Effet de la vitesse de chargement sur le taux de restitution d'énergie d'un CFRP en mode I et II

Irène Maillet, Laurent Michel

▶ **To cite this version:**

Irène Maillet, Laurent Michel. Effet de la vitesse de chargement sur le taux de restitution d'énergie d'un CFRP en mode I et II. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621555

HAL Id: hal-01621555
https://hal.science/hal-01621555

Submitted on 23 Oct 2017

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.

Effet de la vitesse de chargement sur le taux de restitution d'énergie d'un CFRP en mode I et II

Loading rate effect on Mode I and Mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional CFRP

Irène Maillet[1], Laurent Michel[2], Frédéric Lachaud[2], Juliette Gandolfi[1], Christophe Simond[1], Guillaume Androuin[2]

1 : DGA Techniques aéronautiques
47 rue Saint-Jean
BP 93123 31131 Balma Cedex, France
e-mail : irene.maillet@intradef.gouv.fr

2 : Groupe MSC, Institut Clément Ader
Université de Toulouse, CNRS, ISAE-SUPAERO
31077 TOULOUSE Cedex 4
e-mail : laurent.michel@isae.fr

Résumé

Les polymères epoxy sont très sensibles à la vitesse de déformation. Leur comportement peut passer de ductile à fragile suivant la vitesse imposée pendant la traction. Les délaminages se propagent dans l'interpli, donc principalement dans la matrice. Les propriétés de la résine ont donc une importance non négligeable sur la résistance du composite à la propagation du délaminage. Afin d'étudier l'influence de la vitesse de chargement sur le comportement en propagation du matériau T700/M21, des essais de taux de chargement sont effectués en mode I et mode II avec une vitesse allant de 0.01mm/s à 150mm/s. Les résultats sont exploités sous forme de courbes effort/déplacement et courbe de Résistance. Dans le cas du mode I, deux principaux comportements de propagation sont observés suivant la vitesse de chargement imposée. L'énergie nécessaire à propager à haute vitesse est 25% plus faible que celle à basse vitesse de chargement. Dans le cas du mode II, la sollicitation à haute vitesse de chargement génère des instabilités de propagation. Cependant l'augmentation de la vitesse de chargement ne semble pas modifier significativement l'énergie nécessaire à la propagation sur les zones de propagation stable.

Abstract

The epoxy polymers are very sensitive to strain rate. Their behavior can go from ductile to fragile according to the loading rate imposed during traction tests. Delamination propagates between plies, therefore mainly in the matrix. Resin properties are then significant on the delamination propagation behavior. In order to study the influence of loading rate on the propagation behavior of the T700 / M21 material, loading rate tests are carried out in Mode I and Mode II with a speed of 0.01 mm / s to 150 mm / s. Load / displacement curves and Resistance curve are drawn from data analysis. For mode I, two main propagation behaviors are observed according to the imposed loading rate. The energy needed to propagate at high loading rate is 25% lower than that at low loading rate. For mode II, the loading at high loading rate generates propagation instabilities. However, the increase in loading rate does not seem to significantly modify the energy required for propagation during stable propagation zones.

Mots Clés : taux de chargement, delaminage, propagation, carbone/epoxy
Keywords : loading rate, delamination, propagation, carbon/epoxy

1. Introduction

Les polymères epoxy sont très sensibles à la vitesse de déformation [1, 2]. Leur comportement peut passer de ductile à fragile suivant la vitesse imposée pendant la traction [1]. Les délaminages se propagent dans l'interpli, donc principalement dans la matrice. Les propriétés de la résine ont donc une importance non négligeable sur la résistance du composite à la propagation du délaminage.
Certains auteurs se sont ainsi intéressés à l'influence de la vitesse de chargement sur le taux de restitution d'énergie critique pour les principaux Modes de propagation. Smiley et Pipes [3, 4] ont testé l'effet de la vitesse de chargement en Mode I et en Mode II sur un carbone/epoxy et un AS4/PEEK. Ils ont trouvé une forte diminution de la résistance à la propagation avec l'augmentation de la vitesse de chargement. Friedrich [5] a repris ces résultats pour les expliquer à l'aide d'un modèle de rupture. La résistance à la rupture varie en fonction de cinq quantités : le volume de déformation plastique de la matrice au front de fissure, l'énergie utilisée pour arracher les fibres de la matrice et le nombre de fibres décollées par unité de surface, l'énergie de rupture de fibre et le nombre de fibres cassées par unité de surface. Si l'un de ces paramètres augmente, la résistance à la rupture calculée augmente. L'observation de la taille des zones d'endommagement des surfaces de rupture lui permet d'expliquer qualitativement la diminution de résistance en Mode I avec l'augmentation de vitesse de chargement : à basse vitesse, l'endommagement est plus diffus, alors qu'à haute vitesse, la pointe de fissure est franche. Par contre, il ne trouve pas de différence d'endommagement en Mode II.
Kusaka et al. [6] ont étudié la rupture en Mode I d'un carbone/epoxy soumis à des vitesses de chargement différentes. Une machine hydraulique a été utilisée pour les vitesses de 0.01mm/min à 500mm/min et un dispositif d'impact sur barres d'hopkinson pour celles de 5m/s à 20m/s. Trois zones distinctes de valeur de rupture sont identifiées :
– la Région I, pour les basses vitesses de chargement, est celle représentée par le Gc statique en Mode I,
– la Région II, pour les vitesses moyennes, est une transition linéaire vers la zone suivante,
– la Région III, pour les hautes vitesses est celle du Gc dynamique en Mode I (de valeur inférieure au statique).
Dans la région de transition qui est sensible à la vitesse de sollicitation, le délaminage se propage de façon instable par paliers. Pour expliquer cette propagation instable les auteurs proposent la mise en place d'un critère de stabilité prenant en compte l'énergie cinétique de la fissure et la vitesse de déformation.
Dans le cas du Mode II, la littérature fait état d'une influence mitigée de la vitesse de chargement sur le comportement des matériaux composites en général. Cantwell et al. [7] déduit des résultats listés dans sa revue que les fortes vitesses de chargement ont au plus comme effet de diminuer légèrement la valeur du GIIc. Les résultats de Blackman et al. [8] sur du PEEK et sur un matériau époxy corroborent cette tendance.
Dans cette étude, des essais sont effectués pour étudier l'effet de la vitesse de chargement sur le comportement en propagation du matériau T700/M21. Les éprouvettes unidirectionnelles sont chargées, en Mode I suivant l'essai DCB et en Mode II suivant la configuration ELS, à des vitesses allant de 0,01mm/s à 150mm/s à l'aide d'une machine hydraulique uni-axiale. Les résultats sont exploités sous forme des courbes effort-déplacement, longueur de délaminage-déplacement et taux de restitution d'énergie-longueur de délaminage.

2. Matériau et éprouvette

Le matériau composite utilisé pour cette étude est le T700/M21 fourni par la société Hexcel©. C'est un carbone/epoxy à fibres longues présenté sous forme de nappes de 0.25mm d'épaisseur. Sa matrice est renforcée par l'ajout de nodules thermoplastiques (Fig. 1). Ces derniers améliorent les caractéristiques résines et notamment la résistance à la propagation de fissure [9].

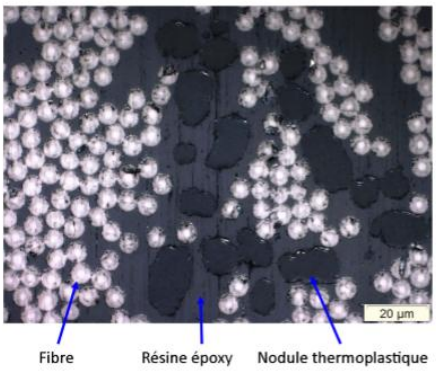

Fig. 1. Matériau T700/M21 (coupe perpendiculaire au sens fibre)

Des plaques unidirectionnelles de dimension 200×300mm^2 sont fabriquées par empilement de 20 plis successifs. Afin de créer un délaminage initial, un film Téflon de 25µm d'épaisseur est inséré dans le plan moyen de la plaque. Celle-ci est polymérisée suivant le cycle standard avec palier d'homogénéisation à 150°C et une polymérisation à 180°C recommandé par le fabricant. Les éprouvettes sont ensuite découpées dans la plaque aux dimensions 180×25mm^2. L'épaisseur du film téfloné utilisé est supérieure aux 13µm recommandés dans l'ASTM-D5528 [10], mais toutes les éprouvettes sont précraquées d'au moins 2mm avant les essais pour s'affranchir de son influence.

3. Moyens d'essais

Les essais quasi-statiques sont réalisés à température ambiante à l'aide d'une machine hydraulique de traction-compression munie d'un capteur de charge de 1kN. Le pilotage de la machine,est réglé de façon à assurer une vitesse de chargement constante pendant toute la phase de propagation. Les données d'essais sont enregistrées avec des fréquences d'acquisition cohérentes avec la vitesse de sollicitation.

3.1 Mode I

Les essais classiques en mode I sont réalisés à l'aide du montage Double Cantilever Beam (DCB) suivant les normes ASTM [10]. L'éprouvette de dimensions 180×25×5mm^3 est chargée en ouverture par l'intermédiaire des liaisons pivots entre les blocs, de dimensions 10×10mm^2, collés sur l'éprouvette et les étriers de charge (Fig. 2.).

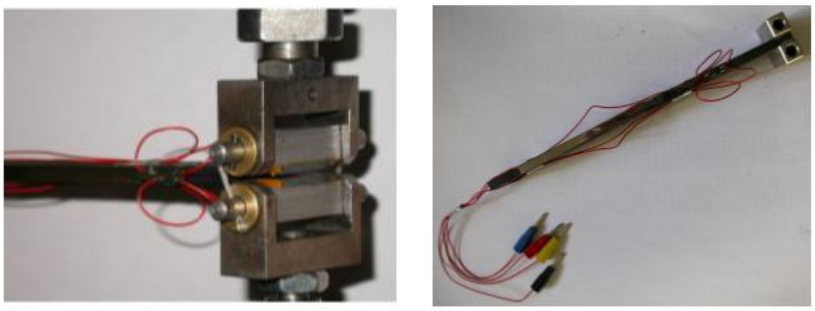

Fig. 2. Système de chargement DCB et jauge de fissure

Le suivi de fissure est réalisé à l'aide de jauges de fissure (RUMUL KRACK GAGE S100) permettant d'avoir une mesure précise de la longueur du délaminage en temps réel (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

3.2 Mode II

L'essai en mode II est réalisé avec un montage de type ELS (End Loaded Split). L'éprouvette est encastrée à son extrémité saine et sollicitée en flexion à l'autre par l'intermédiaire d'un rouleau (Fig. 3.). La longueur d'encastrement est déterminée en fonction de la taille de délaminage initiale de manière à assurer une propagation stable de fissure à vitesse de chargement standard. Ainsi l'éprouvette est positionnée pour avoir une longueur libre, entre le rouleau de chargement et l'encastrement, de 78mm.

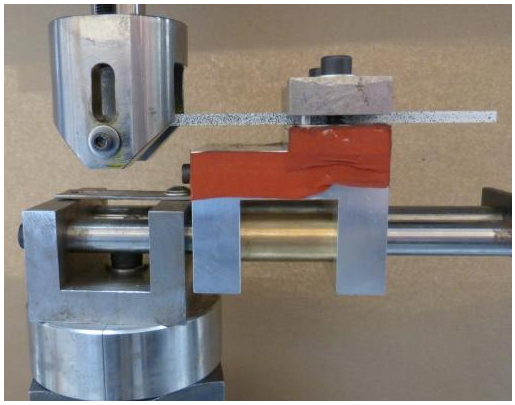

Fig. 3. Montage ELS

L'observation de l'avancée du délaminage pendant ce type d'essai est très complexe, notamment à cause de l'endommagement précédant le front de fissure. Les jauges de fissures n'étant pas utilisables en cisaillement pur, le suivi du délaminage pour cette configuration est réalisé par corrélation rapide. Un mouchetis noir sur fond blanc est donc appliqué sur la tranche de l'éprouvette (Fig. 4.).

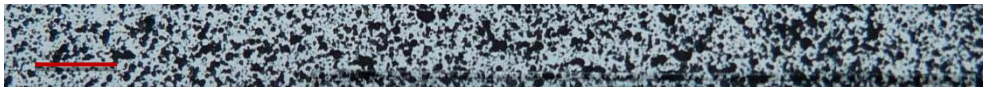

Fig. 4. Bord de l'éprouvette (mouchetis noir sur fond blanc)

Cette méthode non intrusive permet de quantifier la déformation des facettes d'analyse au moyen du logiciel ARAMIS. L'allongement maximal avant rupture de la matrice époxy du composite est donné à 5% par le fabricant. Ainsi, on considère que la fissure est avérée à partir d'une valeur de déformation majeure de 5,5%. Le plan vertical défini par la tranche de l'éprouvette au début de l'essai est utilisé comme plan de travail pour suivi du délaminage. L'origine du repère est placée sur la pointe de la pré fissuration.

4. Résultats des essais de vitesse

Des essais de vitesses de chargement ont été effectués pour les deux modes de sollicitation entre 0.01mm/s et 150mm/s.

4.1 Mode I

Deux principaux comportements de propagation sont observés suivant la vitesse de chargement imposée (Vs) : sollicitation lente et sollicitation rapide. Les courbes Effort-Déplacement et la courbe de résistance sont présentées ci-après. Le taux de restitution d'énergie est calculé par la méthode de la complaisance.
La complaisance représente la flexibilité de l'éprouvette et se calcule par la formule suivante :

$$C = \frac{dep}{F}$$

avec dep le déplacement imposé et F l'effort.
La loi de complaisance en Mode I s'écrit :

$$C = C0.a^n$$

avec a la longueur de fissure. Les paramètres C0 et n sont déterminés à partir des données expérimentales par identification en repère log-log.
Le taux de restitution d'énergie en mode I se calcule comme suit :

$$G_I = \frac{nPdep}{2ba}$$

avec b la largeur de l'éprouvette.

Chargement lent

Les éprouvettes chargées à vitesse lente (*Vs* < 0.5mm/s) ont une propagation de fissure stable. De plus, un phénomène de vitesse de déformation est observé : plus la fissure est sollicitée rapidement, plus la résistance est élevée (*Fmax* important) et la rupture brutale (Fig. 5.). A l'inverse si la vitesse de sollicitation est lente, la propagation est progressive. Le taux de restitution d'énergie pour ces vitesses de chargement est de l'ordre de 400N/m.

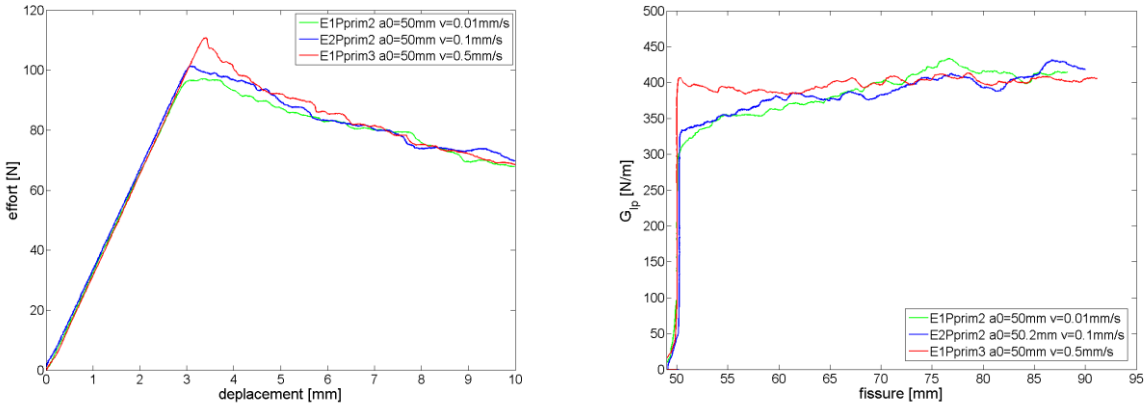

Fig. 5. Chargement lent de gauche à droite : courbe effort/déplacement et courbe de résistance

Chargement rapide

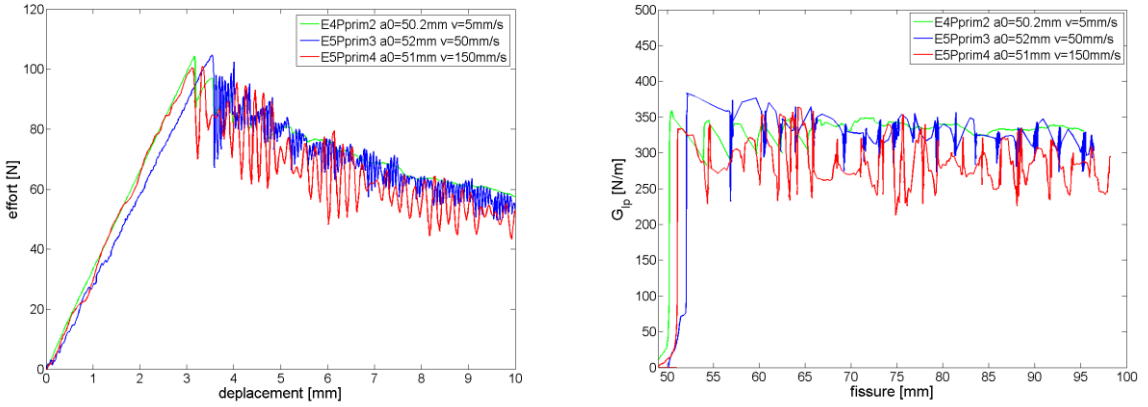

Fig. 6. Chargement lent de gauche à droite : courbe effort/déplacement et courbe de résistance

Les éprouvettes chargées à grande vitesse (*Vs* > 5mm/s) propagent de manière instable par paliers (Fig. 6). La rupture initiale est franche et se situe autour d'une valeur commune d'effort critique. Ce comportement instable observé par Kusaka [6] est expliqué par la différence du taux de déformation en pointe d'une fissure mobile et celle en pointe d'une fissure fixe. La vitesse de déformation en pointe de fissure est multipliée instantanément par un facteur de l'ordre de 80 à la propagation. A cette vitesse de déformation, le taux de restitution d'énergie nécessaire pour propager en dynamique est plus faible (de l'ordre de 300N/m). Le délaminage va donc propager de façon instable pour consommer le trop plein d'énergie emmagasiné. A ce stade, la propagation s'arrête, le taux de déformation diminue et le taux de restitution d'énergie passe à sa valeur statique (400N/m). Lorsque la fissure propage à nouveau, le cycle recommence.

Chargement intermédiaire

Certaines vitesses de chargement sont entre les cas extrêmes de propagation rapide et lente (Fig. 7.). Après une propagation initiale instable, la fissure se stabilise à un taux de restitution d'énergie de propagation compris, entre 300N/m et 400N/m.

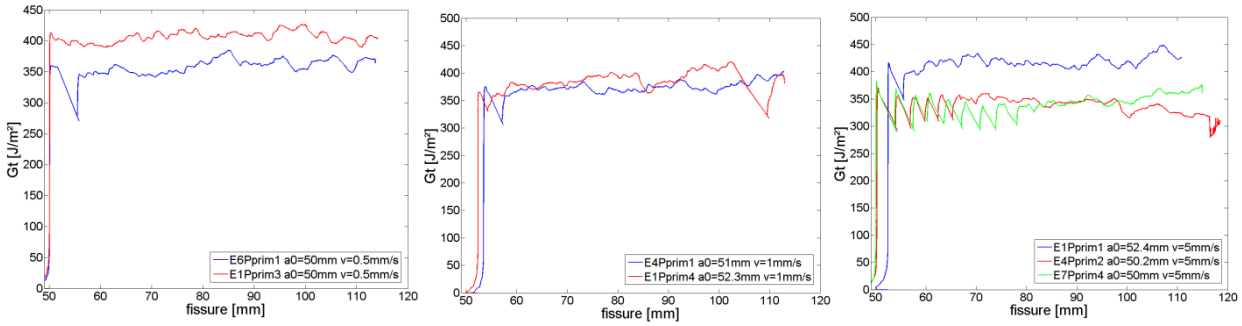

Fig. 7. Chargement intermédiaire de gauche à droite : 0,5mm/s ; 1mm/s ; 5mm/s

Bilan

Les différents comportements en propagation en mode I du matériau T700/M21 en fonction de la vitesse de chargement sont représentés ci-dessous (Fig.).

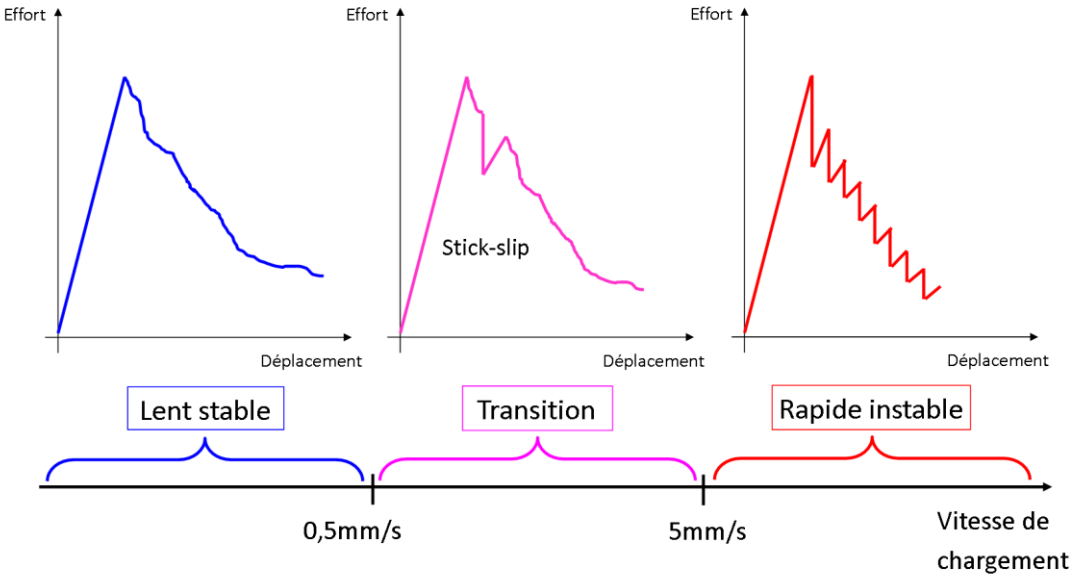

Fig. 8. Type de propagation en fonction de la vitesse de chargement

Ce matériau est sensible à la vitesse de chargement et présente deux comportements distincts. Pour les vitesses de chargement inférieures à 0.5mm/s, plus la vitesse est élevée plus la propagation initiale est brutale. Le taux de restitution d'énergie critique de propagation moyen est de 400N/m. Dans le cas des vitesses de chargement supérieures à 5mm/s, le taux de restitution d'énergie critique

moyen est de l'ordre de 300N/m. La courbe de résistance montre que la valeur initiale du taux de restitution d'énergie pour les fortes vitesses de chargement est identique à celle obtenue pour une vitesse de 0.01mm/s (400N/m). Par contre la valeur du taux de restitution d'énergie passe instantanément à 300N/m pendant la phase propagation. Ainsi, lorsque le taux de restitution d'énergie atteint sa valeur critique, la propagation pour les forts taux de sollicitation devient instable sur quelques millimètres (propagation rapide), puis se re-stabilise sur un niveau plus bas d'énergie nécessaire à la propagation.

4.2 Mode II

La loi de complaisance en Mode II s'écrit :

$$C = m.a^3 + C0$$

Le taux de restitution d'énergie en mode II se calcule de la façon suivante :

$$G_{II} = \frac{3ma^2P^2}{2b}$$

La courbe Effort-Déplacement et la courbe de résistance sont présentées ci-après (Fig. 9.).

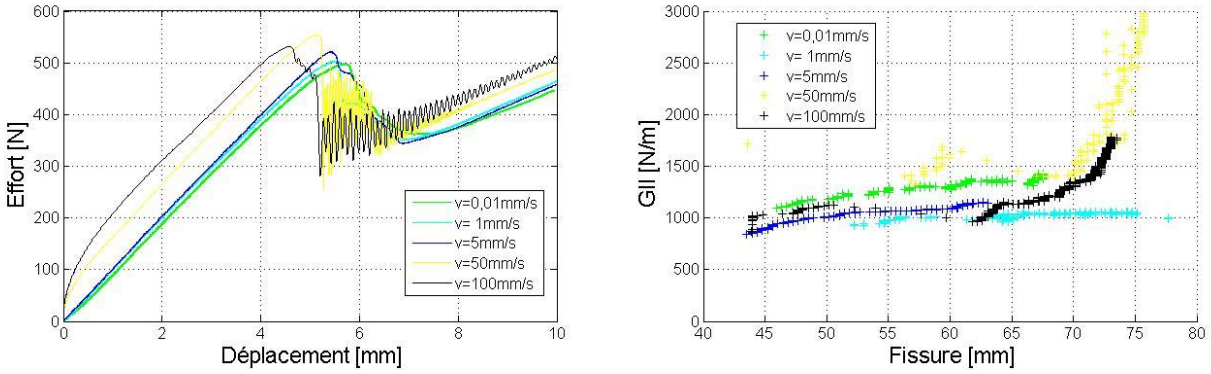

Fig. 9. Mode II de gauche à droite : courbe effort/déplacement et courbe de résistance

A partir d'un déplacement de 7mm du vérin, le délaminage a presque atteint l'encastrement et l'éprouvette continue à être chargée en flexion jusqu'à rupture au niveau de l'encastrement pour les vitesses les plus rapides. L'influence de l'encastrement sur la propagation est d'ailleurs visible sur la courbe de résistance, où il modifie artificiellement le taux de restitution d'énergie nécessaire à propager à partir de 70mm de longueur de fissure. Sur ce montage d'essai de type ELS, on peut donc considérer qu'au-delà de 10mm de distance au front de fissure, l'encastrement n'a pas ou peu d'influence sur la propagation.

Les éprouvettes chargées en mode II présentent une instabilité de propagation pour les chargements rapides (> 5mm/s). Les oscillations observées après la propagation instable sont dues aux vibrations enregistrées par le capteur d'effort.

La courbe effort/déplacement montre à partir d'une vitesse de 5mm/s une modification de la rigidité de l'éprouvette pendant la phase de chargement. Ceci pourrait s'expliquer par un déphasage entre déplacement et effort dû à la viscoélasticité du matériau. Comme la position zéro du déplacement est faite après l'essai par soustraction de la dernière position machine à effort nulle, il est possible de prendre en compte le retard entre effort et déplacement par décalage de cette position zéro (Fig. 10.).

L'augmentation de la vitesse de chargement ne semble pas modifier significativement l'énergie nécessaire à la propagation en mode II sur les zones de propagation stable.

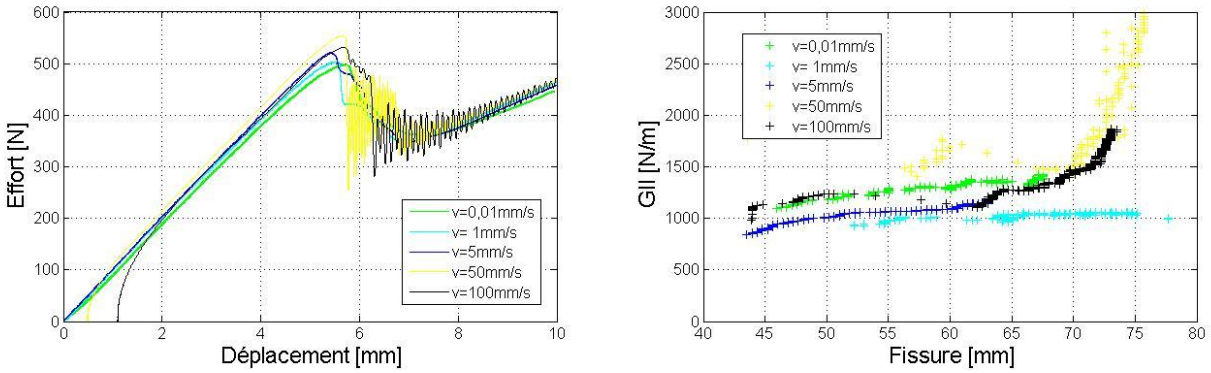

Fig. 10. Mode II de gauche à droite après prise en compte du retard entre déplacement imposé et effort : courbe effort/déplacement et courbe de résistance

5. Conclusion

Des essais de taux de chargement ont été réalisés en mode I et mode II sur le matériau T700/M21. Les éprouvettes ont été chargées à des vitesses de déplacement vérin allant de 0.01mm/s à 150mm/s.

Dans le cas du mode I, le T700/M21 est sensible à la vitesse de chargement et présente deux comportements distincts. Pour les vitesses de chargement inférieures à 0.5mm/s, plus la vitesse est élevée plus la propagation initiale est brutale. Le taux de restitution d'énergie critique de propagation moyen est de 400N/m. Dans le cas des vitesses de chargement supérieures à 5mm/s, le taux de restitution d'énergie critique moyen est de l'ordre de 300N/m et la fissure se propage par paliers d'instabilité.

Dans le cas du mode II, la sollicitation à une vitesse de chargement supérieure à 5mm/s génère des instabilités de propagation. Cependant l'augmentation de la vitesse de chargement ne semble pas modifier significativement l'énergie nécessaire à la propagation sur les zones de propagation stable.

Références

[1] W. CHEN, F. LU, M. CHENG, « Tension and compression tests of two polymers under quasistatic and dynamic loading ». *Polymer Testing*, 21(2), pp. 113–121, 2002.

[2] L. GOGLIO, L. PERONI, M. PERONI, and M. ROSSETTO, « High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive ». *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(7), pp. 329–339, 2008.

[3] A. J. SMILEY, R. B. PIPES, « Rate effects on mode-I interlaminar fracture-toughness in composite-materials ». *Journal of Composite Materials*, 21(7), pp. 670–687, 1987.

[4] A. J. SMILEY, R. B. PIPES, « Rate sensitivity of mode-II interlaminar fracture-toughness in graphite epoxy and graphite PEEK composite-materials ». *Composites Science and Technology*, 29(1), pp. 1–15, 1987.

[5] K. FRIEDRICH, R. WALTER, L. A. CARLSSON, A. J. SMILEY, and J. W. GILLESPIE, « Mechanisms for rate effects on interlaminar fracture-toughness of carbon epoxy and carbon PEEK composites ». *Journal of Materials Science*, 24(9), pp. 3387–3398, 1989.

[6] T. KUSAKA, M. HOJO, Y. W. MAI, T. KUROKAWA, T. NOJIMA, S. OCHIAI, « Rate dependence of mode I fracture behaviour in carbon-fibre/epoxy composite laminates ». *Composites Science and Technology*, 58(3-4), pp. 591–602, 1998.

[7] W. J. CANTWELL, M. BLYTON, « Influence of loading rate on the interlaminar fracture properties of high performance composites - a review ». *Applied mechanics reviews*, 52(6), pp. 199–212, 1999.

[8] B. R. K. BLACKMAN, J. P. DEAR, A.J. KINLOCH, H. MACGILLIVRAY, Y. WANG, J. G. WILLIAMS, P. YAYLA, « The failure of fibre composites and adhesively bonded fibre composites under high rates of test - Part III Mixed-mode I/II and mode II loadings ». *Journal of materials science*, Vol. 31, pp. 4467-4477, 1996.

[9] A. KINLOCH, S. SHAW, D. TOD, AND D. HUNSTON. « Deformation and fracture behaviour of a rubber-toughened epoxy: 1. microstructure and fracture studies ». *Polymer*, 24(10):1341 – 1354, 1983.

[10] ASTM. « Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composite », 1994.