

Caractérisation du comportement mécanique d'un composite à usage orthopédique

KACIMI Bachir¹, TEKLAL Fatiha², DJEBBAR Arezki³

*Laboratoire de Mécanique, Structures et Energétique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
BP 17 RP, Tizi-Ouzou Algérie*

¹kacimiumto@yahoo.fr

²fatihagm07@yahoo.fr

³ar.djebbar@yahoo.fr

Résumé— Le travail présenté dans cet article est l'élaboration et la caractérisation de matériaux composites à usage orthopédique sous sollicitations statiques et dynamiques. Des essais de traction et de flexion trois points sont menés sur un stratifié hybride ainsi que des essais sur des stratifiés renforcés uniquement avec un seul renfort à la fois, cela afin de déterminer l'apport de chaque renfort dans le matériau hybride. La détermination des énergies de rupture par des essais de chocs Charpy ont conduit à identifier la réponse du matériau à la propagation des fissures. Les essais mécaniques et observations réalisés ont permis d'identifier un effet notable de sens de découpe des éprouvettes sur le comportement mécanique et les paramètres élastique des matériaux.

Mots Clés—Composite, endommagement, chocs, hybride, perlon.

I. INTRODUCTION

Les exigences toujours sévères dans les matériaux composites, en termes de sécurité aussi bien qu'en termes de maîtrise de consommation énergétique et de conjoncture environnementale, ont incité les utilisateurs des composites à développer des structures légères présentant une meilleure résistance mécanique. L'objectif est notamment d'alléger la structure tout en conservant une bonne rigidité. La progression rapide des techniques de mise en forme des matériaux composites a contribué largement à leurs croissances à l'échelle mondiale. Il est possible de concevoir des structures adaptées aux applications bien définies. Toutefois, la sensibilité des structures aux chocs à basse vitesse soulève beaucoup d'inquiétudes et restreint relativement leur champ d'applications. En effet, une structure peut être exposée incontestablement à des chocs de divers corps étranges, de taille, de forme et de rigidité variable pendant les phases de maintenances ou en service. Ces chocs provoquent généralement des dommages locaux ayant des conséquences souvent dramatiques sur les performances mécaniques des structures en service [1- 4].

Plusieurs méthodes de caractérisation de ces matériaux ont été mises au point. Elles permettent le choix optimal du type de composite et mettent en évidence les paramètres prépondérants dans le comportement du matériau [5, 6].

Dans notre étude, il s'agit de définir certaines propriétés mécaniques pour un matériau composite obtenu avec le procédé de moulage sous vide ; en combinant les différents types de renfort (verre et perlon). Ainsi que de voir leur comportement et les mécanismes de rupture engendrés suite à l'application de chargements statiques et dynamique.

II. MATÉRIAUX DE L'ETUDE

Les matériaux composites utilisés dans cette étude, proviennent de l'Office National de l'Appareillage et Accessoires pour Personnes Handicapés (O.N.A.A.P.H). Ils sont destinés à la fabrication de prothèses à usage externe. Nous avons utilisé une matrice en polyester thermodurcissable. Deux types de renforts de natures différentes interviennent dans la fabrication du stratifié (matériau hybride) : l'un en fibre de verre de type E (fig.1.a) pour donner la résistance, l'autre en perlon (un des noms commerciaux des fibres de polyamides PA66) à tissage plus fin (fig.1.b) pour donner une meilleure souplesse et un meilleur aspect extérieur des pièces finies. Ces renforts se présentent sous forme de tricot tubulaire de différents diamètres (fig.1).



Fig.1 Renforts utilisés : a) fibres de verre, b) fibres de polyamide.

La mise en évidence de la contribution des différents renforts nous ont conduits à l'élaboration des différents stratifiés qui sont montrés au tableau 1. Nous désignons par la lettre P le renfort en Perlon et par la lettre V le renfort de Verre. Le lot A (lot de référence) est le stratifié hybride utilisé par l'entreprise pour la fabrication des prothèses à usage externe.

TABLEAU I. DIFFERENTS LOTS D'ÉPROUVETTES D'ESSAIS

| Lots | Ordre des plis |
|------|------------------------|
| A | 2P2V2P |
| B | 6 V |
| C | 6 P |
| D | 2P2V...jusqu'à 18 plis |
| E | 18V |
| F | 18P |

II.1. ELABORATION DES ÉPROUVETTES

Les plaques de stratifiés ayant servi au découpage des épreuves sont obtenues par le même procédé de fabrication que celui de l'O.N.A.A.P.H dans la réalisation des prothèses, à savoir l'injection au sac sous vide (fig.2).

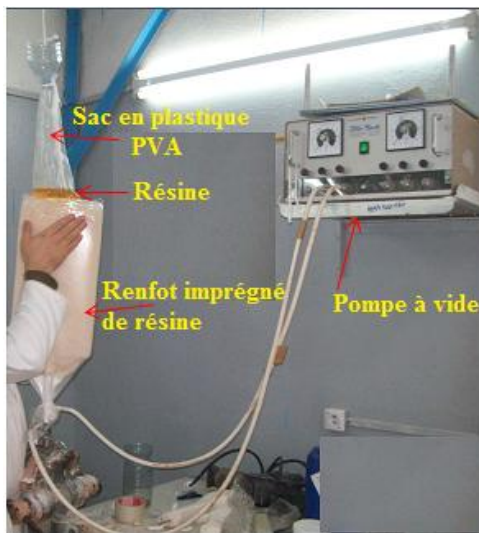


Fig.2 Procédé d'injection au sac sous vide.

Les épreuves soumises aux essais sont découpées dans les plaques suivant deux directions définies relativement à l'axe du renfort tubulaire. Direction longitudinale (L) parallèle à l'axe du tissu tubulaire, et transversale (T) orthogonale à la direction longitudinale.

III. ESSAIS STATIQUES

Les essais de flexion et de traction ont été réalisés sur une machine de traction de type Instron 5800. C'est une machine universelle qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion, avec bien sûr changement de mors qui se montent et démontent facilement, accompagnée par des vitesses de chargement contrôlées automatiquement et de cellules de charge de 10KN et de 200KN. Nous avons effectués

des essais de traction à une vitesse de 1 mm/mn et des essais de flexion à une vitesse de 2 mm/mn et une température de 25°C.

III.1. GÉOMÉTRIE DES ÉPROUVETTES DE FLEXION

Les dimensions des épreuves utilisées pour les essais de flexion trois points (fig.3) ont été choisies selon la norme NF EN ISO 14125, ASTM D 790 [7] c'est à dire:

$l = 20h + 20$ mm ; b est fonction de h comme indiqué ci-dessous : $10 < b \leq 15$ mm $h \leq 5$ mm.

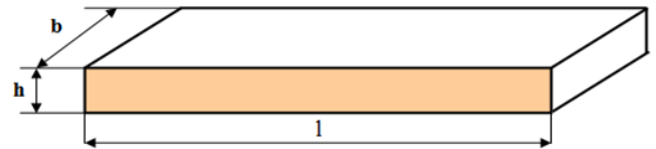


Fig.3 Géométrie des épreuves de flexion

III.2. RÉSULTATS DES ESSAIS DE FLEXION TROIS POINTS

Le dépouillement d'un essai de flexion trois points à l'aide des équations (1) et (2) permettent de déterminer respectivement, la contrainte normale et la déformation, ainsi nous pouvons tracer le comportement de matériau et de déduire son module Young.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{6hf}{L^2} \quad (2)$$

σ : la contrainte normale.

ε : la déformation relative.

f : flèche mesurée au cours de l'essai pour chaque charge.

P : la charge appliquée.

L : distance entre appuis.

Les caractéristiques mécaniques des différents lots sont représentées dans le tableau II et leurs courbes d'évolution contraintes-déformations sont représentées par la figure 4 et figure 5.

TABLEAU II. CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES LOTS A, B ET C EN FLEXION

| Lots | σ_r (MPa) | ε_r (%) | E (MPa) |
|------|------------------|---------------------|------------|
| AL | 55 ± 5 | 6,7 ± 0,66 | 2209 ± 209 |
| AT | 75 ± 6 | 5,7 ± 0,46 | 2617 ± 123 |
| BL | 131 ± 6 | 4,2 ± 0,66 | 5529 ± 494 |
| BT | 136 ± 8 | 3,2 ± 0,29 | 6277 ± 453 |
| CL | 41 ± 4 | 5,8 ± 0,60 | 2071 ± 199 |
| CT | 59 ± 3 | 5,4 ± 0,63 | 2349 ± 186 |

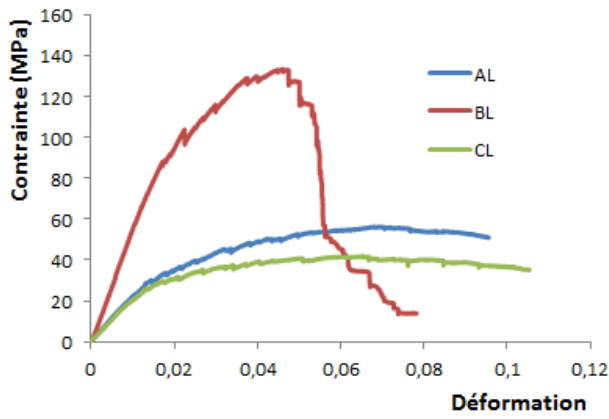


Fig.4 Evolution contrainte-déformation des lots AL, BL et CL

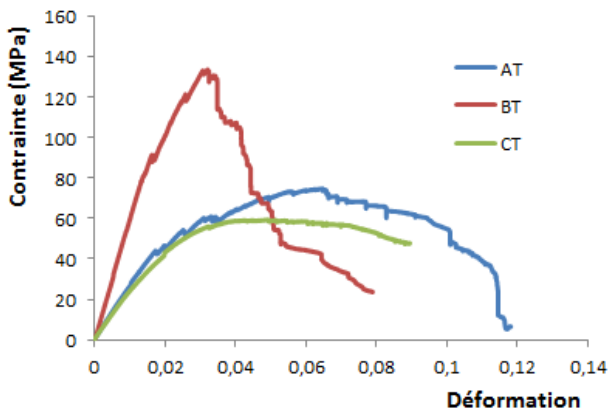


Fig.5 Evolution contrainte-déformation des lots AT, BT et CT

III.3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Comme le montre la figure 4 et 5 le comportement à rupture en flexion des composites A, B et C, nous relevons que les courbes d'essais statiques de flexion trois points obtenues suivant les deux directions (longitudinale et transversale), nous permettent de distinguer trois zones ; une zone linéaire correspondant au comportement élastique du matériau, puis une deuxième non linéaire associée à l'apparition de la déformation plastique et une zone de rupture. Toutes les éprouvettes présentent un comportement similaire pour le même lot. Les courbes des échantillons qui contiennent des fibres de verre seul (lots BL et BT) présentent un plateau non linéaire court qui précède la rupture, contrairement à ceux qui contiennent des fibres de polyamide.

La résistance à la rupture est plus importante pour les lots d'éprouvettes transversales, elle reste plus faible dans les échantillons qui contiennent des plis de polyamide. Ce qui montre que la résistance à la rupture est dépendante de la direction de sollicitations. De même pour les modules d'élasticité, Cela est dû à l'architecture de tricot tubulaire des renforts utilisés.

Au cours des essais de flexion trois points, nous obtenons des ruptures en traction (Mode I) pour les lots du stratifié B, qui correspondent en premier lieu à la rupture de la matrice suivi de la rupture des fibres. Pour les stratifications renfermant du perlon, nous obtenons des ruptures par courbure de

l'échantillon qui correspondent à la rupture de la matrice suivis de la rupture des fibres et du glissement des plis (fig. 6).



Fig.6 Eprouvettes rompues en flexion des lots A, B et C.

III.4. EFFET DE L'ANISOTROPIE

Les résultats des contraintes à rupture obtenus en flexion sur les éprouvettes des lots A, B et C dans le sens longitudinal et transversal figure 7 montrent que la résistance à la rupture est dépendante de la direction. En effet le rapport entre la contrainte transversale et longitudinale est de 0,73 pour le lot A et 0,95 pour les lots B et 0,70 pour le lot C. De même pour les modules d'élasticité figure 8, en faisant le rapport entre le module d'élasticité transversal et longitudinal, nous obtenons 0,84 pour le lot A, 0,88 pour le lot B et C. Cela est dû à la structure du renfort et au type de moulage (défauts existant dans le matériau). Cette divergence peut être due également à la distribution non uniforme des contraintes dans l'essai de flexion.

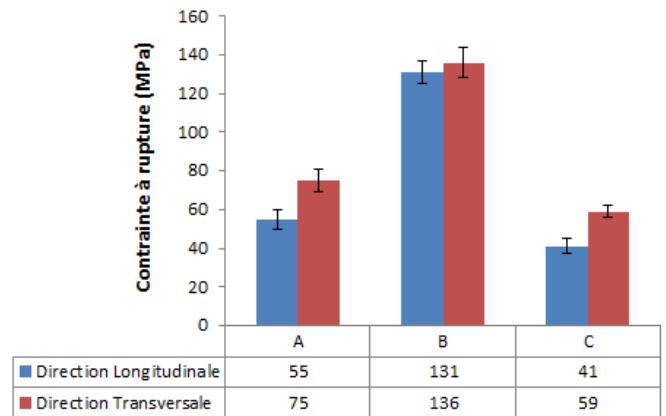


Fig.7 Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture σ_r

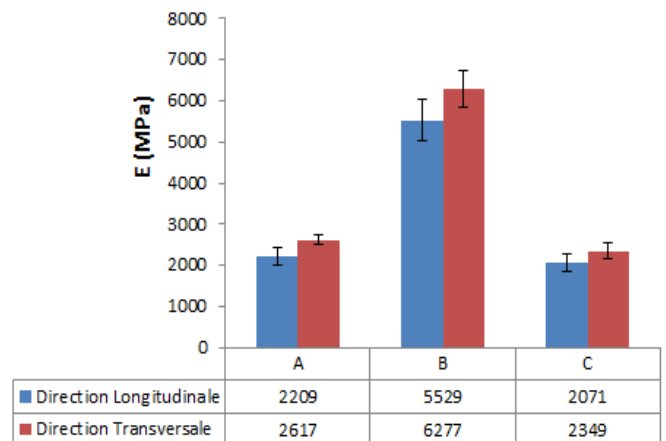


Fig.8 Influence de l'anisotropie sur les modules d'élasticité E

III.5. ESSAIS DE TRACTION

Lors de la réalisation des essais de traction, la souplesse machine découle des jeux du montage, de la déformation des pièces transmettant les efforts ainsi que dans notre cas la possibilité de déformation au niveau des talons en aluminium et de l'Araldite font que le déplacement imposé par la traverse n'est pas égal au déplacement subi par l'échantillon. Pour obtenir une mesure des déformations réelles au niveau de l'échantillon, une méthode optique de suivi de marqueurs a été utilisée.

III.6 GEOMETRIE DES EPROUVETTES DE TRACTION

Les dimensions des éprouvettes utilisées pour les essais de traction (fig.9) ont été choisies selon la norme ISO 527- 4 et 5 [7].

h = 2 à 10 mm ; b = 25 à 50 mm
 $l_T = 50$ mm ; $l_0 = 150$ mm
 L = 250 mm

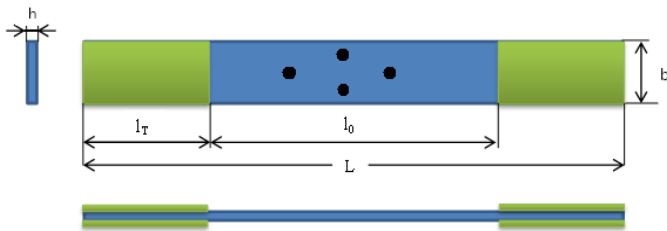


Fig.9 Géométrie de l'éprouvette de traction

TABLEAU III. CARACTERISTIQUES MECANQUES DES LOTS A, B ET C EN TRACTION

| Lots | σ_r (MPa) | ϵ_r (%) | E (MPa) | μ |
|------|------------------|------------------|------------|--------------|
| AL | 25,45 ± 1,05 | 6,92 ± 0,82 | 3100 ± 77 | 0,33 ± 0,041 |
| BL | 46,04 ± 5,50 | 5,56 ± 0,79 | 4716 ± 443 | 0,33 ± 0,071 |
| CL | 17,45 ± 0,60 | 5,32 ± 1,89 | 2569 ± 248 | 0,36 ± 0,034 |

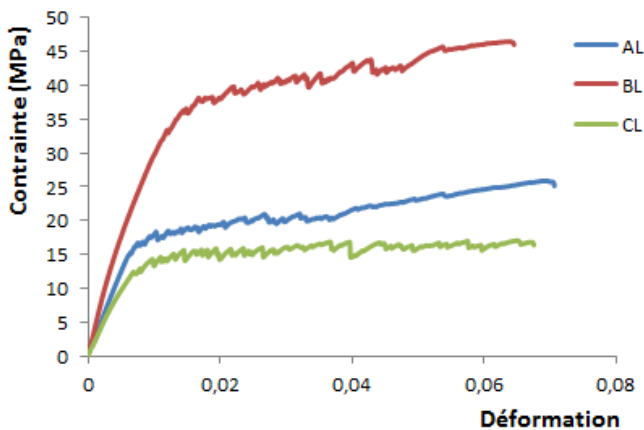


Fig.10 Evolution contrainte-déformation des lots AL, BL et CL en traction

III.7. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Comme le montre la figure 10, le comportement à rupture en traction de toutes les stratifications testées dans la direction Longitudinale, nous permettent de distinguer deux zones; une zone linéaire correspondant au comportement élastique du matériau, puis une deuxième non linéaire associée à l'apparition d'endommagements conduisant à la rupture totale

du composite. Le processus d'endommagement s'initie en premier lieu par de multiples fissurations aléatoires de la matrice tout au long de l'éprouvette. En deuxième lieu par ruptures isolées des fibres les plus tendues, à laquelle s'ajoute la croissance de l'endommagement autour des ruptures isolées, par délaminage et rupture des premières fibres voisines sous l'effet de charge. Avec l'augmentation de la contrainte axiale, la rupture de nouvelles fibres est en effet de plus en plus importante.

Tous les échantillons testés pour les trois lots en traction, présentent un plateau plastique plus important et intéressant. Les caractéristiques mécaniques calculées présentent une dispersion. En effet, en traction, tout le volume est soumis à une contrainte d'extension uniforme. En outre, la répartition des défauts dans ce volume est plus importante à l'intérieur (défaut volumique) qu'en surface (défaut surfacique) et peut être à l'origine d'une rupture à un chargement plus faible.

Les propriétés mécaniques sont plus importante dans les éprouvettes qui contiennent de renfort de verre (fig.12 et 13), cela confirme les résultats obtenu en flexion trois points pour ces lots. L'effet de la direction de sollicitations obtenu en flexion est confirmé par les valeurs des coefficients de poisson calculés pour les trois stratifications.

Au cours des essais de traction, on entend des craques avant la rupture totale de l'échantillon, qui correspondent en premier lieu à la rupture de la matrice suivi par la rupture des fibres. Nous obtenons des ruptures en traction (Mode I) pour tous les lots. La majorité des éprouvettes sont rompues dans la zone utile près du centre de l'échantillon (fig.11).

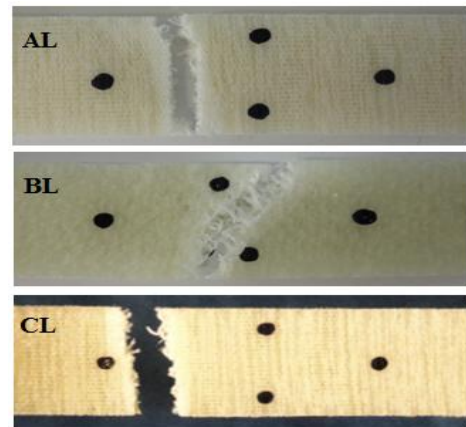


Fig.11 Eprouvettes rompues en traction

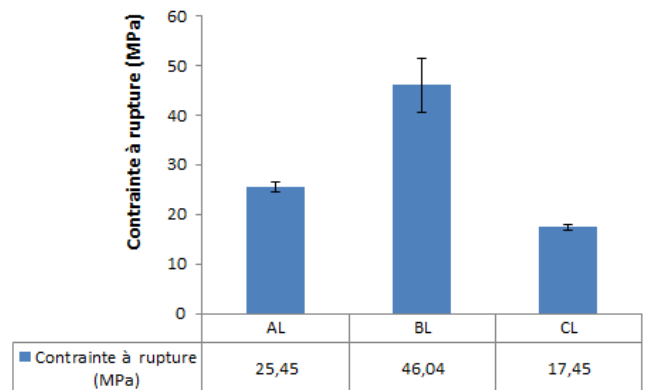


Fig.12 Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture σ_r

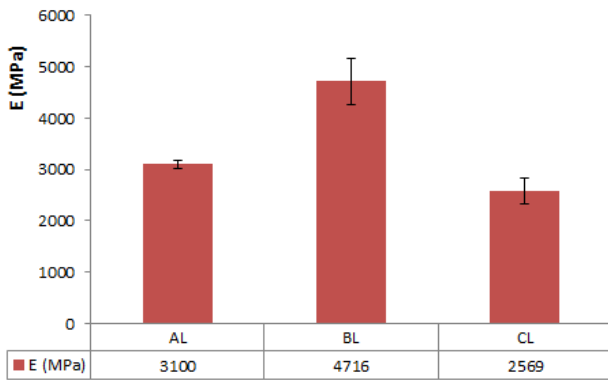


Fig.13 Influence de l'anisotropie sur les modules d'élasticité E

III.8. ESSAI DE CHOC CHARPY

Les essais de choc sont effectués sur des éprouvettes prismatiques sans entaille et avec entaille en V de dimension $(60 \times 10 \times h) \text{ mm}^3$ découpées à partir de plaques composite des lots D, E et F selon le sens longitudinal et transversal. L'entaillage a été réalisé sur une fraiseuse. Les longueurs des entailles sont effectués sur une profondeur de 1,5 mm de façon à satisfaire la condition suivante : $0,2 < a/B < 0,6$. a est la longueur de l'entaille et B l'épaisseur de l'éprouvette. La géométrie de l'éprouvette est représentée sur la figure 14. W représente la largeur de l'éprouvette.

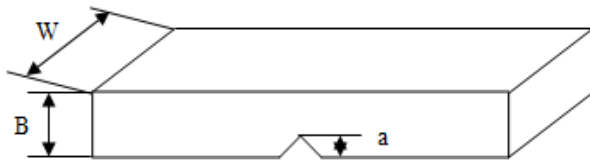


Fig.14 Géométrie de l'éprouvette entaillée utilisée en essai de choc

III.9. LE MOUTON PENDULE ZWICK GAMME 5113

Les essais de choc ont été effectués sur une machine de type mouton pendule universel Zwick 5113, qui couvre les méthodes Charpy et Izod selon ASTM et ISO de même que les essais de choc traction selon ISO dans une plage jusqu'à 50 Joule. Grâce à l'utilisation de différentes longueurs de pendule et d'angles de déclenchement de 160/124,4, toutes les vitesses d'impact (2,93 / 3,46 / 3,85 m/s) exigées par les normes peuvent être sélectionnées. La machine est semi instrumentée, elle nous donne les valeurs de l'énergie de choc et de la résilience seulement. Pour nos essais, nous avons utilisé un marteau de 7,5 Joule pour tous les lots à l'exception des lots FL, FT (sans entaille) dont nous avons été obligé de changer le marteau à 15 J pour obtenir la rupture des échantillons et avec une vitesse de 3,85 m/s.

III.10. RESULTATS DES ESSAIS DE CHOC

D'après les figures 14 et 15 nous constatons que les valeurs des énergies de rupture (absorbées) des éprouvettes découpées dans la direction longitudinale et transversale

présentent une dispersion qui est une caractéristique des matériaux hétérogènes. En effet, la distribution de taux de fibres dans la composition des stratifiés ainsi que leurs orientations n'est pas uniforme, ce qui provoque des chemins de rupture souvent tortueux qui ne suivent pas forcément la direction de l'entaille initial est qui sont différents d'une éprouvette à une autre. La présence de perlon dans les stratifications nécessite une énergie de rupture plus importante, tandis que la stratification en perlon seul lot FL présente la plus grande valeur de l'énergie critique de rupture. L'énergie totale perdue par le marteau augmente avec l'augmentation des surfaces rompues ce qui prouve que la rupture est un phénomène consommateur d'énergie.

Les faciès de rupture obtenus pour tous les lots sont en mode I qui présentent des ruptures de matrice et des fibres (fig.17).

Avec entaille

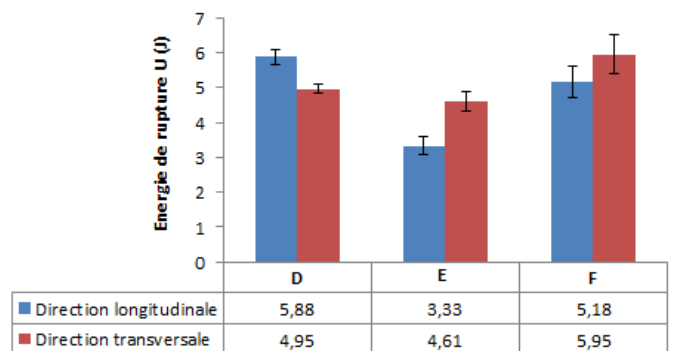


Fig.15 Energie de rupture avec entaille pour les lots D, E et F

Sans entaille

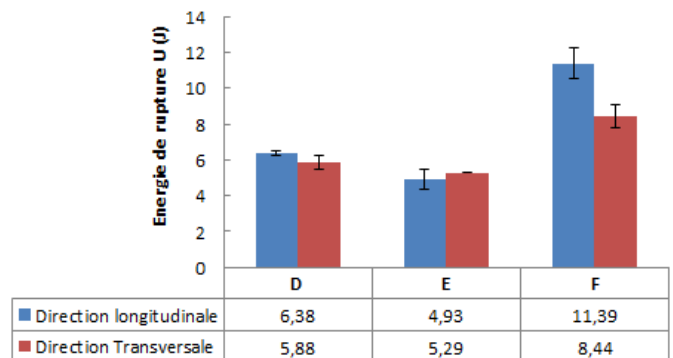


Fig.16 Energie de rupture sans entaille pour les lots D, E et F



Fig.17 Eprouvettes rompues par choc des lots D, E et F

III.11. OBSERVATION DES FACIES DE RUPTURE

Les faciès de rupture des échantillons soumis au choc ont été observés au microscope électronique à balayage.

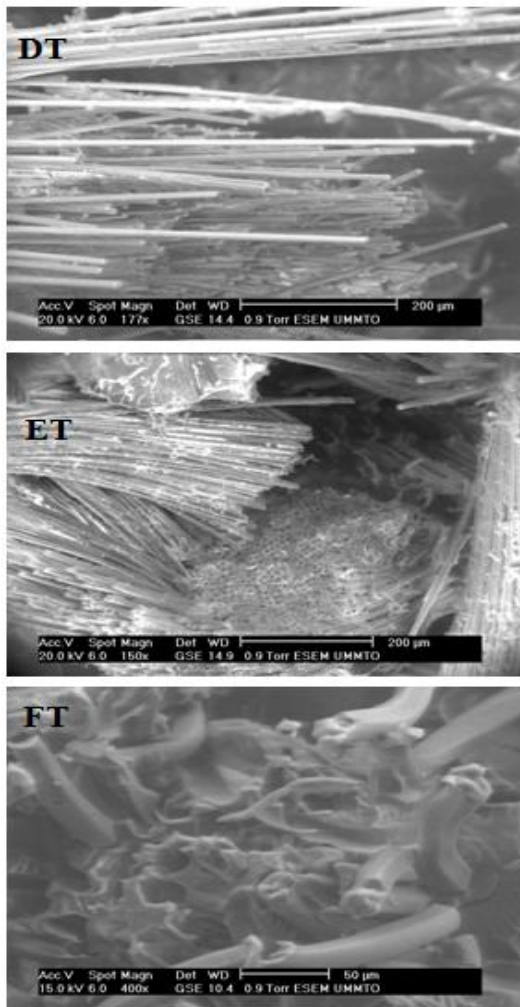


Fig.18 Micrographie MEB des éprouvettes rompues par choc des lots D, E et F dans le sens Transversal.

Afin d'interpréter les faciès de rupture des éprouvettes sollicitées mécaniquement, il est judicieux de s'intéresser tout d'abord à la structure du renfort réalisé sous forme de tricot et ce pour des raisons purement technique et aussi pour répondre correctement à l'application visée, à savoir, la mise en œuvre d'une articulation associée à un être humain.

En effet, en sollicitant mécaniquement ce renfort très particulier nous découvrons qu'il est fabriqué de manière à répondre dans plusieurs directions. Toutefois, deux directions privilégiées sont matérialisées. Il s'agit de la direction longitudinale et transversale qui a fait, par ailleurs, l'objet de ce travail.

Les courbes contraintes-déformations associées aux composites avec renfort tricot présentent un plateau élastoplastique. En réalité, ce comportement élastoplastique est associé au mode de reconstitution de l'architecture du tricot dont les fibres sollicitées ne représentent qu'un seul jet très réduit. Cet ensemble de fibres est associé à la direction privilégiée concernée. Ainsi, l'analyse morphologique des différents faciès de rupture montre clairement le mode de rupture par cascade des différents jets de fibres. En effet, les différents jets de fibres associées à différentes directions se cassent en des temps différents et aussi à des niveaux différents

(faciès de l'éprouvette ET). Aussi, il y a lieu de signaler que certain jet ne sont aucunement sollicités mécaniquement et par conséquent ils apparaissent intacts sur les micrographies MEB (faciès de l'éprouvette DT). Des mécanismes de déchaussement des fibres sont observés sur les stratifiés (faciès de l'éprouvette FT).

IV. CONCLUSION

Le dépouillement des résultats des essais nous permet d'accéder aux caractéristiques intrinsèques des matériaux. Les propriétés mécaniques varient selon le nombre de couches et leur disposition ainsi que le sens d'orientation des renforts. La nature de la matrice a une influence sur le comportement mécanique du composite. Les essais effectués présentent des dispersions des caractéristiques intrinsèques des matériaux. Elles sont dues au mode d'élaboration des éprouvettes, à l'architecture des types de renfort utilisés pour les différentes stratifications et au type de sollicitation (traction et flexion).

La présence du perlon dans le matériau lui offre une souplesse car les éprouvettes contenant du polyamide présentent un palier plastique plus important, ainsi elles nécessitent une grande énergie critique de séparation des surfaces par rapport à celle qui contiennent seulement de renfort verre. Les différents jets de fibres associées à différentes directions dans les matériaux se cassent en des temps différents et aussi à des niveaux différents.

Notre étude expérimentale n'est qu'une première approche et il conviendrait de développer un programme plus complet. Néanmoins elle montre que les essais de flexion trois points, de traction et les essais de chocs permettent bien d'identifier les mécanismes de rupture pouvant se produire dans des structures en service.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Cantwell W.J., Morton J. The impact resistance of composite materials – A review. *Composites*, Vol. 22, pp. 347-362, 1991.
- [2] Kaczmarek H., Maison S., Comparative ultrasonic analysis of damage in CFRP under static indentation and low velocity impact, *Composites Science and Technology*, Vol. 51, pp. 11-26, 1994
- [3] Tai N.H., Yip M.C., Lin J.L., Effects of low-energy impact on the fatigue behaviour of carbon/epoxy composites, *Composite science and technology*, Vol. 58, pp 1-8, 1998
- [4] Zhang Z.Y., Richardson M.O.W., Low velocity impact induced damage evaluation and its effect on the residual flexural properties of pultruded GRP composite, *Composite structures*, Vol. 81 (2), pp. 195-201, 2007
- [5] Youngchan K., Davalo J. F. & Barbero E. J., "Progressive failure analysis of laminated composite beam, *Journal of composite materials*", Vol. 30, N° 5, PP. 536-560, 1996.
- [6] Prusty B. G., Satsangi S. K. & Ray C., "First ply failure analysis of laminated panels under transverse loading", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 20, N° 8, pp. 671-684, 2001.
- [7] Patricia KRAWCZAK, "Essais des plastiques renforcés", Doc. AM 5 405, Editions Techniques de l'ingénieur 2012.