Etude numérique de la propagation de fissure dans un composite tissé

Pierre Journoud, Christophe Bouvet, Samuel Rivallant, Nicolas Dubary, Léon Ratsifandrihana

▶ **To cite this version:**

Pierre Journoud, Christophe Bouvet, Samuel Rivallant, Nicolas Dubary, Léon Ratsifandrihana. Etude numérique de la propagation de fissure dans un composite tissé. 21ème Journées Nationales sur les Composites, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) - Bordeaux, Jul 2019, Bordeaux, Talence, France. hal-02421568

HAL Id: hal-02421568
https://hal.science/hal-02421568

Submitted on 20 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude numérique de la propagation de fissure dans un composite tissé

Numerical study of the crack growth in a woven composite

Pierre Journoud[1,2], Christophe Bouvet[1], Samuel Rivallant[1], Nicolas Dubary[2], Léon Ratsifandrihana[2]

1 : ISAE-SUPAERO, Institut Clément Ader (UMR CNRS 5312)
Université de Toulouse
10 av. E. Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France
e-mail : christophe.bouvet@isae.fr, samuel.rivallant@isae.fr

2 : SEGULA AEROSPACE & DEFENCE,
SEGULA TECHNOLOGIES
Immeuble EQUINOX, Bat-1, 24 Boulevard Déodat de Séverac, 31770 Colomiers, France
e-mail : pierre.journoud@segula.fr, nicolas.dubary@segula.fr, leon.ratsifandrihana@segula.fr

Résumé

Grâce à leurs faibles masses et leurs hautes propriétés mécaniques, les composites sont des matériaux de plus en plus utilisés dans de nombreux domaines, notamment dans l'aéronautique. Néanmoins, les structures composites sont particulièrement vulnérables vis-à-vis des sollicitations hors plan. Les recherches [1-3] ont montré des différences significatives entre composites unidirectionnels et tissés. Grâce à leurs architectures et aux mécanismes de diffusion des efforts, les tissés possèdent de meilleures propriétés en sollicitation hors plan que les unidirectionnels [4]. Ils présentent donc un intérêt non négligeable pour les constructeurs aéronautiques ; cependant leurs mécanismes de rupture restent complexes.

Dans ce travail nous nous proposons d'étudier les mécanismes de ruptures des composites tissés. Pour cela nous avons utilisé le modèle numérique développé à l'Institut Clément Ader depuis une dizaine d'années, le Discrete Ply Model (DPM), afin de simuler des essais de traction sur éprouvettes tissées avec et sans pré-entaille. Le but est d'étudier la propagation de fissures translaminaires et d'améliorer la compréhension des mécanismes d'endommagements. Nous nous sommes notamment intéressés à la prise en compte du taux de restitution d'énergie critique en rupture de fibres en mode I et II, à la plasticité en cisaillement ainsi qu'à l'effet des points de tissages.

Abstract

Thanks to their low mass and high performances, composites draw an increasing interest in many fields, such as aeronautics. Nevertheless, composites structures are particularly vulnerable to out-of-plane solicitations. Research [1-3] have shown differences between woven and unidirectional composites. Woven composites have better damage tolerances thanks to textile architecture and mechanisms of effort diffusion [4]. Moreover, they have better properties on out-of-plan solicitations and a greater dissipative power than unidirectional composites. Woven composites have shown a particular interest for aeronautical manufacturers, yet their breaking mechanisms remain complex.

This study is focused on failure mechanisms of woven composite. We used the numerical model which has developed at the Institute Clement Ader over the last years called Discrete Ply Model (DPM), with the aim of simulating tensile tests on notched and unnotched specimens of woven composites. The objective is to study translaminar crack growth propagations and improve the understanding of failure mechanism. We take into consideration the critical energy release rate of the fiber failure in mode I and II, the shearing plasticity and the effect of weaving point.

Mots Clés : propagation de fissure translaminaire, rupture de fibres, simulation numérique, stratifié tissé
Keywords : translaminar crack propagation, fiber failure, numerical simulation, woven laminate

1. Introduction

Afin de dimensionner des structures composites stratifiées tissées à la tolérance aux dommages, il est nécessaire de déterminer le taux de restitution d'énergie critique de fissures translaminaires et de mettre en place des modélisations de propagation de ces fissures. Néanmoins, la rupture translaminaire des composites stratifiés tissés est un phénomène complexe et la ténacité de ce type de fissures reste difficile à évaluer [5]. L'objectif de ce travail est de simuler la rupture translaminaire d'un stratifié tissé verre / époxy, et en particulier de rendre compte du trajet de la fissure.

Dans le présent travail, nous nous sommes appuyés sur les résultats expérimentaux de quatre types d'essais de traction réalisés par T. Lisle [6] lors de ses travaux de thèse. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes verre / époxy tissées en satin de 8. Deux essais de traction sur éprouvettes saines $[0/90]_2$ et $[\pm45]_2$ ainsi que deux essais de traction sur des éprouvettes pré-entaillées de mêmes drapages ont été étudiés et simulés afin d'étudier les mécanismes d'endommagement et la propagation de fissure dans les échantillons.

La géométrie des éprouvettes, les dimensions des zones d'application des conditions aux limites et la longueur de la pré-entaille ont été étudiées par T. Lisle [6] afin d'obtenir une propagation de fissure stable. Deux géométries d'éprouvettes ont été utilisées, l'une pour les essais de traction sur éprouvettes pré-entaillées (Fig. 1. a) et l'autre pour les essais de traction sur éprouvettes saines (Fig. 1. b). Le tissu utilisé lors de ces travaux, un satin de 8, implique la présence d'un chemin préférentiel de fissure translaminaire induit par les points de tissage (Fig. 2 et 3) formant un angle d'environ 30° avec la direction de la pré-entaille pour un stratifié ±45°.

L'objet de cette étude est de déterminer les paramètres discriminants à prendre en compte dans notre modélisation, dans quelles proportions et quelles sont leurs influences sur la propagation de la fissure dans l'éprouvette.

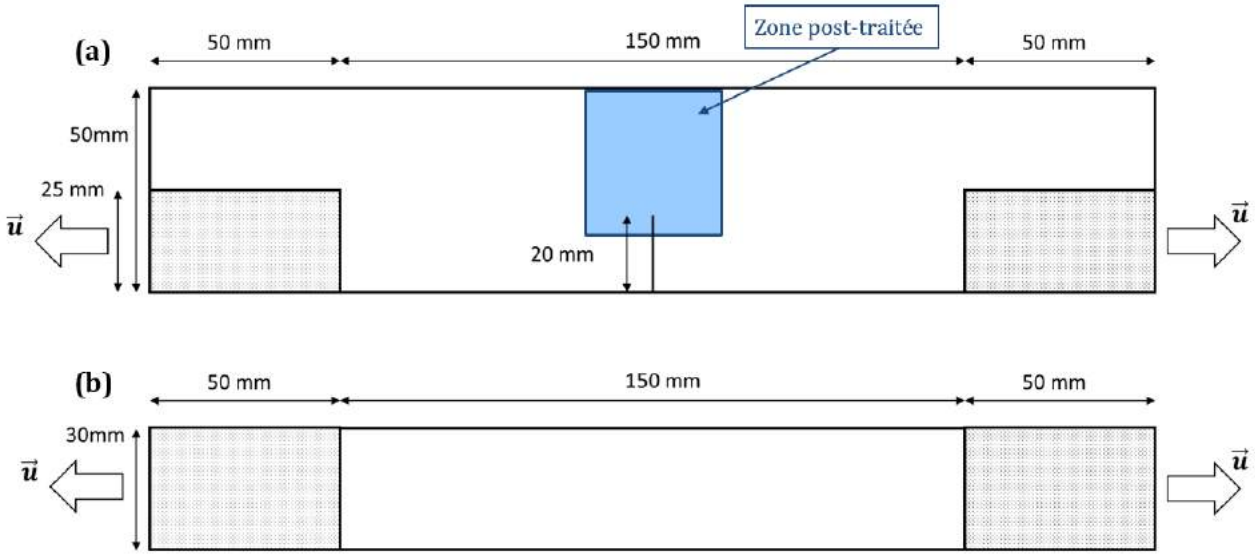

Fig. 1 : Géométrie d'éprouvette (a) avec pré-entaille, (b) éprouvette saine

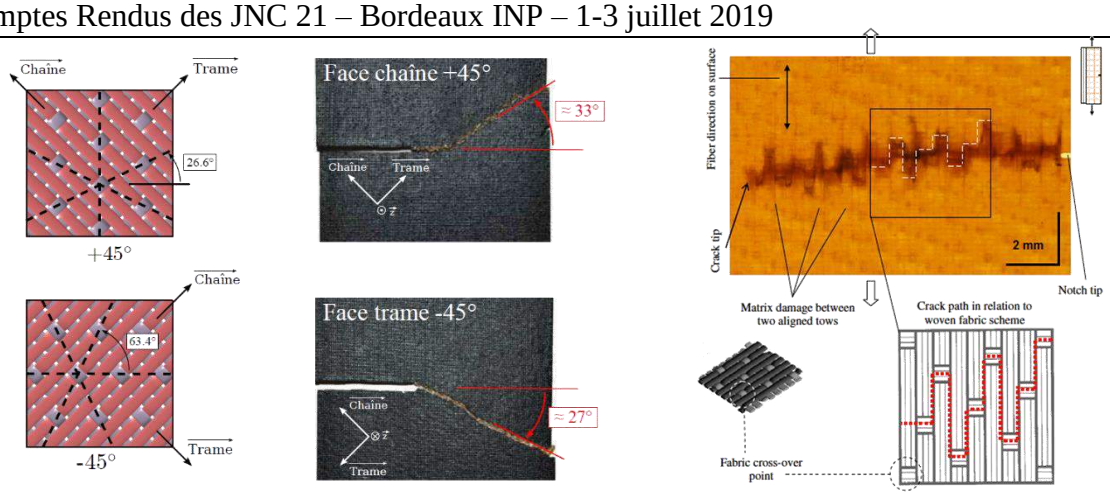

Fig. 2 : a. Propagation de fissure d'un stratifié $[\pm 45]_2$ vue depuis les faces chaîne et trame [6], b. Propagation de fissure pour un essai de fatigue sur stratifié tissé verre/époxy $[0]_2$ [7]

2. Résultats expérimentaux

2.1 Essais de traction sur éprouvettes [45°] avec pré-entaille

Cet essai s'intéresse à la direction de propagation de la fissure, à la zone endommagée/plastifiée qu'elle engendre, ainsi qu'à la courbe effort/déplacement. Les essais expérimentaux ont démontré que pour une orientation à ±45°, le tissu utilisé présente un chemin préférentiel qui suit les points de tissage (Fig. 2 a.). La fissure se propage ainsi en formant un angle d'environ 30° avec la direction de la pré-entaille. La propagation de fissure engendre une zone d'endommagement plastique, correspondant au champ de source de chaleur cumulé (Fig. 3), diffuse autour de celle-ci.

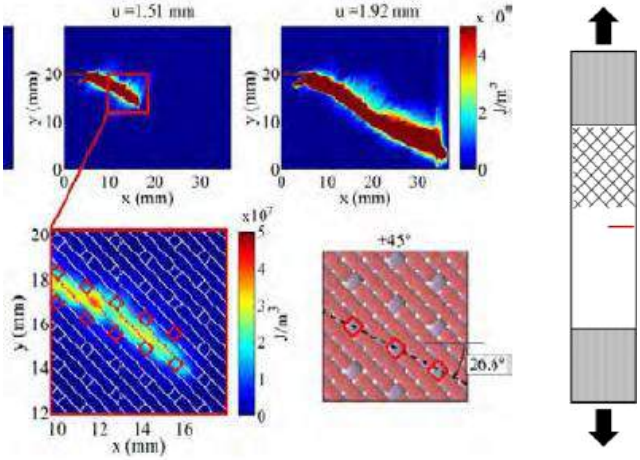

Fig. 3 : Champ de source de chaleur cumulé traduisant la zone d'endommagement plastique [6]

Lors de cet essai on distingue trois zones sur courbe effort/déplacement (Fig. 4) :

- **Zone 1** : pour un déplacement jusque 0,67 mm, correspondant à la partie linéaire ou aucun endommagement n'apparait et où la fissure ne se propage pas ;
- **Zone 2** : pour un déplacement compris entre 0,67 et 1,05 mm ; c'est la partie durant laquelle les premiers endommagements apparaissent en pointe de fissure mais sans propagation macroscopique de la pré-entaille. La courbe effort/déplacement présente une perte de rigidité au début de cette zone ;
- **Zone 3** : pour un déplacement au-delà de 1,05 mm ; c'est la partie pendant laquelle la pré-entaille initiale se propage et où la courbe effort/déplacement chute au fur et à mesure que la fissure se propage.

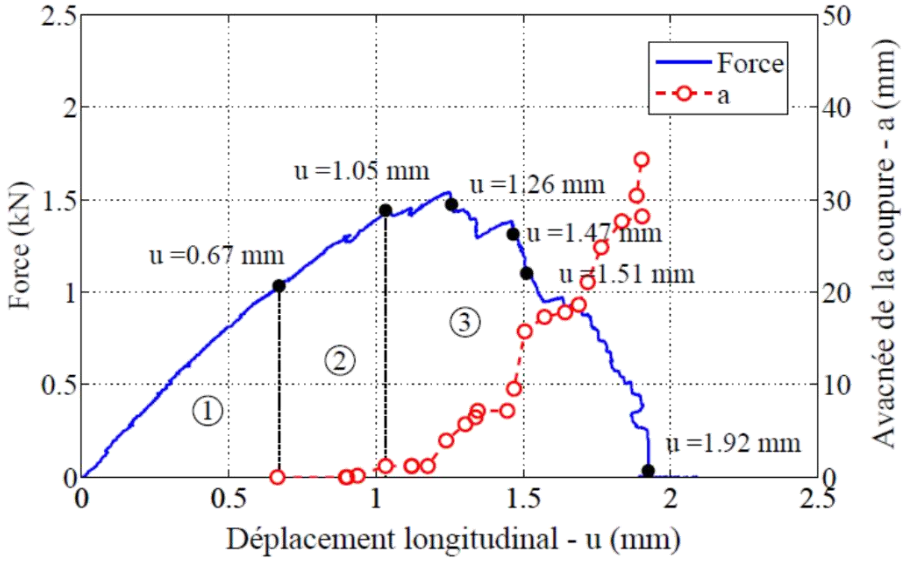

Fig. 4 : Courbe effort/déplacement pour une éprouvette [45°] pré-entaillée [6]

2.2 Essais de traction sur éprouvette [0°] avec pré-entaille

Cet essai est réalisé dans le but d'étudier la propagation de fissure et la zone endommagée de l'éprouvette en pointe de fissure sur un drapage à 0°. Expérimentalement, la fissure se propage dans la direction de la pré-entaille. La zone endommagée est diffuse sur une largeur d'environ 5 mm, de part et d'autre de la fissure, soit une largeur totale d'environ 10 mm (Fig. 5). La fissure se propage en suivant les points de tissage et n'est pas parfaitement rectiligne. Elle commence par les points de tissage 1 et 2 (Fig. 6) puis change de direction pour endommager le point 3. La propagation de fissure suit un schéma en « zig-zag » formant dans l'ensemble un angle à 0° par rapport à la direction de la pré-entaille. D'après les données expérimentales, il semblerait que les premiers points de tissage à rompre fassent partir la fissure avec un angle de 17°. Puis après le septième point de tissage rompu, la fissure continue dans la même direction sans dévier avant de reprendre un chemin en « zig-zag » comme précédemment, se ramenant dans la direction de la pré-entaille.

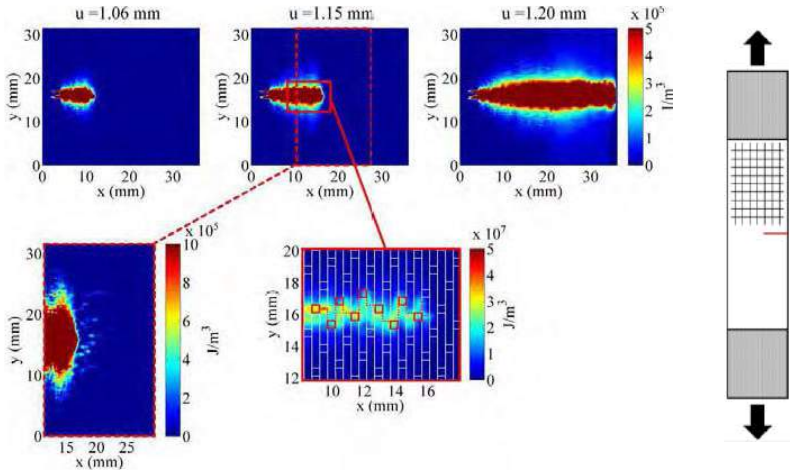

Fig. 5 : Champ de source de chaleur cumulé traduisant la zone d'endommagement plastique [6]

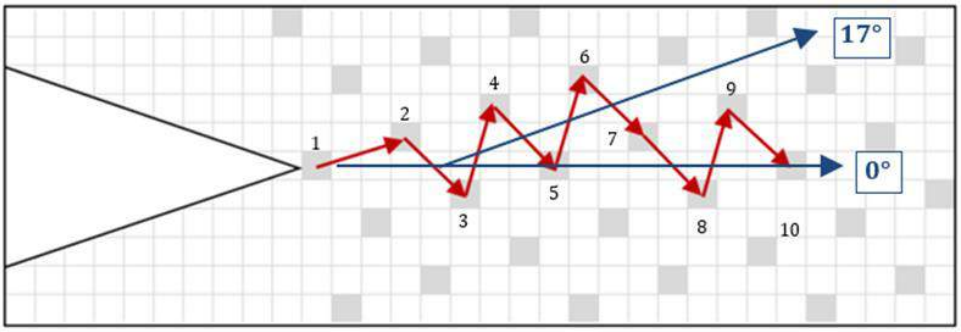

Fig. 6 : Schéma de propagation de fissure au niveau des points de tissage

Comme pour l'essai sur éprouvette à ±45° pré-entaillée, la courbe effort/déplacement comporte trois zones distinctes. La rupture arrive pour un déplacement plus faible d'environ 1,2 mm ; l'effort maximum est bien plus important (2 kN). La propagation de la fissure s'initie au début de la phase 3 vers 0,75 mm de déplacement et se propage brutalement jusqu'à arriver à un déplacement de 1,18 mm (Fig. 7).

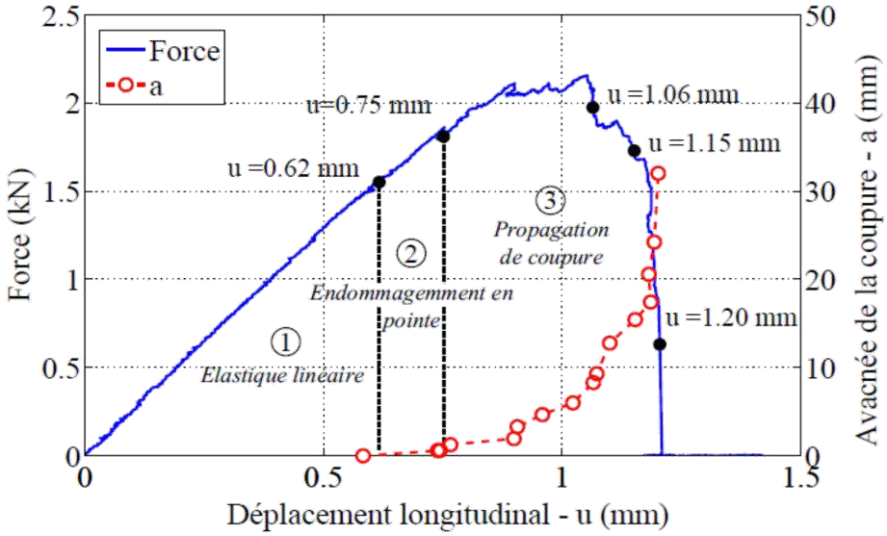

Fig. 7 : Courbe effort/déplacement éprouvette [0°] pré-entaillée [6]

2.3 Essais de traction sur éprouvette [45°] sans pré-entaille

Cet essai met en évidence une apparition de la plasticité en cisaillement plan pour une distorsion angulaire d'environ 1% qui tend vers une asymptote horizontale pour une distorsion de 4,2% ; valeur après laquelle la contrainte en cisaillement n'augmente que très faiblement (Fig. 8) et où l'on observe une plasticité importante.

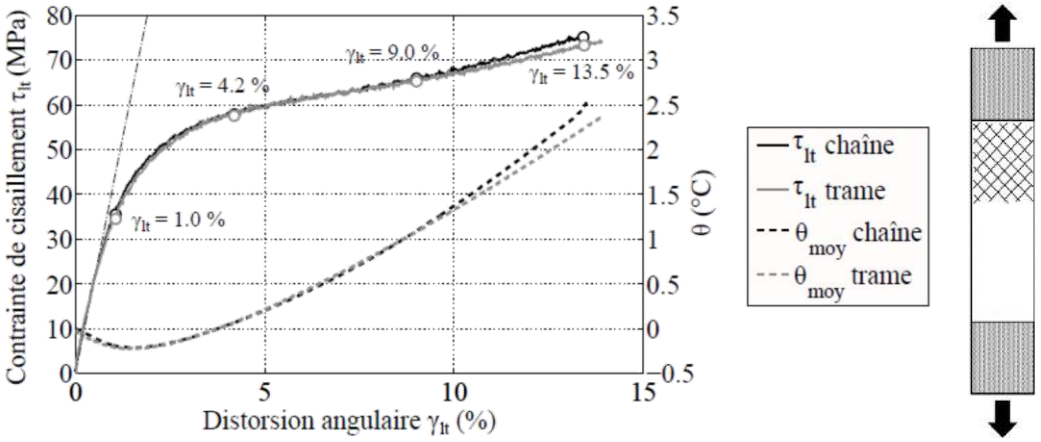

Fig. 8 : Courbe contrainte/déformation de l'essai de traction sur [45°] sans pré-entaille [6]

2.4 Essais de traction sur éprouvette [0°] sans pré-entaille

Cet essai permet de faire apparaitre un point d'inflexion sur la courbe effort/déplacement, appelé « knee-point » correspondant à une baisse de rigidité. Expérimentalement le « knee-point » apparait pour une déformation de 0,8% dans le sens chaîne et pour 0,6% dans le sens trame [6]. Les essais expérimentaux menés montrent qu'il apparait pour une déformation d'environ 0,67% et conduit à une baisse de rigidité de 6 GPa avant que la rupture finale intervienne pour une déformation à rupture de 2,2% (Fig. 9).

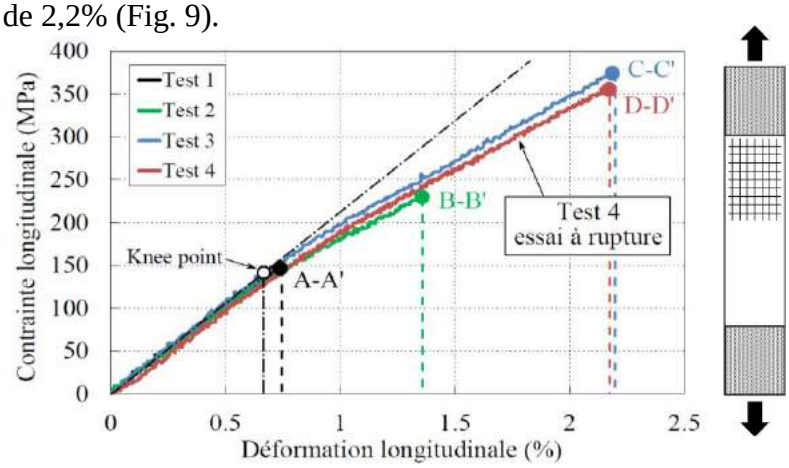

Fig. 9 : Courbes contrainte/déformation longitudinales expérimentales pour éprouvette à [0°] sans pré-entaille [6]

3. Modélisations numériques

3.1 Première loi de comportement mise en place

Nous avons mis en place une première loi de comportement (V0) permettant de prendre en compte le taux de restitution d'énergie mode I et en mode II avec comme hypothèse que le taux de restitution d'énergie critique en mode II était égale à deux fois celui en mode I ainsi qu'un couplage linéaire :

$$\frac{G_I^{fibre,l}}{G_{Ic}^{fibre,l}} + \frac{G_I^{fibre,t}}{G_{Ic}^{fibre,t}} + \frac{G_{II}^{fibre}}{G_{IIc}^{fibre}} = 1$$

Cependant, cette première loi de comportement ne permettait pas de rendre compte ni de la plasticité en cisaillement plan mise en évidence par l'essai de traction sur éprouvette à ±45° sans pré-entaille, ni de la propagation de fissure suivant un chemin préférentiel induit par les points de tissage. De plus, des simulations d'essais de traction sur éprouvette à ±45° et 0° avec pré-entaille montrent une propagation de fissure prématurée par rapport à l'expérimental (Fig. 10 et 13). Sur

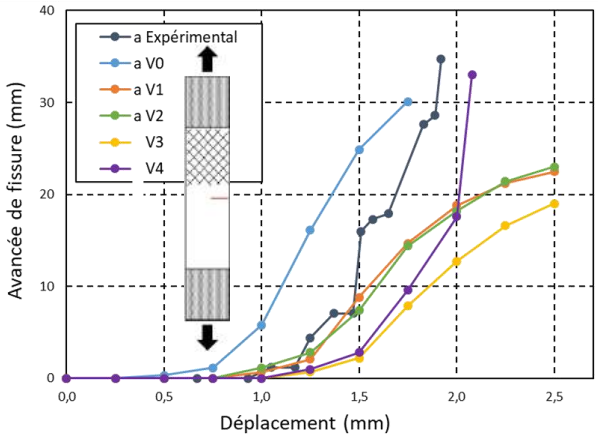

Fig. 10 : Avancée de la fissure en fonction du déplacement imposé, éprouvette à ±45° avec pré-entaille

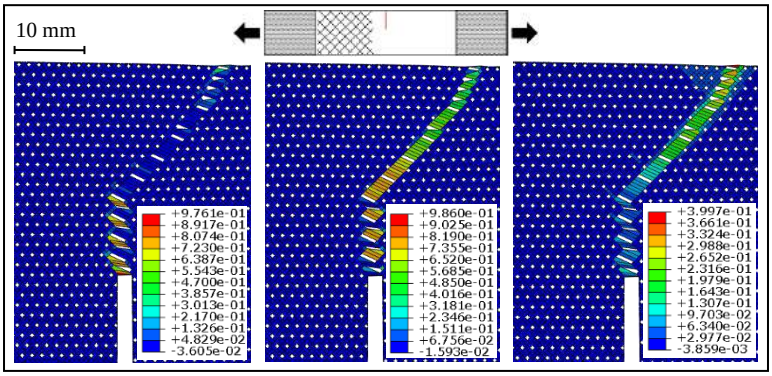

Fig. 11 : Pour un déplacement de 2,0 mm, taux de restitution d'énergie : (a) mode I longitudinal, (b) mode I transverse, (c) mode II

l'éprouvette à ±45° l'effort maximal correspond à la valeur expérimentale, environ 1,5 kN (Fig. 12), alors que pour l'éprouvette à 0° l'effort maximal est en deçà de l'effort expérimental, environ 1,8 kN pour 2,1 kN expérimentalement (Fig. 15).

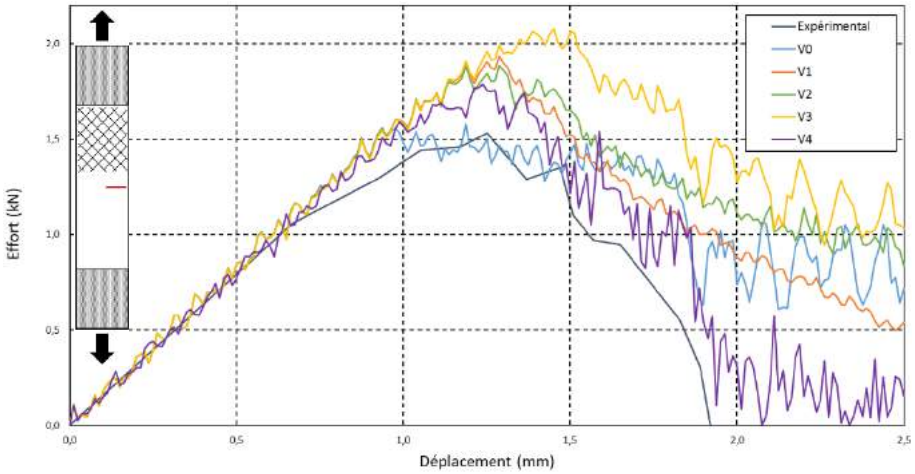

Fig. 12 : Comparaison courbes effort/déplacement issues des différentes lois de comportement matériau, éprouvette à 45° avec pré-entaille

3.2 Seconde loi de comportement mise en place

Nous avons implémenté une seconde loi de comportement (V1) permettant de prendre en compte non plus le taux de restitution en mode II, mais la plasticité en cisaillement plan :

$$\tau_{lt} = G_{lt}(\gamma_{lt} - \gamma_{lt}^{p})$$

Cependant cela ne permettait toujours pas de retrouver une propagation de fissure suivant les points de tissage, nous avons alors rajouté la prise en compte des effets des points de tissage. Pour cela nous avons dans un premier temps appliqué une baisse de 20% sur la déformation à rupture et de 40% sur la ténacité de rupture des fibres en traction des éléments correspondant aux points de tissage, loi de comportement notée V2. Nous considérons que les points de tissage correspondent à des points faibles du tissu. Ainsi, nous avons obtenu une propagation de fissure à environ 28° ce qui correspond aux observations expérimentales. Néanmoins, la propagation de fissure de l'essai de traction sur éprouvette ±45° avec pré-entaille ne traverse par l'éprouvette dans toute sa largeur et ne parvient pas à la rupture totale de l'éprouvette (Fig. 10).

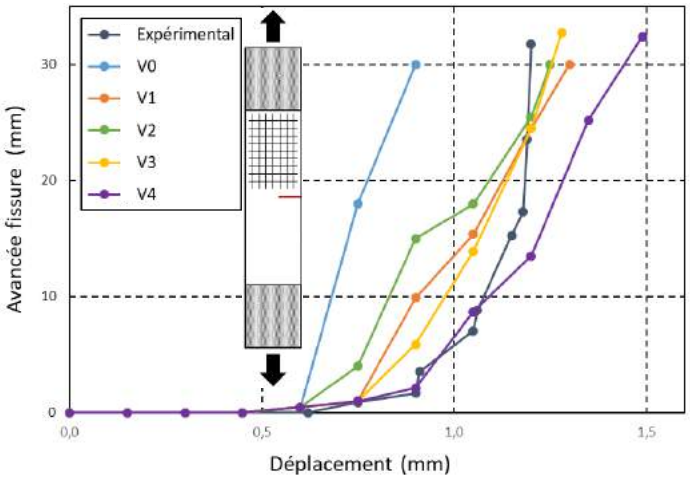

Fig. 13 : Avancée de la fissure en fonction du déplacement imposé, éprouvette à 0° avec pré-entaille

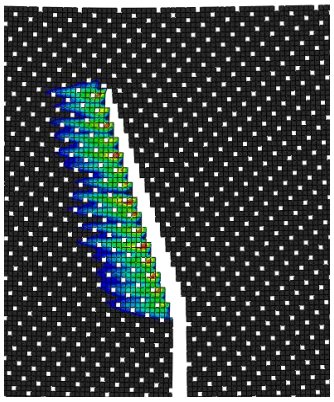

Fig. 14 : Propagation de fissure pour un déplacement de 1,5 mm

La simulation de l'essai sur éprouvette [45°] sans pré-entaille met en évidence la plasticité en cisaillement plan corrélant avec l'expérimental (Fig.16). L'essai sur éprouvette à 0° sans pré-entaille montre une propagation de fissure qui concorde avec l'expérimental mais celui sur éprouvette sans pré-entaille ne met pas en évidence de « knee-point » (Fig.17).

Nous avons ensuite augmenté la baisse de propriété à 80% pour la déformation à rupture des éléments relatifs aux points de tissage, sans modifier la baisse de propriété de la ténacité à rupture de fibre, loi de comportement (V3). Cela a eu un impact seulement sur l'essai de traction sur éprouvette à 0° sans pré-entaille et a permis de retrouver la baisse de rigidité induite par le « knee-point » (Fig. 17). La courbe contrainte/déformation longitudinale corrèle parfaitement avec la courbe expérimentale.

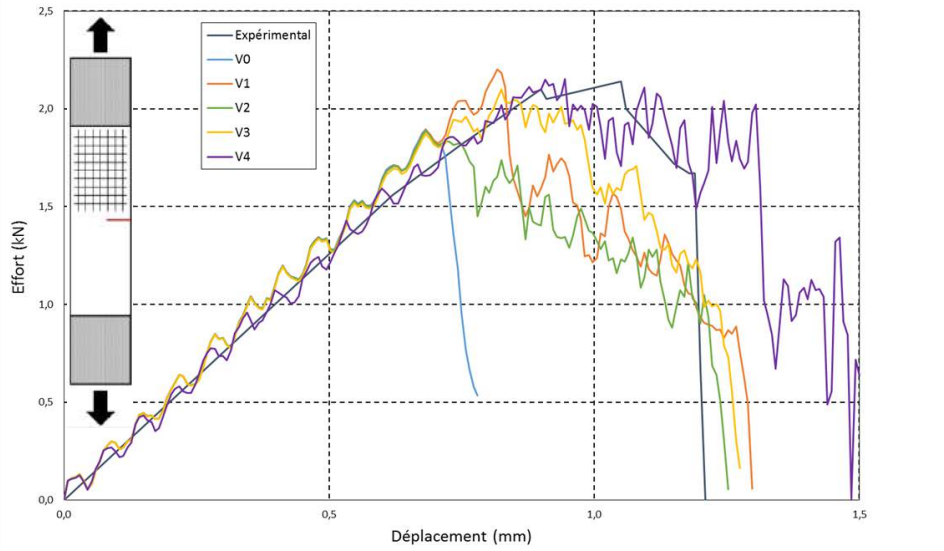

Fig. 15 : Comparaison courbes effort/déplacement issues des différentes lois de comportement matériau, éprouvette à 0° avec pré-entaille

3.3 Dernière loi de comportement mise en place

Nous nous sommes proposés de prendre en compte la plasticité en cisaillement plan, le taux de restitution d'énergie en mode II avec ($\boldsymbol{G_{IIc}^{fibre} = 2G_{Ic}^{fibre}}$) ainsi que le motif des points de tissage en appliquant une baisse de 35% sur la déformation à rupture et sur la ténacité à rupture de fibres en traction des éléments correspondant aux points de tissage (V4).

La simulation de l'essai de traction sur éprouvette à ±45° avec pré-entaille montre une propagation de fissure correspondant à l'expérimental (Fig. 10) mais avec un léger retard. La fissure commence à se propager dans la direction de la pré-entaille avant de bifurquer et de former un angle d'environ 40° avec celle-ci (Fig. 11). On remarque que le début de la propagation de fissure est piloté par le taux de restitution en mode I longitudinal (Fig. 11 a). Puis c'est le mode I transverse qui pilote la seconde partie et pour finir c'est le mode II qui pilote la fin de la propagation de fissure (Fig. 11 c). Cela met en évidence l'importance de prendre en compte le taux de restitution d'énergie en mode II des fissures translaminaires et explique pourquoi nous n'arrivions pas à la rupture de toute la largeur de l'éprouvette lorsque nous ne prenions pas en compte celui-ci (Partie 3.1 et 3.2). De plus, le fait d'appliquer une baisse de propriété de la déformation à rupture et de la ténacité de rupture de fibres en traction sur les éléments correspondants aux points de tissage permet de retrouver une propagation de fissure suivant un chemin préférentiel, bien que celui-ci ne forme pas un angle identique à l'expérimental. La courbe effort/déplacement (Fig. 12) de cet essai est semblable à l'expérimental mais l'effort maximal reste trop important d'environ 0,3 kN par rapport à la valeur expérimentale.

L'essai de traction sur éprouvette à 0° avec pré-entaille est bien représenté avec une initiation de la fissure pour un déplacement équivalent à l'expérimental (Fig. 13) ainsi qu'un effort maximal identique à la valeur expérimentale (Fig. 15). Cependant, la rupture finale n'est pas assez brusque et intervient pour un déplacement de 0,3 mm plus important que l'expérimental. On constate également que la fissure se propage en formant un angle d'environ 17° avec la direction de la pré-entaille (Fig. 14) ce qui peut s'expliquer par le non changement de direction après la rupture du septième point de tissage mis en évidence dans la partie 2.2.

L'essai de traction sur éprouvette ±45° sans pré-entaille est fidèle à l'approximation bilinéaire jusqu'à une distorsion angulaire de 1,3% et fait apparaitre ensuite un plateau horizontal à une valeur de 55 MPa (Fig. 16). Cela s'explique par la prise en compte simultanée de la plasticité en cisaillement plan et du taux de restitution d'énergie en mode II, correspondant également à du cisaillement, dans cette dernière loi de comportement.

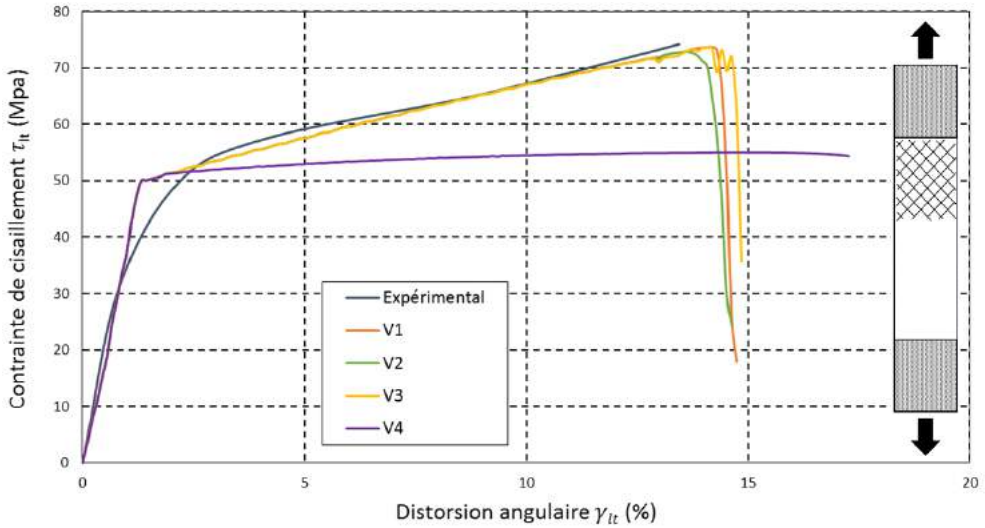

Fig. 16 : Comparaison courbes contrainte/distorsion angulaire issues des différentes lois de comportement matériau, éprouvette à ±45° sans pré-entaille

L'essai de traction sur éprouvette 0° sans pré-entaille ne permet plus, avec cette dernière loi de comportement, de retrouver un effet du « knee-point » (Fig. 17). Il est pressenti qu'en menant une étude de sensibilité sur les différents paramètres de déformation à rupture et de ténacité de rupture de fibres en traction des éléments correspondant aux points de tissage, on puisse retrouver cet effet du « knee-point ».

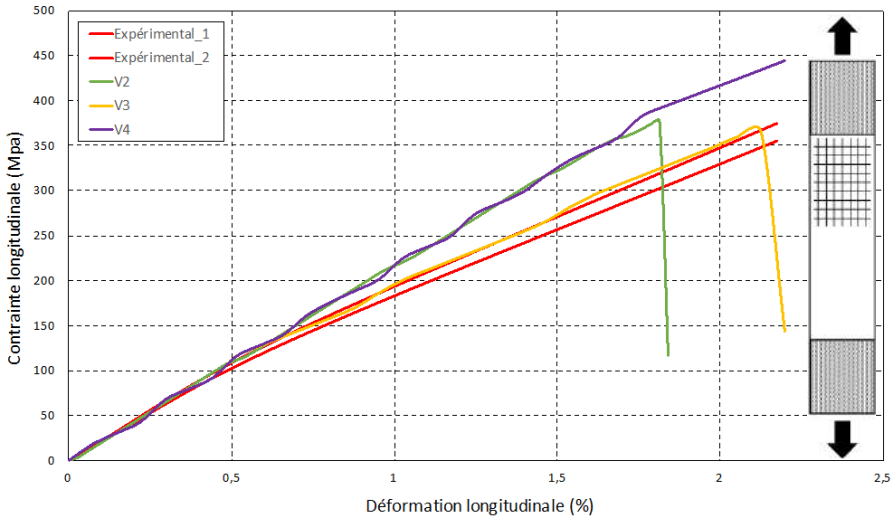

Fig. 17 : Comparaison courbes contrainte/déformation longitudinale issues des différentes lois de comportement matériau, éprouvette à 0° sans pré-entaille

Conclusion

Ce travail nous a permis de mettre en évidence la nécessité de prendre en compte à la fois la plasticité en cisaillement plan, le taux de restitution d'énergie en mode I et en mode II ainsi que l'effet des points de tissage afin de retranscrire fidèlement tous les mécanismes de propagation de fissure translaminaire dans une éprouvette tissée. Le modèle se montre sensible à la variation de différents paramètres comme les taux de restitution d'énergie critiques en mode I et en mode II ; mais également à la baisse de propriétés de déformation à rupture et de ténacité à rupture appliquée sur les éléments correspondant aux points de tissage. Il est pressenti qu'une étude de sensibilité sur ces quatre paramètres permettrait d'obtenir des simulations plus proches des résultats expérimentaux, notamment en faisait apparaitre l'effet du « knee-point » sur l'essai de traction sur éprouvette à 0° sans pré-entaille. Néanmoins, le modèle permet dès à présent de fournir des résultats probants.

Remerciements

Les auteurs remercient CALMIP (CALcul en MIdi-Pyrénées) pour l'accès aux ressources de calcul haute performance à travers le projet p1026.

Références

[1] J.N. Baucom, M.A. Zilry, A.M. Rajendran, « Low-velocity impact damage accumulation in woven S2-glass composite systems », Composite Science and Technology, Vol. 66, 2006, pp. 1229-1238

[2] G. Catalanotti, P.P. Camanho, J. Xavier, C.G. Dávila, A.T. Marques, « Measurement of resistance curves in the longitudinal failure of composites using digital image correlation », Composite Science and Technology, Vol. 70, 2010, pp. 1986-1993

[3] G. Grail, « Approche multimodèle pour la conception de structures composites à renfort tissé », PhD Thesis, University of Orléans, France, 2010

[4] G. Grail, M. Hirsekorn, N. Carrère, G. Hivet, R. Hambli « Lien entre paramètres matériaux/procédés et performances d'une structure composite à renfort tissé : approche multimodèle et multiéchelle. », 17ème Journées Nationnales sur les Composites, 2011

[5] B. Vieille, J-D. Gonzalez, C. Bouvet « Fracture mechanics of hybrid composites with ductile matrix and brittle fibers: Influence of temperature and constraint effect », *Journal of Composite Materials*, doi: 10.1177/0021998318802613, 2018.

[6] T. Lisle « Analyse par thermographie infrarouge de l'endommagement des structures composites sous sollicitations quasi statiques », Ph.D. thesis, Institut Clément Ader, 2014.

[7] M. Bizeul, C. Bouvet, J.J. Barrau, R. Cuenca « Fatigue crack growth in thin notched woven glass composites under tensile loading. Part I: Experimental », *Composite Science and Technology* Vol. 71, pp. 289-296, 2011.