilisé pour refroidir l'enceinte. L'impacteur utilisé pour les essais d'impact est un impacteur hémisphérique de 50 mm diamètre et la masse totale, chariot et impacteur compris, est approximativement égale à 5020 g. Les essais d'impact ont été effectués à des énergies d'impact de 30, 40 et 50 J, ce qui correspond à des vitesses d'impact respectives de 3,5, 4 et 4,5  $\text{ms}^{-1}$ , et à trois différentes températures (20, 80 et -80 °C).

### 3. Résultats

#### 3.1 Analyse des courbes force-déplacement et énergie-temps

La figure 2 présente, les courbes typiques donnant respectivement l'évolution de l'effort en fonction du déplacement et l'énergie en fonction du temps. L'analyse de l'évolution de l'effort en fonction du déplacement (figure 2a), laisse tout d'abord apparaître une phase pseudo-linéaire marquée par une augmentation monotone de la charge. Cette phase correspond à la flexion élastique de la plaque composite. Cette augmentation de l'effort est suivie d'une phase au cours de laquelle apparaissent quelques petites oscillations, révélant la première diminution de la rigidité de la plaque composite, due à l'amorçage de la fissuration matricielle [2]. L'effort maximal est ensuite atteint.

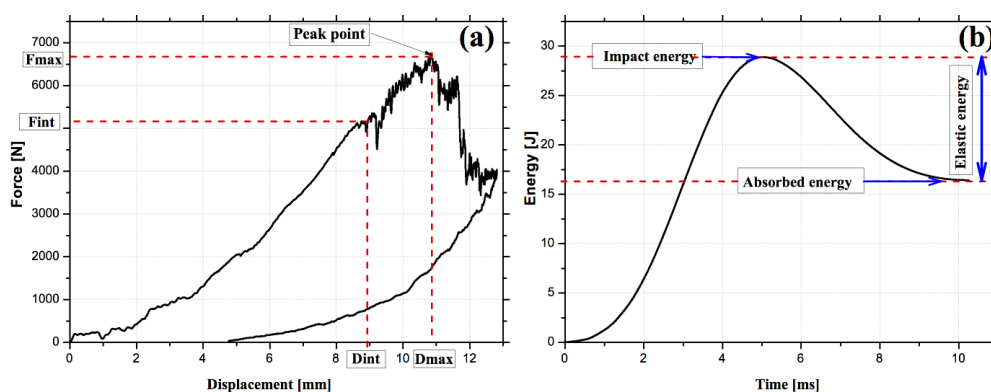


Figure 2. Courbes typiques de l'évolution de l'effort en fonction du déplacement(a) et de l'énergie en fonction du temps (b) des composites stratifiés fibres de verre / acrylique

Au-delà du pic, la baisse significative de l'effort est due à la propagation des dommages dans la plaque composite. Le délaminage et la rupture des fibres se produisent à ce stade. La dernière partie de la courbe correspond non seulement à la friction entre la plaque composite et l'impacteur, mais aussi au retour de l'impacteur. L'évolution de l'énergie en fonction du temps (Figure 2b) permet de déterminer l'énergie d'impact, qui correspond au pic de la courbe. L'énergie absorbée est donnée par la valeur au plateau horizontal de la courbe d'énergie en fonction du temps. L'énergie élastique est définie par la différence entre l'énergie d'impact et l'énergie absorbée. La force à laquelle l'amorçage de la fissuration matricielle se produit sera désignée dans cette étude  $F_{init}$ , l'effort maximal par  $F_{max}$  et le déplacement correspondant à l'effort

maximal par  $D_{\max}$ . L'augmentation de  $F_{\text{init}}$ ,  $F_{\text{max}}$  et  $D_{\text{max}}$  constituera le premier critère pour caractériser l'amélioration de la résistance à l'impact des plaques composites.

À 80 ° C, les résultats montrent que l'ajout des Nanostrength entraîne une diminution du module dynamique, probablement à cause de l'augmentation de la mobilité des chaînes de l'acrylique en présence des nanonodules d'élastomère. A 30 J et pour une température d'essai de 80 ° C,  $F_{\text{max}}$  diminue en présence des Nanostrength (contrairement à ce qui est observé à 20 ° C), tandis que  $D_{\text{max}}$  augmente légèrement à mesure que la concentration en Nanostrength augmente. L'analyse des courbes donnant l'évolution de l'énergie en fonction du temps permet de confirmer cette tendance. En effet, l'énergie absorbée diminue en présence des Nanostrength, témoignant ainsi d'une réduction de la dissipation d'énergie. La figure 3 présente les essais réalisés à la même température (80 ° C) et à des énergies plus élevées (40 J et 50 J). Il ressort de l'analyse de ces résultats que  $F_{\text{init}}$ ,  $F_{\text{max}}$  et  $D_{\text{max}}$  augmentent en présence des Nanostrength. A 40 J par exemple (figure 3a), l'effort  $F_{\text{max}}$  passe de 5698,7 N pour le composite Pure\_Acry / GF à 6101,7 N pour le composite Acry\_Nano10 / GF, ce qui représente une augmentation d'environ 7%. A la même énergie, l'amélioration en termes de  $D_{\text{max}}$  est approximativement égale à 18,1%. Le composite Acry\_Nano10 / GF présente l'amélioration la plus significative. Le composite Acry\_Nano10 / GF présente également l'énergie absorbée la plus faible (figure 3b). Les mêmes tendances en termes de  $F_{\text{max}}$ ,  $D_{\text{max}}$  et d'énergie absorbée, avec de légères amplifications sont obtenues à 50 J (Figures 3c et 3d).

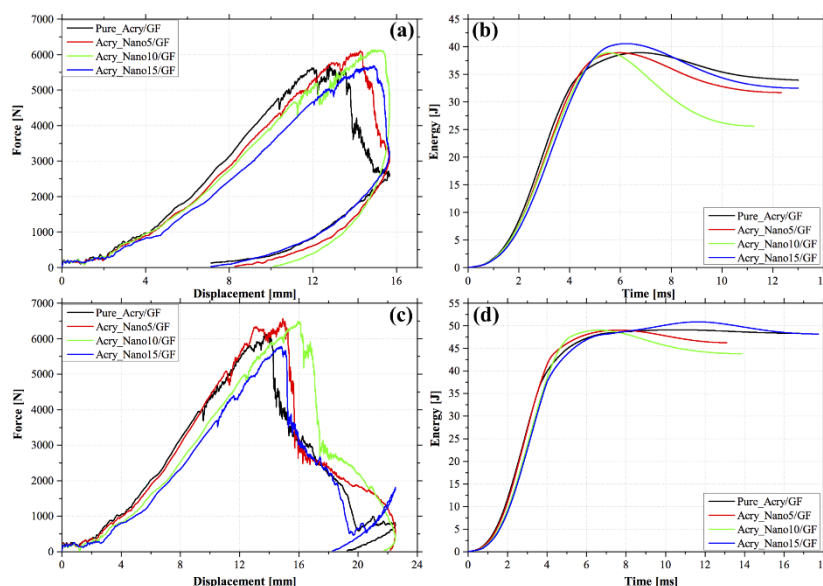


Figure 3: Effet de la concentration en Nanostrength sur les propriétés à l'impact des composites thermoplastiques acryliques renforcés par des fibres de verre, à 80 ° C: Courbes donnant l'évolution de la force en fonction du déplacement (a) et de l'énergie en fonction du temps (b) pour une énergie d'impact de 40 J; Courbes force-déplacement (c) et énergie-temps (d) pour une énergie d'impact de 50 J.

### 3.2 Analyse multi-échelle du comportement mécanique des composites stratifiés

La procédure adoptée pour la simulation numérique est résumée dans le diagramme suivant (Figure 4).

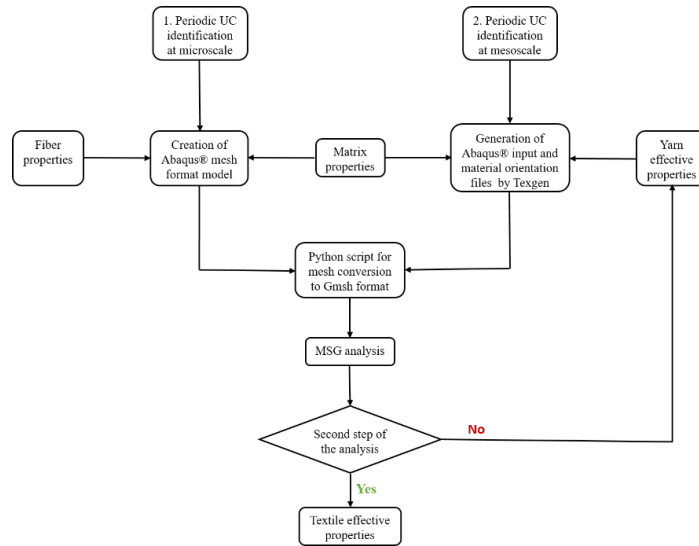


Figure 4. Diagramme de la procédure d'implémentation numérique

Tout d'abord, une cellule unité périodique (UC) est identifiée à chaque échelle. Ensuite on procède de manière séparée à la détermination des propriétés élastiques d'abord dans le toron puis dans le pli. Les propriétés du toron obtenues à partir de la première étape d'homogénéisation sont utilisées dans la deuxième étape pour le calcul des propriétés du pli. Il faut cependant rappeler que le code MSG développé permet d'activer ou non la périodicité dans n'importe quelle direction (x, y ou z).

### 3.2.1. Homogénéisation à l'échelle microscopique

Au niveau microscopique, les torons sont considérés comme un composite unidirectionnel (constitué d'une fraction volumique de fibres de verre d'environ 65%) noyée dans une résine acrylique. Au sein du MSG, les UC 2D sont suffisantes pour calculer les propriétés effectives de ces torons qui présentent une isotropie transverse. Ensuite, comme représentés sur les figures 5b et 5c, deux types de microstructures sont considérés. L'arrangement hexagonal à 2 fibres (figure 5c) est couramment adopté d'après [Jiang et al.\[3\]](#)

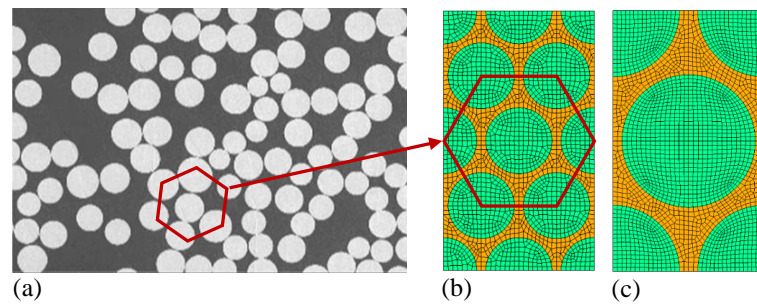


Figure 5. Structure hexagonale (a) microstructure, (b) maillage 2D à 8 fibres du VER, (c) Maille 2D à 2 fibres du VER

On suppose que les deux constituants, la matrice et les fibres de verre sont isotropes. Le module d'Young et le coefficient de Poisson de la fibre de verre sont respectivement  $E_f = 73.0$  GPa et  $\nu_f = 0.22$ . Pour la matrice acrylique, ses propriétés sont très proches de celles d'une résine PMMA. En nous appuyant sur les travaux de [Boufaïda et al.\[4\]](#), nous avons pris comme module d'Young  $E_m = 3.60$  GPa et comme coefficient de Poisson  $\nu_m = 0.37$ . Le tableau 1 présente les propriétés élastiques effectives du toron, calculées à l'aide



du code MSG et comparées à celles issues des travaux de Chamis [5], qui au moyen d'un ensemble d'équations de micromécanique a estimé les propriétés élastiques effectives des composites unidirectionnels.

**Table 1** : Propriétés élastiques effectives du toron

	2-fiber 2D	8-fiber 2D	Chamis [21]
Elements number	2397	2186	
Total CPU time (s)	1.381	1.249	
Young's modulus along fiber direction $E_1$ (GPa)	52.362	52.362	52.200
Transverse Young's modulus $E_2$ (GPa)	17.702	17.695	17.600
Transverse Young's modulus $E_3$ (GPa)	17.768	17.695	17.600
In-plane shear modulus $G_{23}$ (GPa)	6.452	6.377	-
Out of plane shear modulus $G_{13}$ (GPa)	6.179	6.155	6570
Out of plane shear modulus $G_{12}$ (GPa)	6.205	6.155	6570
Poisson's ratio $\nu_{23}$	0.388	0.387	-
Poisson's ratio $\nu_{13}$	0.258	0.258	0.265
Poisson's ratio $\nu_{12}$	0.258	0.258	0.265

Contrairement à ce qui était attendu, les propriétés effectives obtenues avec les éléments quadratiques quadrilatéraux (SC8) sur le VER à 2 fibres ne sont pas exactement isotropes transverses, même si les résultats sont très similaires. La solution a donc consisté à augmenter le nombre de fibres à 8, comme illustré sur la figure 5c. Le comportement prédit apparaît donc isotrope transverse. Les modules d'Young prédits sont légèrement supérieurs à ceux fournis par Chamis [5] avec un écart inférieur à 0,3%. Le module de cisaillement et le coefficient de Poisson sont également légèrement plus grands que la prédiction analytique avec un écart inférieur à 7%. Notre approche est cependant plus avantageuse, en ce sens qu'elle permet d'estimer simultanément les cinq constantes indépendantes au moyen d'un seul calcul, avec un temps CPU relativement faible (temps CPU: 1,249s). Après estimation des propriétés effectives du toron, ces dernières vont ensuite servir à la détermination des propriétés du pli, ce qui constitue la deuxième étape d'homogénéisation.

### 3.2.2 Homogénéisation aux échelles mésoscopique et macroscopique

A l'échelle mésoscopique, les textures topologiques et morphologiques réalistes du composite ont été prises en compte à l'aide du logiciel Texgen. TexGen est un logiciel gratuit permettant de générer en 3D les différentes couches d'un composite tissé. Prenant en compte la morphologie des renforts (dans notre cas, des renforts tissés) Texgen permet également d'entrer les propriétés mécaniques et les spécificités du tissu (diamètres des fibres, espacement du taffetas, etc...) et enfin de générer un fichier .inp, qu'un logiciel d'éléments finis est capable d'interpréter. Couplé au code SwiftComp par une équipe de chercheurs de l'Université de Purdue, TexGen4SC est capable, à partir des géométries indiquées et des propriétés mécaniques introduites, de calculer les propriétés effectives du composite stratifié. La figure 6 représente une vue tomographique (figure 6a) obtenue par microtomographie aux rayons X (EasyTom Nano, Rx SOLUTIONS) avec une puissance de faisceau de rayons X maximale de 160 kW et le modèle géométrique correspondant obtenu à partir du logiciel Texgen (figure 6b). La résolution spatiale maximale atteinte par le faisceau de rayons X est de 0.5  $\mu m$  . L'échantillon que nous avons utilisé comportait douze plis et a été inspecté à 90kV. Comme l'orientation du matériau varie le long du trajet du toron [6], une description précise a été réalisée grâce au logiciel Texgen. Les détails de l'orientation du matériau à l'aide des coordonnées des éléments peuvent être trouvés dans les travaux de Liu et al. [6].

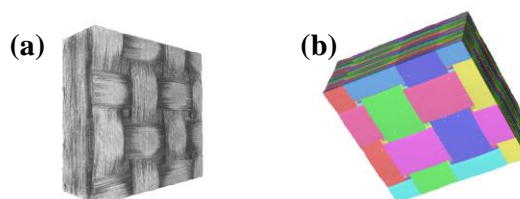


Figure 6. (a) Vue tomographique d'un échantillon de 12 plis 3x3, (b) Modèle géométrique Texgen correspondant

A ce stade, l'UC considérée pour la simulation est un toron 2x2 noyé dans une matrice acrylique isotrope. Le logiciel Texgen a ensuite été utilisé pour générer un fichier de maillage voxel avec une orientation matérielle locale pour chaque élément au format Abaqus. Des éléments quadratiques hexaèdres 50x50x20 (C3D8R) ont été générés. Cette entrée a été convertie en utilisant un script python développé pour obtenir un fichier Gmsh avec un set pour chaque élément.

### 3.3 Simulation numérique d'un essai d'impact basse vitesse sur un composite stratifié

Pour tester la pertinence des prédictions du modèle proposé, une simulation numérique d'une structure composite stratifiée soumise à un impact basse vitesse a été réalisée. A cet effet, un modèle d'endommagement a été introduit pour simuler les mécanismes de rupture intralaminare (fissuration de la matrice, rupture des fibres) et le décollement interlaminaire (le délaminage).

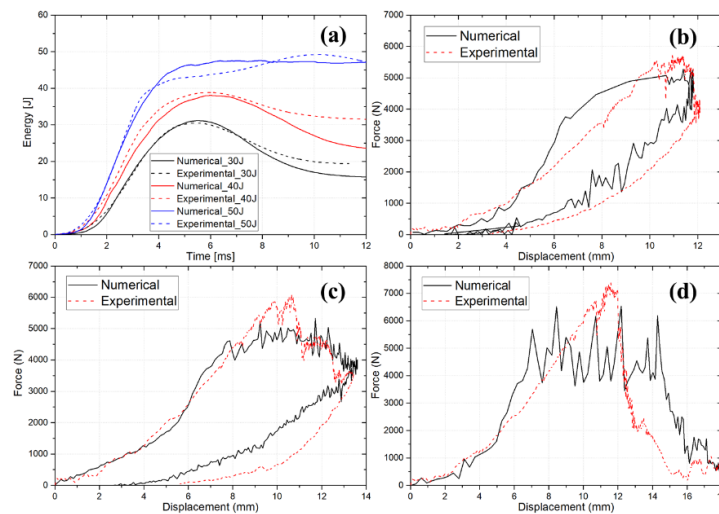


Figure 7. (a) Energie en fonction du temps, (b) courbes force déplacement à 30J, (c) courbes force déplacement à 40J, (d) courbes force déplacement à 50J

La figure 7 représente la force en fonction du déplacement et l'énergie en fonction du temps tel que prédit par les simulations numériques de l'impact basse vitesse. Ces prédictions ont été comparées aux données expérimentales issues de nos anciens travaux (Matadi Boumbimba et al.[7]) et réalisés sur le même type de composites stratifiés. Pour ce qui concerne la force en fonction du temps, on note comme observé expérimentalement, une phase pseudo-linéaire au début avec une augmentation monotone de la force, correspondant à la flexion élastique de la plaque. Puis l'apparition des premières petites oscillations témoignant de la survenue de premiers dommages (fissuration de la matrice). À la valeur maximale de la déflexion de la plaque, la force atteint également sa valeur maximale. Les prédictions numériques sont en accord avec les données et les observations expérimentales, comme en témoigne la figure 8.

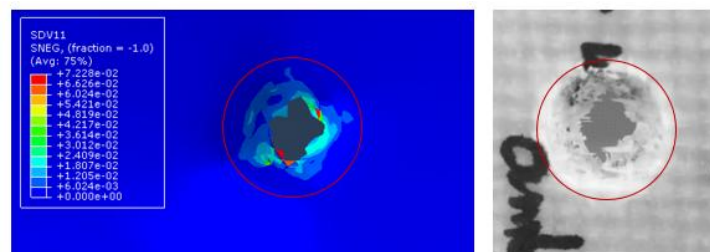


Figure 8. Face arrière d'une plaque impactée à 50J: répartition de la déformation plastique (simulation à gauche), (expérimentale à droite)

## 4. Conclusion

L'ajout des Nanostrength dans la résine acrylique conduit à l'amélioration du comportement à l'impact du composite stratifié. Dans cette étude, la « Mécanique de la Structure Génome »(MSG) a été utilisé pour la prédiction du comportement mécanique d'un composite tissé à travers une homogénéisation numérique multi-échelle. La méthode MSG découverte récemment unifie la micromécanique et la mécanique des structures pour prédire les propriétés effectives d'une structure en termes de microstructures sans séparation inutile des échelles. Les principaux avantages de cette méthode par rapport aux approches micromécaniques classiques sont sa polyvalence, sa précision et sa capacité à prendre en compte les microstructures complexes et toute forme d'anisotropie. Les résultats d'homogénéisation comparés pour différents VER se sont révélés très proches et en accord avec un modèle de référence et des données expérimentales. Pour tester la pertinence de la méthode d'homogénéisation numérique proposée, ses résultats ont ensuite été utilisés pour la simulation de la réponse à l'impact basse vitesse d'un composite stratifié. Un bon accord a été obtenu entre les prédictions de l'approche numérique et les données expérimentales quelle que soit l'énergie considérée. De plus, le délaminage a été simulé à l'aide d'éléments cohésifs et d'un modèle d'endommagement approprié couplé à un critère de rupture permettant de simuler l'endommagement de la zone cohésive.

## Bibliographie

- [1] Denneulin S, Viot P, Leonardi F, Lataillade J-L. The influence of acrylate triblock copolymer embedded in matrix on composite structures' responses to low-velocity impacts. *Composite Structures*. 2012;94:1471-81.
- [2] Matadi Boumbimba R, Froustey C, Viot P, Olive JM, Léonardi F, Gerard P, et al. Preparation and mechanical characterisation of laminate composites made of glass fibre/epoxy resin filled with tri bloc copolymers. *Composite Structures*. 2014;116:414-22.
- [3] Ramakrishnan KR, Guérard S, Viot P, Shankar K. Effect of block copolymer nano-reinforcements on the low velocity impact response of sandwich structures. *Composite Structures*. 2014;110:174-82.
- [4] Boufaïda, Z., et al., Mesoscopic strain field analysis in a woven composite using a spectral solver and 3D-DIC measurements. *Composite Structures*, 2017. 160: p. 604-612
- [5] Chamis, C.C., Simplified Composite Micromechanics equations for hygral , thermal and mechanical properties, in Conference of the society of the plastics Industry Reinforced Plastics/Composite Inst. 1983: United States;.
- [6] Liu, X., et al., Two-step homogenization of textile composites using mechanics of structure genome. *Composite Structures*, 2017. 171: p. 252-262.
- [7] Matadi Boumbimba, R., et al., Glass fibres reinforced acrylic thermoplastic resin-based tri-block copolymers composites: Low velocity impact response at various temperatures. *Composite Structures*, 2017. 160: p. 939-951.