Etude comparée de la rupture d'éprouvettes trouées par perçage et par moulage = Comparison of composite specimen fracture with drilled and moulded holes

Redouane Zitoune, Francis Collombet, T. Tamine, Laurent Crouzeix, Y.H. Grunevald

▶ **To cite this version:**

Redouane Zitoune, Francis Collombet, T. Tamine, Laurent Crouzeix, Y.H. Grunevald. Etude comparée de la rupture d'éprouvettes trouées par perçage et par moulage = Comparison of composite specimen fracture with drilled and moulded holes. JNC16, Jun 2009, Toulouse, France. 8 p. hal-00429841

HAL Id: hal-00429841
https://hal.science/hal-00429841

Submitted on 4 Nov 2009

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 comparée de la rupture d'éprouvettes trouées par perçage et par moulage

Comparison of composite specimen fracture with drilled and moulded holes

R. Zitoune[1], F. Collombet[1], T. Tamine[2], L. Crouzeix[1], Y-H. Grunevald[3]

1 : Université de Toulouse ; INSA ; UPS ; ICA (Institut Clément Ader)
133c av. de Rangueil, BP 67701, 31077 Toulouse cedex 4
redouane.zitoune@iut-tlse3.fr, francis.collombet@iut-tlse3.fr, laurent.crouzeix@iut-tlse3.fr

2 : Laboratoire LCGE, Faculté de Génie Mécanique
UST Oran M. Boudiaf, B.P 1505 El M'Naouer 31000 Oran Algérie

3 2 : SARL C.E.S.
Rue Georges Vallerey, 31320 Castanet-Tolosan
e-mail : yh.grunevald@composites-expertise-solutions.com

Résumé

Le perçage par enlèvement de matière des matériaux composites est souvent accompagné de dommages de natures différentes. Pour contourner cette opération d'usinage par enlèvement de matière, l'obtention de trous par moulage est la solution préconisée dans le cadre de cette étude. Pour valider ce procédé, des essais de comportement mécanique ont été menés sur des plaques trouées avec moulage et trouées avec perçage. La technique de mesure de champs par stéréo corrélation d'images numériques par caméra CCD a permis de suivre et d'analyser le processus d'endommagement sur les plaques testées. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux relevés par les jauges d'extensométrie. L'analyse des images numériques sur les plaques avec trous moulés a montré que les mécanismes d'endommagement se manifestent au début par la présence d'une fissure en bord du trou qui se propage dans la direction des fibres, suivi d'un décollement du premier pli puis d'une rupture globale de la plaque. Pour les plaques percées, la même technique d'analyse montre l'apparition d'une fissure orientée à +45° suivie d'une ru pture brutale de la plaque. Enfin, les résultats des différents essais montrent que la résistance à la rupture des plaques contenant des trous moulés est supérieure à celle des plaques avec des trous percés.

Abstract

Conventional drilling leads with damage of different natures. To overcome this machining operation, it could be more appropriate to mould the holes. This process is validated by mechanical tests on specimens with modelled and drilled holes. The Digital Image Correlation technique allows the damage process analysis of the considered plates. The results are in agreement with those given by the strain gauges. The numerical images analysis points out damage mechanisms appearance on plates with modelled holes. At the beginning there is the presence of the cracks in the vicinity of the hole along the plies direction. We Note that the propagation of this crack grows with the applied load. For the drilled plates, the same analysis shows the presence of cracks oriented to 45° followed by a su dden fracture of the plate. Lastly, the results of the different tests reveal residual stress of plates with modelled holes higher than that in plates with drilled holes.

Mots Clés : trou percé, trou moulé, essais mécaniques, Corrélation d'images numériques
Keywords: drilled hole, moulded hole, mechanicals tests, Digital Image Correlation

1. Introduction

L'assemblage de l'élément composite sur une structure nécessite souvent la réalisation de trous pour recevoir des boulons ou des rivets. Les procédés d'obtention des trous sont divers, on citera principalement celui de l'usinage par enlèvement de matière grâce à un outil de coupe (forêt) ou celui par moulage. Le principe du premier procédé consiste à découper les fibres du stratifié, ce phénomène de découpe de fibres fragilise la structure composite [1, 2, 3]. De plus cette opération d'usinage est souvent accompagnée de dommages en entrée, sur la paroi et en sortie du trou [4]. Le principe du second procédé, consiste à insérer une tige métallique pour écarter les fibres durant l'opération de drapage (fabrication en

salle blanche) et pendant la polymérisation. Cela conduit à perturber localement l'orientation des fibres, en bordure du trou [5].

. La présence d'un trou dans les structures composites sollicitées mécaniquement a fait l'objet de plusieurs travaux [1, 6, 7]. Les travaux de [6] montrent que le module sécant absolu est inversement proportionnel à la gravité du défaut (plus la gravité du défaut est importante plus le module sécant absolu est petit). [6, 7] ont montré que les conditions d'usinage ainsi que la nature du matériau outil influencent la résistance à la rupture des plaques composites chargées en traction.

L'analyse de l'état de contrainte sur des plaques trouées par perçage a fait l'objet de plusieurs travaux [8, 9 …]. [8] ont développé une technique de calcul permettant l'analyse du champ de contraintes avec la prise en compte de critères quadratiques de rupture et de l'endommagement progressif dans la structure. La technique expérimentale de l'interférométrie a été appliquée par [9] pour l'étude des déformations dans une plaque en composite présentant des concentrations de contraintes causées par la présence d'un trou percé. Le modèle théorique de Lekhnitskii et la méthode des éléments finis appliquées corrèlent bien les résultats expérimentaux.

L'analyse de l'état de contrainte sur des plaques trouées par moulage sollicitées mécaniquement n'a pas fait l'objet de beaucoup de travaux. [10] ont travaillé sur le comportement expérimental et numérique des composites tissées croisés 2/2 en carbone/époxy (T300) contenant des trous percés et moulés. Les résultats d'essais ont montré que la contrainte de rupture augmente avec la diminution du diamètre du trou. Pour des diamètres identiques, les éprouvettes avec trous moulés possèdent une résistance à la rupture plus importante que celles avec des trous percés. Le modèle numérique présenté par ces auteurs surestime la contrainte à la rupture quelque soit l'éprouvette testée. Dans le cas des assemblages boulonnés de structures composites fibres longues, [11] ont mené une campagne d'essais mécaniques sur des éprouvettes (de type tissée en verre/polyester avec des séquences d'empilement $[0°/90°]_s$ et $[\pm 45°]_s$) contenant des trous percés et moulés de différents diamètres. L'influence de la distance du centre du trou au bord rapportée au diamètre du trou (E/D) a été considérée. Les résultats obtenus montrent que pour E/D = 1, les contraintes à la rupture des éprouvettes moulées sont de 30% à 50% plus importantes que celles des éprouvettes percées et pour E/D ≥ 2, les contraintes sont du même ordre de grandeur.

Dans cette étude, nous avons établi une comparaison à différentes échelles entre deux catégories d'éprouvettes trouées sollicitées en traction. Les trous de la première catégorie d'éprouvettes sont obtenus par perçage et ceux de la deuxième catégorie par moulage. L'instrumentation des plaques d'essais à l'aide de jauges d'extensométrie a permis de comparer le comportement mécanique des différentes catégories de plaques étudiées. L'apport de la technique de mesures de champs par corrélation d'images numériques (VIC 3D), a complété cette étude avec la détermination des champs de déformations (au voisinage et loin des trous) et l'analyse des mécanismes d'endommagement que subissent les éprouvettes percées et moulées. Les résultats obtenus par les essais de mesures de champs sont confrontés à ceux obtenus par les jauges électriques.

2. Protocole expérimental

Le matériau utilisé est issu d'une nappe pré imprégnée unidirectionnelle référencée UD T300 M10, fournie par la société Hexcel Composites, possédant un grammage de 268 g/m^2. Les éprouvettes d'essais sont réalisées à partir de stratifiés quasi isotrope $[0°/-45°/90°/-45°]_S$, avec une épaisseur de pli de 0,26 mm. Les propriétés mécaniques de ce matériau sont déterminées à partir d'essais physico chimiques et mécaniques régis par la norme ASN-A 4102. Deux lots d'éprouvettes émanant de la même plaque mère ont été testés. Le premier lot concerne les éprouvettes avec des trous moulés de diamètre 6,35 mm et 7,94 mm, obtenus grâce à l'insertion d'aiguilles et l'écartement des fibres sous l'action de vérin lors de la phase de fabrication du composite (Fig. 1-a). Le second lot comprend les éprouvettes avec les trous percés de mêmes diamètres que les trous moulés, réalisés avec un forêt hélicoïdal deux lèvres en carbure de tungstène.

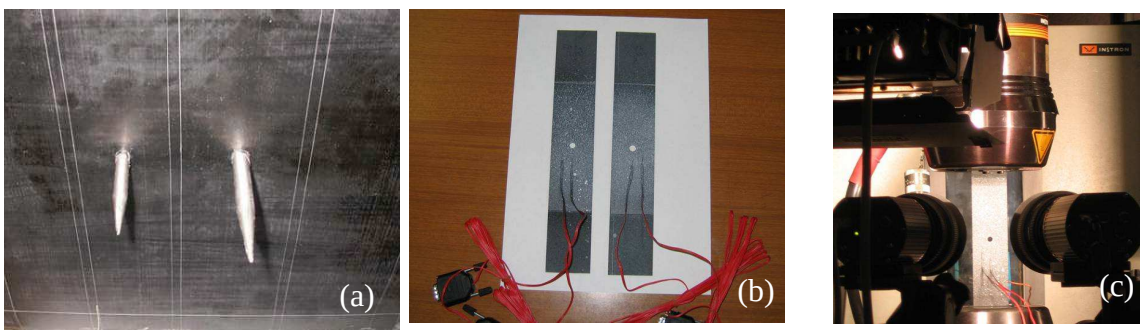
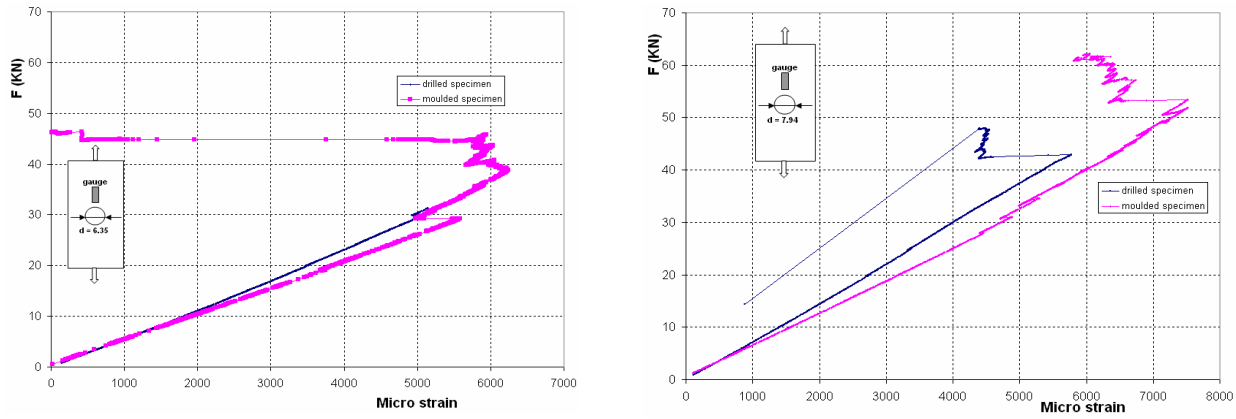


Fig. 1. Préparation des éprouvettes pour les essais de tractions, avec (a) Plaque mère après démoulage, (b) éprouvettes instrumentées en surface par jauges et mouchetis, (c) éprouvette instrumentée fixée entre les mors de la machine de traction.

Sur les éprouvettes testées, avec le mouchetis aléatoire déposé pour la mesure de champ de déformation en surface grâce à deux paires de camera CCD, deux jauges d'extensométrie ont été positionnées axialement à une distance D (équivalent au diamètre du trou) du trou et écartées d'un angle de 90° (Fig. 1-b). Cela permet de mesurer la déformation axiale en deux endroits différents. Les essais de traction ont été menés sur une machine de type INSTRON avec une cellule de charge de 100 KN (Fig. 1-c).

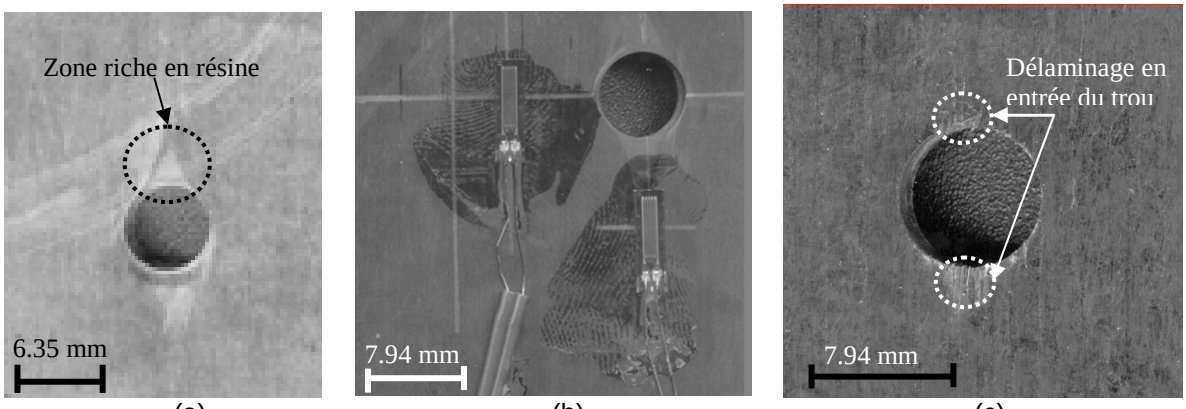
3. Résultats

La figure 2 montre l'évolution de la charge appliquée en fonction de la déformation donnée par la jauge axiale pour les éprouvettes à trous percés et moulés de diamètre 7,94 mm. Les contraintes à la rupture des éprouvettes moulées sont nettement plus grandes que les éprouvettes percées. L'écart relatif maximal relevé est de l'ordre de 30%. On note aussi que la rigidité locale détectée par la jauge sur la plaque moulée est inférieure à celle détectée par une jauge sur la plaque percée. Au voisinage du trou, le taux volumique de fibres d'une plaque moulée est plus important que celui d'une plaque percée. On est censé avoir une rigidité en traction d'une plaque moulée plus grande que celle percée. Ces deux observations sont identiques aux éprouvettes trouées et percées de diamètre 6,35 mm. L'analyse des courbes force/ déformation obtenues à partir des jauges axiales en bord du trou montre que la rigidité locale détectée par la jauge placée sur les éprouvettes moulées est plus importante que celle détectée par la jauge placée sur les éprouvettes percées (Fig. 2). Dans la zone où les jauges axiales ont été placées, des images scannées ne montrent pas de différence entre une éprouvette moulée et percée. Une analyse plus fine a mis en évidence la présence d'une zone riche en résine (Fig. 3) au voisinage de la jauge axiale placée sur une éprouvette avec trou moulé. Cette zone est liée au procédé de fabrication des trous moulés du fait de l'écartement des fibres en bord du trou.



(a) (b)

Fig. 2. Evolution de la charge en fonction de la déformation axiale pour une éprouvette avec trou moulé et trou percé avec (a) diamètre d = 6.35 mm et (b) diamètre d = 7.94 mm.



(a) (b) (c)

Fig. 3. Images scannées, montrant l'état du trou ainsi que la position des jauges axiale et axiale décalée avec (a) éprouvette moulée de diamètre de 6,35 mm, (b) éprouvette moulée de diamètre de 7,94 mm et (c) éprouvette percée de diamètre 7,94 mm.

Les valeurs de la déformation données par la technique de mesure de champ par corrélation d'images numériques sont confrontées aux valeurs de la déformation relevées par les jauges d'extensométrie. Pour les éprouvettes percées, les résultats obtenus par ces deux techniques sont en bon accord, l'écart maximal observé est de l'ordre de 5%. Pour les éprouvettes à trous moulés, les déformations obtenues par mesures de champs rejoignent celles données par les jauges lorsque l'effort appliqué est inférieur à 30 KN (Fig. 4 et Fig. 5). A partir de cette valeur de charge, des endommagements en surface sont observés sur les éprouvettes provoquant des difficultés à réaliser la corrélation des calculs par mesures de champs.

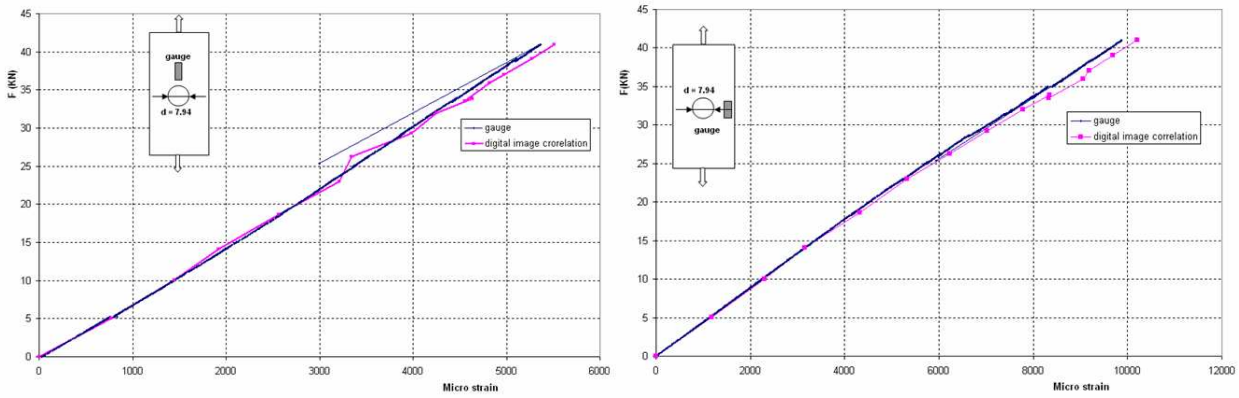


Fig. 4. Comparaison entre l'évolution de la charge en fonction des déformations données par jauges électriques et celles données par la technique de mesure de champ pour une éprouvette percée de diamètre 7.94 mm.

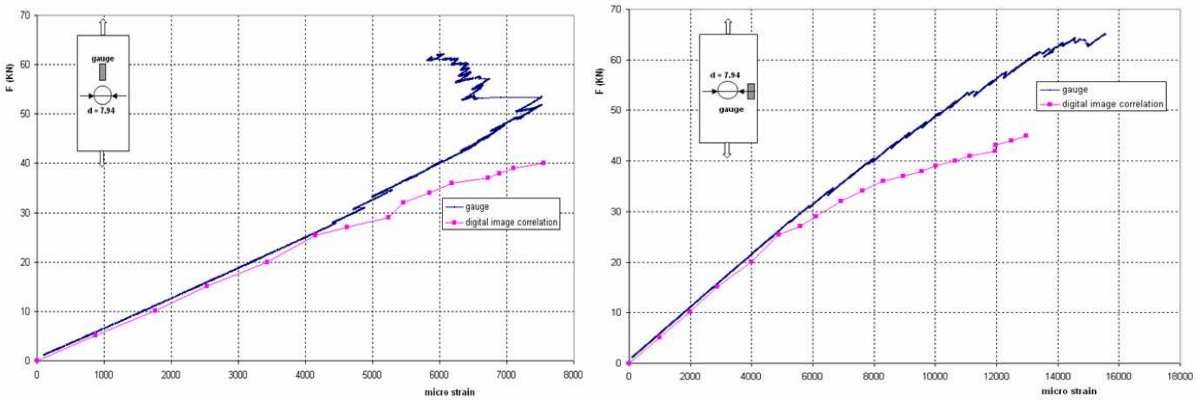
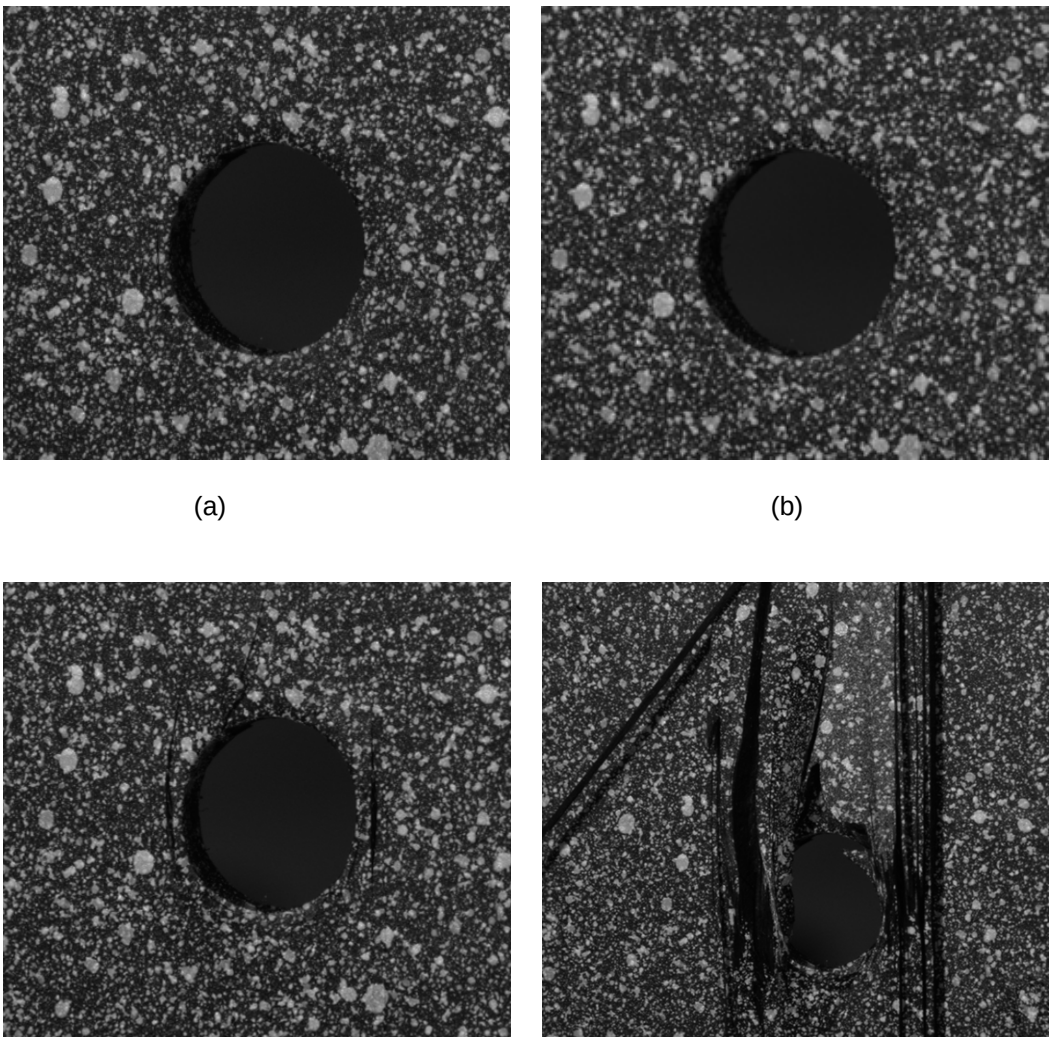


Fig. 5. Comparaison entre l'évolution de la charge en fonction des déformations données par jauges électriques et celles données par la technique de mesure de champ pour une éprouvette moulée de diamètre 7,94 mm.

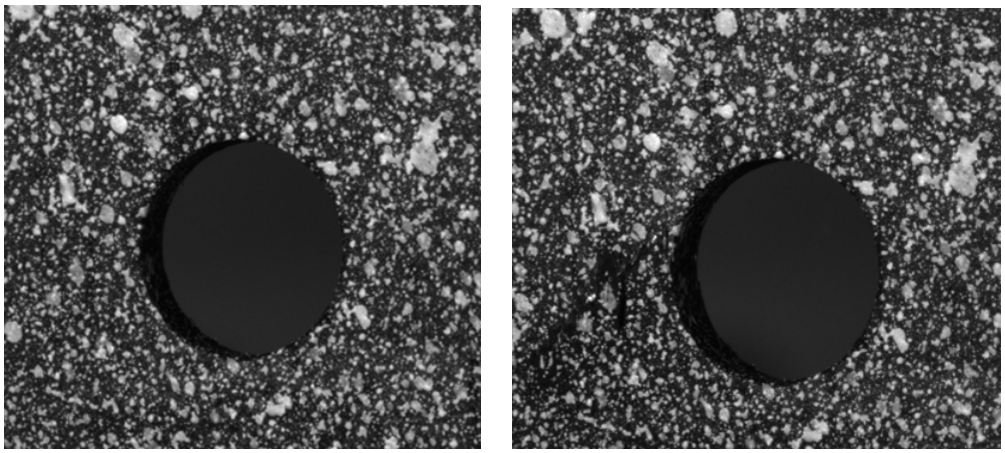
L'analyse des images données par la caméra CCD démontre que le mode d'endommagement entre les éprouvettes moulées et percées est différent. Les images de la figure 6 présentent le premier mode d'endommagement des éprouvettes à trous moulés avec l'apparition d'une fissure orientée dans la direction des plis à 0° (suivant l'axe de chargement OY). Cet te fissure qui est située à 1 mm du bord du trou moulé (coté gauche) est observée pour un niveau de chargement de 28 KN (Fig. 6). Au fur et à mesure que le chargement appliqué augmente, nous avons constaté l'apparition d'une seconde fissure sur le bord du trou (coté droit). Il s'ensuit la propagation des deux fissures dans une direction parallèle à la direction des fibres (Fig. 6-c). Lorsque le chargement atteint 64 KN, l'endommagement s'accentue et provoque le décollement du pli supérieur (Fig. 6-d). Concernant les éprouvettes à trous percés, les séquences enregistrées montrent que le mode de rupture est différent de celui observé sur les éprouvettes à trous moulés. En dessous d'un chargement de 42,5 KN, aucun dommage n'est observé. A partir de cette valeur, un premier dommage, sous forme d'une fissure orientée à 45° par rapport à l' axe de chargement (OY), est constaté (figure 7.b). Cette fissure reste stable avant la rupture brutale qui apparaît lorsque le chargement atteint 49 KN. Toutes les éprouvettes testées présentent les mêmes mécanismes d'endommagement déjà décrits.



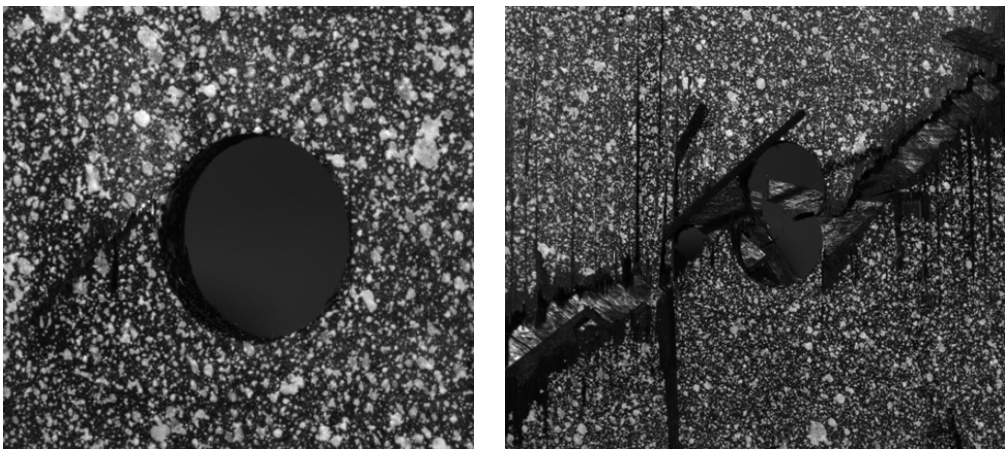
(a) (b)

(c) (d)

Fig. 6. Evolution du mode de ruine de l'éprouvette moulée de diamètre 7.94 mm pour différents niveaux de chargement avec les amplitudes de chargement suivantes : (a) F = 25 KN, (b) F = 28.2 KN, (c) F = 47 KN et (d) F = 64 KN.



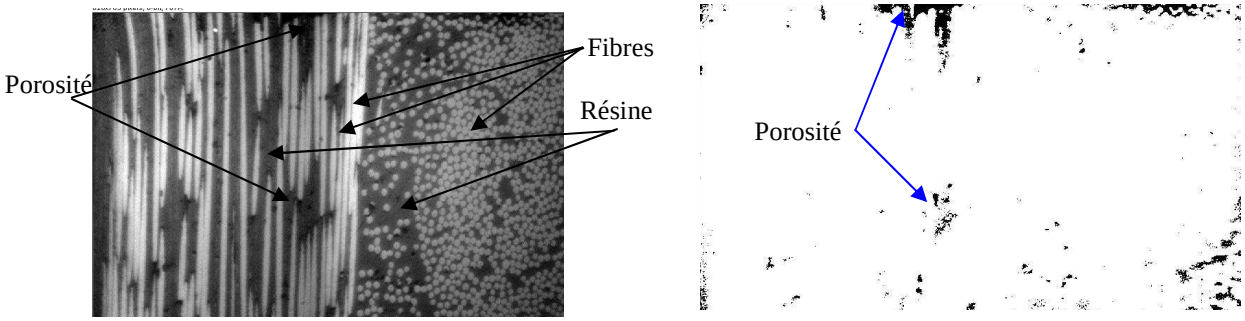
(a) (b)



(c) (d)

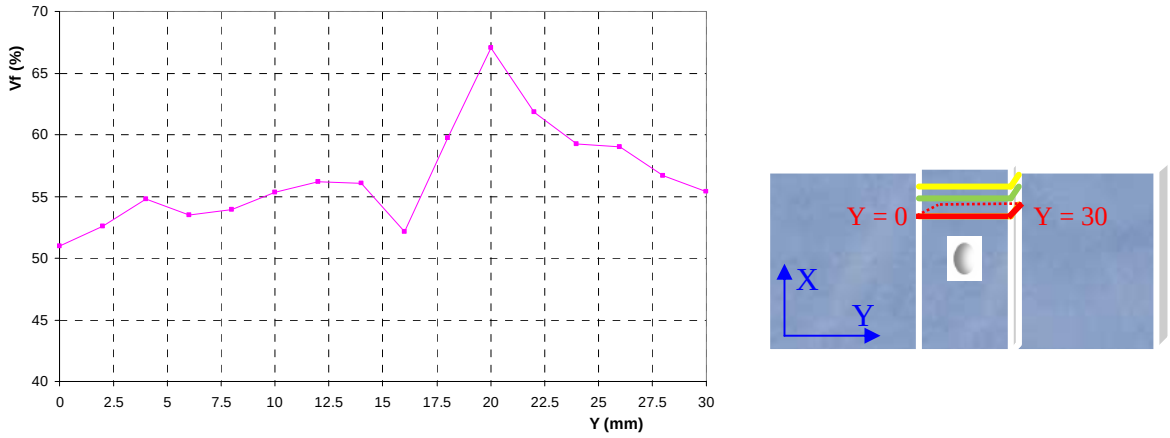
Fig. 7. Evolution du mode de ruine de l'éprouvette percée de diamètre 7.94 mm pour différents niveaux de chargement avec les amplitudes de chargement suivantes : (a) F = 25 KN, (b) F = 42,5 KN, (c) F = 48 KN et (d) F = 49 KN.

Afin de mieux comprendre les causes de dommage produit en bord du trou lors de l'essai de traction sur des plaques avec trou moulé, l'analyse du taux de porosité en bord du trou est réalisée. Une technique normalisée de mesure du taux de porosité dans un échantillon en matériau composite est limitée par le fait qu'elle donne une information globale sur le volume de matière analysé. Pour s'affranchir de cette limite, une analyse du taux de porosité par une méthode non normalisée est utilisée. Le principe de cette méthode consiste à prendre des images au microscope optique (ou à balayage électronique) du plan pour lequel on souhaite calculer le taux surfacique de porosité ou de renfort (Fig. 8-a). Grâce à un logiciel de traitement d'images, on peut faire apparaître les tâches de porosité surfacique en couleur noire (voir Fig. 8-b). L'idée est de transformer l'image prise en image binaire (noir = porosité, blanc = résine+fibre). De cette façon, le taux surfacique de porosité est égal au rapport de la surface de la couleur noire sur la surface totale de l'image. Avec cette technique d'analyse, la figure 9 montre la variation du taux volumique dans un plan situé à 0.5 mm du bord du trou (plan avec la couleur rouge sur la figure 9-b) le long de l'axe (OY). On constate que proche du bord du trou, le taux volumique de fibres varie atteint une valeur maximale qui est de l'ordre de 67 %. A cet endroit, l'analyse des images montre que le taux de porosité est de l'ordre de 5 % (voir Fig. 10), ce qui peut expliquer la présence des fissures lors du chargement et la décohésion des fibres par le manque de résine.



(a) (b)

Fig. 8. Image prise par un microscope optique avec un grossissement de 12.5; (a) : image brute montrant les fibres, la résine et porosités en surface; (b) : image traitée ou binaire montrant les porosités.



(a) *(b)*

Fig. 9. Variation du taux volumique de fibres dans un plan situé à 0.5 mm du bord de trou avec (a) résultat obtenu après l'analyse d'images, (b) position des plans analysés par la méthode optique.

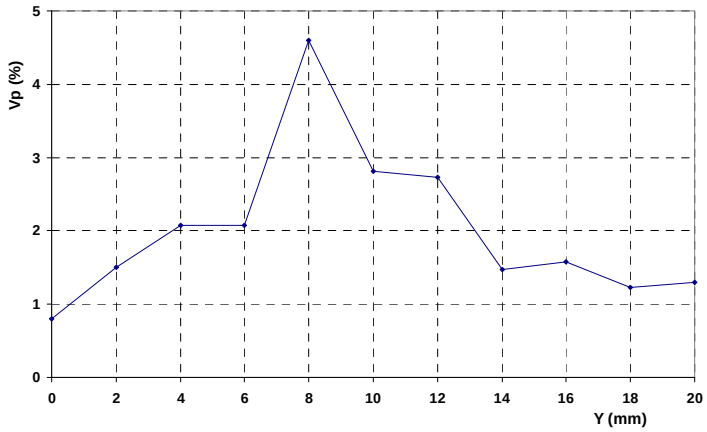


Fig. 10. Variation du taux volumique de porosité dans un plan situé à 0.5 mm du bord de trou

4. Conclusion

Dans le cadre de ce travail, des essais de traction sur des éprouvettes trouées par perçage et par moulage ont été réalisés. Les résultats obtenus montrent que les éprouvettes moulées se caractérisent par une contrainte à la rupture plus importante que celles des éprouvettes percées. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux de [10]. Bien que le taux volumique de fibres au voisinage du trou moulé soit plus important que celui des éprouvettes percées, on a constaté grâce à la jauge électrique axiale que la rigidité en traction des plaques percées est plus importante que celles des plaques moulées. Ce résultat s'explique par la présence d'une zone riche en résine au niveau de l'emplacement de la jauge axiale (Fig. 6). De plus, les images obtenues par caméra CCD montrent que les mécanismes d'endommagements des plaques percées sont différents de ceux des plaques moulées.

Pour les éprouvettes à trous moulés, il reste à développer un modèle numérique qui prend en compte d'une part la trajectoire des fibres en bord du trou et d'autre part la variation du taux volumique de fibres et le taux volumique de porosités au voisinage du trou, afin améliorer le dialogue essais calcul.

BIBLIOGRAPHIE

[1] P. Erik, E. Ingvar, Z. Leif, "Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates", *Composite Part A*, Vol. 31, pp. 141-151, 1997.

[2] R. Zitoune, F. Collombet, F. Lachaud, R. Piquet, “Experiment-calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fibre composite drilling phase”, *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 455–466, 2005.
[3] R. Zitoune, F. Collombet, “Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures”, *Composites Part A*, Vol. 38, pp. 858-866, 2007.
[4] J. P. Davim, R. Pedro, “Drilling carbon reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study”, *Materials and Design*, Vol. 24, pp. 315-324, 2003.
[5] H. J. Lin, C. C. Tsai, “Failure analysis of bolted connections of composites with drilled and moulded-in hole”, *Composite Structures*, Vol. 30, pp. 159-168, 1995.
[6] Z. Hamdoun, L. Guillaumat, J.L.Lataillade, “Influence of the drilling on the fatigue behaviour on the carbon/epoxy laminates”, *ECCM 11*, Vol. 1, pp. 301-302, 2004.
[7] P.N. Ghidossi, M. El Mansori, F. Pierron “Edge Machining Effects on the Failure of Polymer Matrix Composite Coupons”, *Composites: Part A* Vol. 35. pp. 989-999. 2004.
[8] S. Baselga Arino, M. Maza Frechin, “Methods for modelling the ultimate strength of orthotropic plate with a central hole under uniaxial tension”, *J. MATER SCI*, Vol. 41,pp. 4365-4372, 2006.
[9] L. Toubal, M. Karama, B. Lorrain, “Stress concentration in a circular hole in composite plate”, *Composite Structures*, Vol. 68, pp. 31-36, 2005
[10] S. P. Ng, P. C. Tse, K. J. Lau, “Progressive failure analysis of 2/2 twill weave fabric composites with moulded-in circular hole”, *Composites: Part B*, Vol. 32, pp. 139–152, 2001
[11] H. J. Lin, C. C. Tsai, “Failure analysis of bolted connections of composites with drilled and moulded-in hole”, *Composite Structures,* Vol. 30, pp. 159-168, 1995.