

Caractérisation mécanique de matériaux stratifiés hybrides composites biosourcés/métal pour le mobilier urbain

Mechanical characterization of bio-based composite/metal laminates for an application in street furniture

Noëlle Edwige Ngoufo Donkeng^{1,2,3}, Jérôme Rousseau¹, Sébastien Chevalier², Vincent Placet³

1 : Laboratoire DRIVE EA1859, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Nevers, France
e-mail : Noelle_Ngoufo-Donkeng@etu.u-bourgogne.fr, jerome.rousseau@u-bourgogne.fr

2 : Laboratoire ICB, UMR 6303 CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France
e-mail : sebastien.chevalier@u-bourgogne.fr

3: FEMTO-ST, UFC/ENSMM/UTMM, UMR 6174 CNRS, Département Mécanique Appliquée,
Univ. Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France
e-mail : vincent.placet@univ-fcomte.fr

Résumé

Dans ce travail, on se propose d'étudier l'influence de trois paramètres de fabrication dans le cadre de l'élaboration d'hybrides composites biosourcés/acier. Ces paramètres sont la méthode d'assemblage entre le composite et le métal, la séquence d'empilement de la partie composite de l'hybride et enfin la répartition des couches de composite et d'acier dans l'épaisseur. L'étude a été menée au travers d'essais d'impact à différentes énergies et d'essais quasi-statiques en flexion trois points. Pour chacun des paramètres étudiés, l'influence sur les propriétés mécaniques de l'hybride est évaluée. Les résultats obtenus montrent que ces propriétés dépendent essentiellement de la répartition relative de l'acier et du composite dans l'épaisseur.

Abstract

In this work, it is proposed to study the influence of three manufacturing parameters in the development of bio-based composite/steel hybrids. These parameters are the method of assembly between composite and metal, the distribution of composite and steel layers through the thickness of the hybrid, and the stacking sequence of the composite part of the hybrid. The study was conducted through impact tests at different energies and quasi-static three-point bending tests. For each of these parameters, the influence on the mechanical properties of the hybrid is evaluated. The results show that these properties depend essentially on the relative distribution of steel and composite through the thickness.

Mots Clés : Hybrides composites biosourcés/acier, flexion, impact.

Keywords : bio-based composite/steel hybrids, bending, impact.

1. Introduction

Dans la recherche permanente de matériaux combinant à la fois légèreté et bonnes performances mécaniques, les composites sont largement sollicités dans les domaines de l'aéronautique et de l'aérospatial du fait de leurs caractéristiques physiques et mécaniques particulièrement attrayantes.

Les composites sont cependant très sensibles au choc, et ceci constitue un réel frein à leur développement. Dans le milieu aéronautique, des solutions hybrides composite/métal ont été développées pour compenser cette faiblesse [1]. Ces assemblages consistent en une alternance de plis de composites et de minces feuilles de métal. Leur avantage est qu'ils permettent de tirer profit des deux classes de matériaux présents, tout en limitant certains de leurs inconvénients [2]. Plusieurs études ont été faites sur de tels hybrides fabriqués à partir de fibres synthétiques (verre, carbone et aramide) [3]. Cependant les préoccupations environnementales imposent d'explorer un recours

potentiel à des hybrides réalisés à partir de fibres naturelles. Cette nouvelle famille de matériaux a été très peu explorée et développée jusqu'ici. Seules quelques études récentes sont disponibles à l'heure actuelle dans la littérature ouverte [4-5]. L'objectif de ce travail est donc de contribuer à l'accroissement des connaissances sur le sujet et de participer à l'évaluation des potentialités des solutions stratifiées hybrides composites biosourcés/métal en vue d'une application au mobilier urbain.

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'influence de trois paramètres de fabrication sur les propriétés mécaniques d'hybrides à renforts unidirectionnels de lin. Le premier paramètre que nous avons étudié est l'influence de l'ajout d'un film adhésif à l'interface métal/composite. Le film considéré dans notre cas est un film de polyester. Le deuxième paramètre est la séquence d'empilement de la partie composite de l'hybride. Pour cette étude, nous comparons des hybrides en configuration 2/1 ayant leurs plis de composite dans un empilement croisé avec ceux ayant leurs plis de composite dans l'empilement quasi-isotrope. Le troisième paramètre est la répartition des couches de composite et d'acier dans l'épaisseur. Pour cela, des hybrides en configuration 2/1 (deux couches d'acier et une couche de composite), et des hybrides en configuration 3/2 (trois couches d'acier et deux couches de composite) sont comparés. Pour ces deux configurations, les hybrides ont été réalisés avec une même épaisseur totale.

2. Matériau et Méthode

2.1 Matériau

Le matériau étudié est un hybride biocomposite/métal fabriqué à base de fines couches de métal et de composite. Le métal utilisé est un acier inox 1.4310 et le composite est un préimprégné unidirectionnel lin-époxy commercialisé par la société Lineo sous la référence Flaxpreg T-UD 110. La masse des fibres est de 110 g/m² et représente 50% de la masse du composite.

Les plaques hybrides de dimensions 300×300 mm² ont été fabriquées par thermocompression. Le drapage de l'hybride est réalisé en répartissant 16 plis de composite entre 2 ou 3 couches d'acier selon le type de configuration. Les faces intérieures des couches d'acier ont été polies au papier abrasif P 120 puis nettoyées à l'éthanol. L'hybride est ensuite porté à une température de 130°C sous une pression de 3 bars pendant 1h.

Pour l'étude de l'influence de la méthode de collage, deux méthodes ont été comparées. Le collage direct (sans film adhésif) où l'adhésion acier/composite est assurée par la résine du composite, et le collage indirect où un film adhésif de polyester a été ajouté aux interfaces métal/composite. L'épaisseur finale de ces plaques est d'environ 2,9 mm.

Pour l'étude du deuxième paramètre lié à la séquence d'empilement du composite de l'hybride deux types d'hybrides sont considérés. Des hybrides avec leur partie composite dans l'empilement croisé et des hybrides avec leur partie composite dans l'empilement quasi-isotrope. L'épaisseur totale des plaques est également d'environ 2,9 mm.

Pour ce qui est de l'étude de l'influence de la répartition des couches d'acier et de composite dans l'épaisseur, les configurations 2/1 (deux couches d'acier et une couche de composite) et 3/2 (trois couches d'acier et deux couches de composite) ont été considérées. Dans la configuration 2/1, les deux couches de métal ont chacune une épaisseur de 0,3 mm, tandis que dans la configuration 3/2, les trois couches d'acier ont chacune une épaisseur de 0,2 mm. L'épaisseur totale pour les deux configurations est d'environ 3,1 mm.

2.2 Essais de flexion trois points

Dans cette étude, des essais de flexion trois points ont été réalisés selon la norme ISO 14125. Le dispositif de flexion a été monté sur une machine de traction Shimadzu équipée d'un capteur de force de 5 kN. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de déplacement de la traverse de 2 mm/min sur des éprouvettes rectangulaires de 100 mm de long et de 15 mm de large. La distance entre les deux appuis inférieurs est de 60 mm.

La force F et le déplacement S de la traverse enregistrés pendant l'essai permettent de déterminer le module en flexion au travers de l'équation 1 (Eq. 1).

$$E = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta s} \quad (\text{Eq. 1})$$

L est la distance entre les deux appuis inférieurs, b et h sont respectivement la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette.

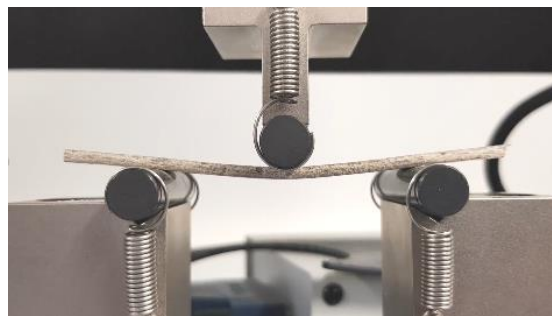


Fig. 1. Flexion trois points.

2.3 Essais d'impact

Les essais d'impact ont été réalisés sur une machine d'essai de type tour de chute (Fig. 2) équipée d'un impacteur à bout hémisphérique de diamètre 12,7 mm et d'une masse tombante d'une valeur de 4,79 kg. Les essais ont été réalisés à 10, 20 et 50 J sur des éprouvettes de dimensions 100×100 mm².



Fig. 2. Machine d'impact (Instron Dynatup 9250HV).

3. Résultats et discussion

3.1 Influence de la méthode de collage

Le tableau 1 (Tab. 1) ci-dessous donne la stratification des éprouvettes après leur prélèvement sur les grandes plaques.

Types de collage	Hybride
Collage direct (sans film)	[Acier/(0°/90°) ₄] _s
Collage indirect (avec film)	[Acier/film/(0°/90°) ₄] _s

Tab. 1. Stratifications des hybrides sans film et avec film.

Les résultats de flexion et d'impact obtenus en utilisant les deux modes de collage sont visibles sur la figure 3. La figure 3.b présente les modules en flexion d'hybrides fabriqués à partir des deux méthodes de collage. Il est possible d'observer que les valeurs de module sont quasiment identiques dans les deux cas. Sur les courbes forces-déplacement (Fig. 3.a) on note néanmoins une plus grande déformation du matériau avant la rupture en présence du film. Les faciès de rupture après flexion sont représentés sur la figure 4 (Fig. 4). Ils permettent de constater que la rupture se fait essentiellement par flambage dans les deux cas considérés. Une observation plus proche ne laisse entrevoir aucun délaminage à l'interface composite/métal. Ceci montre qu'avec la résine époxy, l'ajout ou non d'un film conduit tout de même à une bonne adhésion entre le métal et le composite.

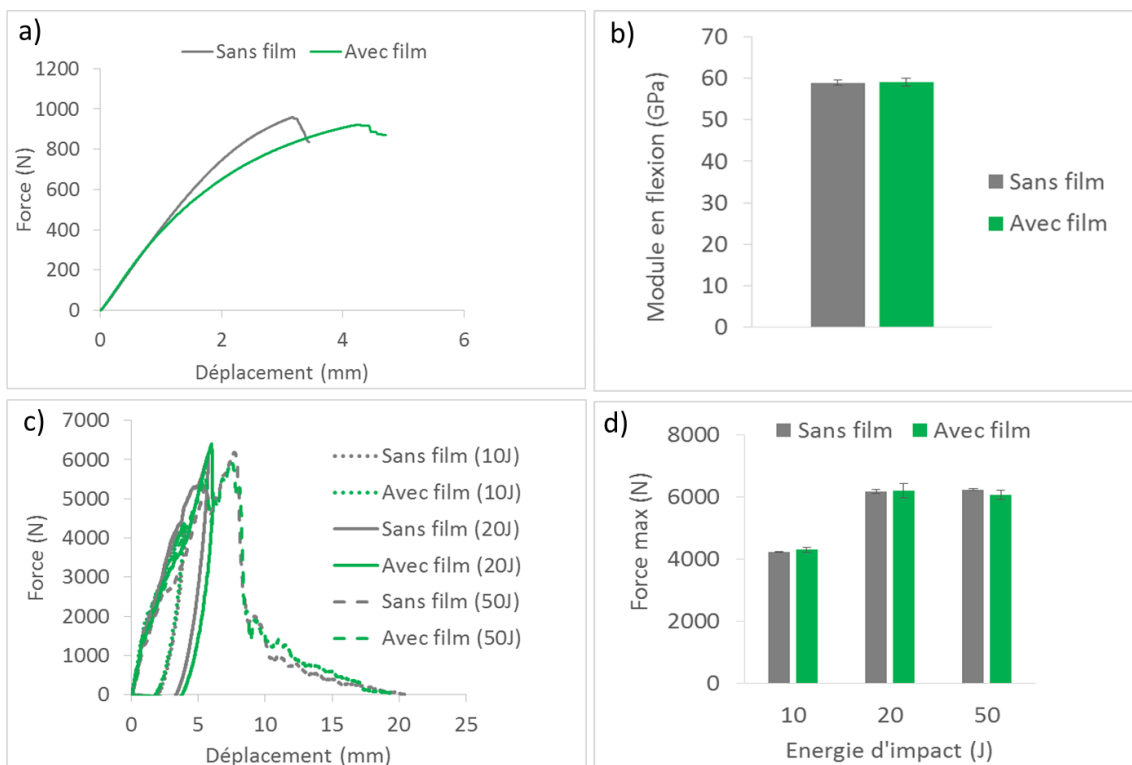


Fig. 3. Comparaison des méthodes de collage en flexion et en impact : a) courbes force-déplacement en flexion, b) modules en flexion, c) courbes force-déplacement en impact, d) forces maximales pour des impacts à 10J, 20J et 50J.

En considérant les résultats d'impact (Fig. 3.a et Fig. 3.b), on note également une très grande similitude des forces maximales d'impact et des courbes force-déplacement aux différentes énergies. Ainsi, l'ajout d'un film adhésif semble n'avoir aucun intérêt particulier pour ce qui est des propriétés en flexion et en impact de l'hybride.



Fig. 4. Faciès de rupture des éprouvettes de flexion: a) sans film, b) avec film.

3.2 Influence de la séquence d'empilement du composite

Le tableau 2 (Tab. 2) présente les stratifications des hybrides avec empilement quasi-isotrope d'une part et des hybrides avec empilement croisé d'autre part, après leur prélèvement sur les grandes plaques.

Empilement	Hybride
Quasi-isotrope	$[\text{Acier}/(0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ)_2]_s$
Croisé	$[\text{Acier}/(0^\circ/90^\circ)_4]_s$

Tab. 2. Stratifications des hybrides à empilement quasi-isotrope et croisé.

La figure 5 ci-dessous représente les résultats de flexion et d'impact obtenus en utilisant les deux types d'empilement. La figure 5.a montre que les hybrides avec empilement quasi-isotrope et croisé ont des modules en flexion similaires. Les résultats d'impact présentés sur les figures 5.b et 5.c montrent également que pour chacune des trois énergies étudiées, les forces maximales sont similaires pour les hybrides fabriqués avec les deux différents empilements de la partie composite. Ainsi, en adoptant l'une ou l'autre séquence du composite, des comportements similaires sont obtenus aussi bien en flexion qu'en impact [6]. Ceci peut s'expliquer par le fait que les couches d'acier ont une influence prépondérante sur les propriétés mécaniques de l'hybride étant donnée leur position.

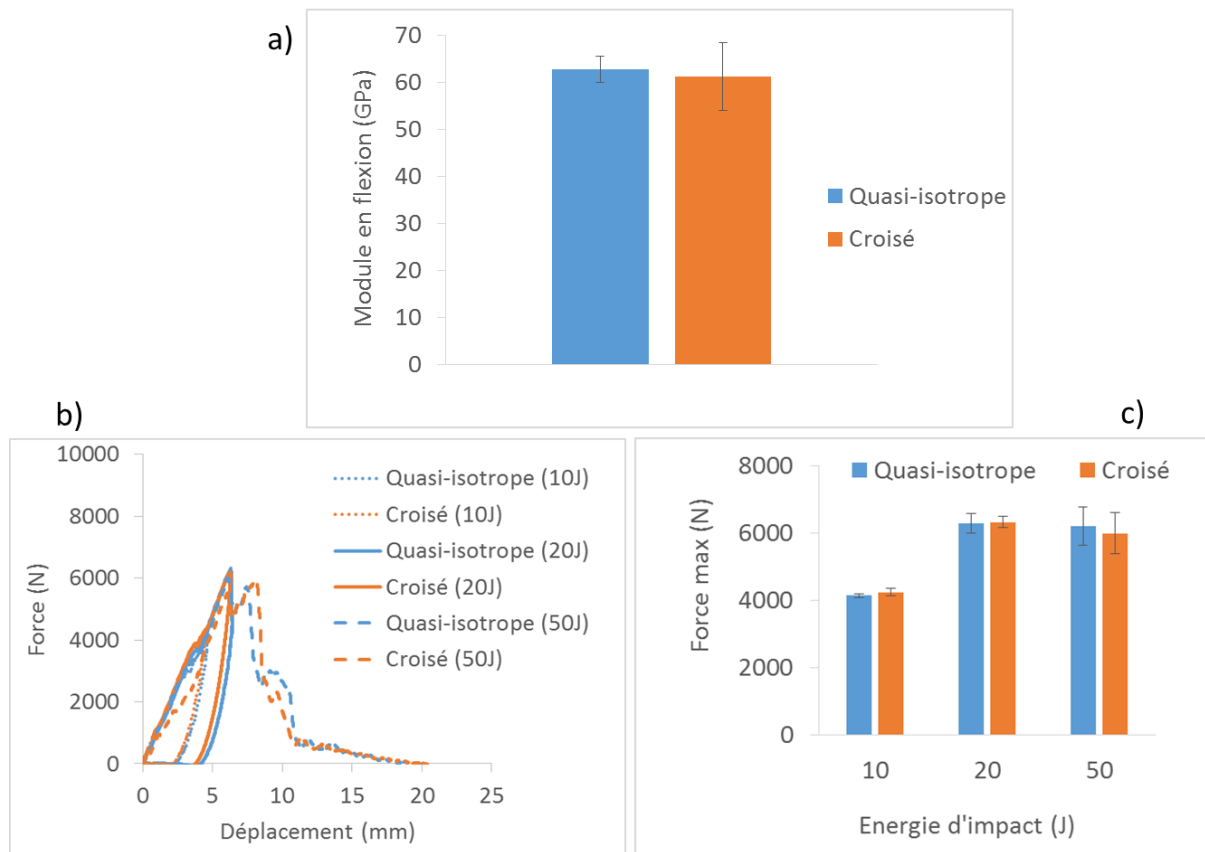


Fig. 5. Comparaison des séquences d'empilement en flexion et en impact : a) modules en flexion, b) courbes force-déplacement en impact, c) forces maximales pour des impacts à 10J, 20J et 50J.

La figure 6 ci-dessous présente les faces inférieures des éprouvettes après impact pour différentes énergies. Pour les impacts à 10 et 20 J, la chute de la masse sur l'éprouvette induit essentiellement une indentation en son centre. En revanche, l'impact à 50 J conduit à une perforation de l'hybride marquée par la déchirure de la couche inférieure d'acier. Dans l'ouverture causée par cette perforation, on peut observer une rupture importante des fibres, et une fissuration de la matrice du composite.

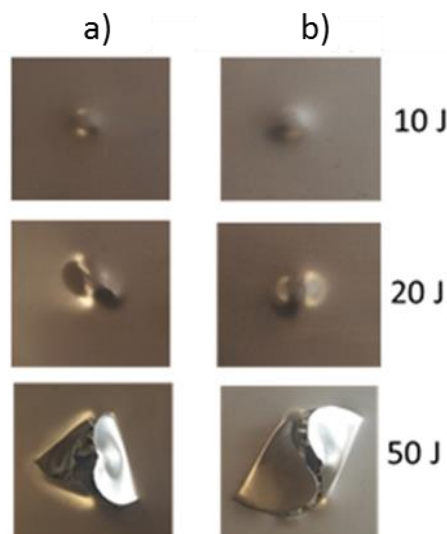


Fig. 6. Surfaces inférieures après impact à 10, 20 et 50J : a) hybride avec empilement quasi-isotrope, b) hybride avec empilement croisé.

3.3 Influence de la répartition d'acier dans l'hybride

Les stratifications des hybrides sont données dans le tableau ci-dessous.

Configuration	Hybride
2/1	[Acier/(90°/0°) ₄] _s
3/2	[Acier/(90°/0°) ₂ /(0°/90°) ₂ /Acier/(90°/0°) ₂ /50°/90° ₂ /Acier]

Tab. 3. Stratifications des hybrides à configuration 2/1 et 3/2.

La figure 7 présente les résultats de flexion et d'impact obtenus pour les configurations 2/1 et 3/2. Sur la figure 7.b, on peut noter que le module en flexion pour la configuration 2/1 est supérieur à celui de la configuration 3/1, avec une différence d'environ 38%. En effet, bien que les deux configurations ont été réalisées avec les mêmes proportions d'acier, les couches de métal les plus externes dans la configuration 3/2 sont moins épaisses et donc un peu moins rigides que celles de la configuration 2/1. L'allure des courbes force-déplacement est illustrée sur la figure 7.a. Il est possible d'observer que dans le cas de la configuration 2/1, on a une croissance rapide de la force due à la rigidité du métal, puis une rupture brutale du matériau. Dans le cas de la configuration 3/2, l'hybride subit une déformation beaucoup plus importante avant de se rompre. L'observation de l'aire sous la courbe force-déplacement (Fig. 7.a) permet de déduire que pour cette configuration, une plus grande quantité d'énergie est absorbée avant la rupture du matériau.

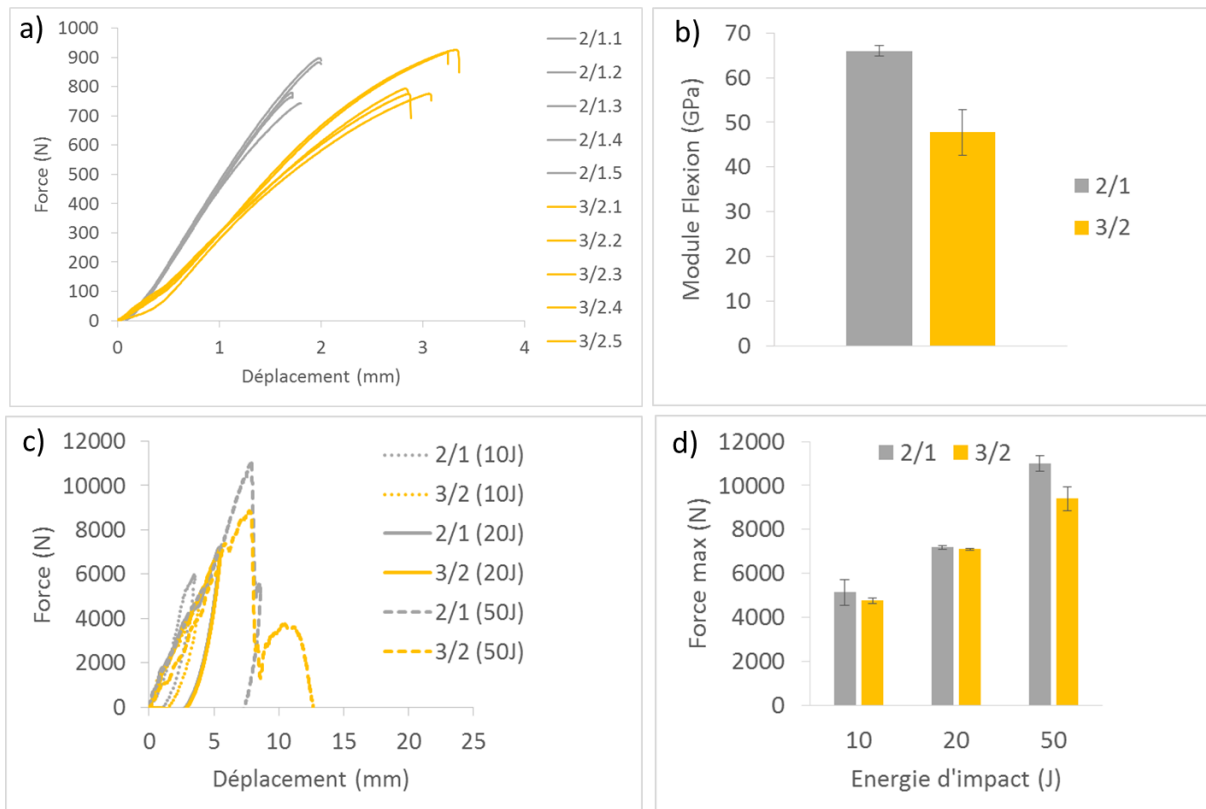


Fig. 7. Comparaison des configurations en flexion et en impact : a) courbes force-déplacement en flexion, b) modules en flexion, c) courbes force-déplacement en impact, d) forces maximales pour des impacts à 10J, 20J et 50J.

Contrairement aux deux cas précédents, on note sur la figure 7.d que la force maximale augmente avec l'énergie d'impact indépendamment de la configuration choisie. On note aussi que pour chaque énergie d'impact, la force maximale la plus élevée est obtenue avec la configuration 2/1. Par contre, l'aire sous la courbe force-déplacement est légèrement plus grande pour la configuration 3/1 (Fig.7.c). Ainsi cette dernière absorbe légèrement plus d'énergie pendant l'essai. En effet, en considérant la configuration 3/2, plus on répartit le métal dans l'épaisseur de l'hybride, plus on réduit l'épaisseur de la couche d'acier sur la face impactée, et moins la force maximale d'impact est grande. Par contre, l'épaisseur étant plus fine au niveau de la face impactée, cela induit une déformation plastique plus importante conduisant ainsi à une énergie absorbée légèrement supérieure [7-8].

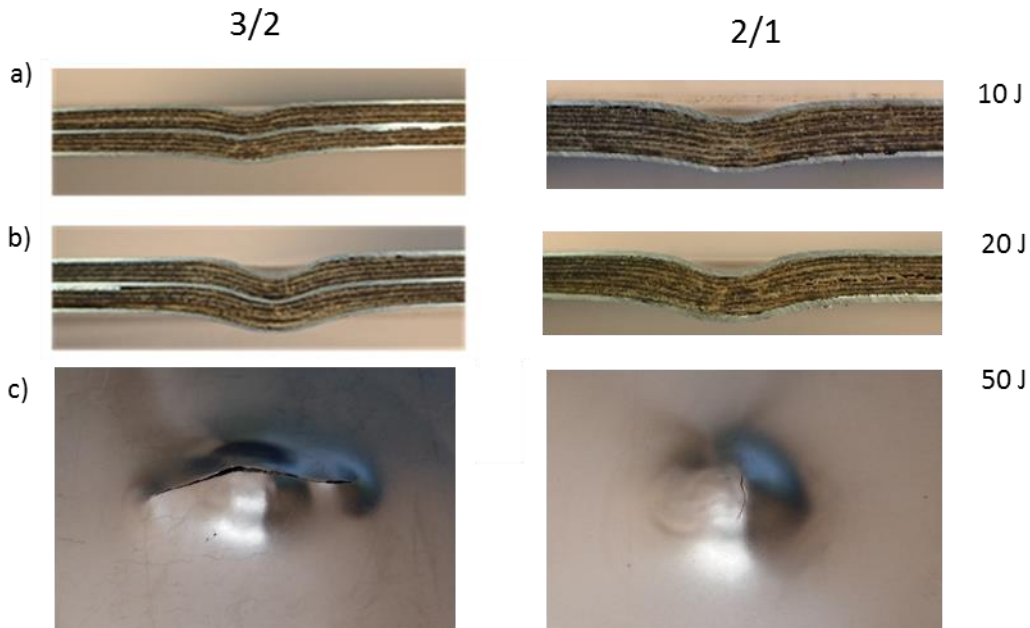


Fig. 8. Faciès de rupture après impact : a) Coupes de la zone impactée à 10J, b) Coupes de la zone impactée à 20J, c) surfaces inférieures après impact à 50J.

Sur la figure 8 ci-dessus, on peut voir que l'impact sur l'hybride induit dans les deux cas une indentation très peu prononcée à 10 et 20 J (Fig. 8.a et 8.b). En observant les coupes au microscope, on n'aperçoit aucun délaminage visible aux différents interfaces métal/composite, preuve d'une bonne adhésion entre les deux constituants. De plus, à ces énergies, les faces supérieures ne présentent aucune fissure au niveau du métal. En revanche, en analysant les surfaces inférieures dans le cas de l'impact à 50 J (Fig. 8.c), on constate qu'en plus de l'indentation laissée par l'impacteur, il apparaît sur le dôme formé une fissure principale dont la longueur est plus importante pour la configuration 3/2. Il y a cependant dans les deux cas aucune perforation du matériau.

4. Conclusion

Dans cette étude, trois paramètres de fabrication d'hybrides composite/métal ont été séparément étudiés. Il s'agit de la méthode de collage à l'interface composite/métal, de la séquence d'empilement du composite de l'hybride et enfin de la répartition des couches d'acier et de composite dans l'épaisseur de l'hybride. Il ressort que :

- L'ajout d'un film adhésif n'apporte pas un grand changement aux propriétés en flexion et en impact pour la matrice époxy utilisée.
- Le choix d'un empilement quasi-isotrope ou croisé au niveau de la partie composite de l'hybride n'influence quasiment pas le module en flexion ainsi que la force maximale d'impact.

- La configuration 2/1 permet d'obtenir un module en flexion supérieur à celui obtenu pour la configuration 3/2.
- En impact, la configuration 2/1 conduit à une force maximale plus élevée, tandis que l'énergie absorbée est légèrement plus grande avec la configuration 3/2.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ADEME et la région Bourgogne pour le financement de ces travaux de thèse.

Références

- [1] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. O. Bora, O. Çoban «A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods», *Materials and Design* Vol.32 n° 7, pp. 3671–3685, 2011.
- [2] N.G. Gonzalez-Canche, E. A. Flores-Johnson, J. G. Carrillo «Mechanical characterization of fiber metal laminate based on aramid fiber reinforced polypropylene », *Composite Structures* Vol. 172, pp. 259–266, 2017.
- [3] A. Vlot «Impact loading on fibre metal laminates », *International Journal of Impact Engineering* Vol.18 n° 3, pp. 291-307, 1996.
- [4] M. Vasumathi, V. Murali «Effect of alternate metals for use in natural fibre reinforced fibre metal laminates under bending, impact and axial loadings », *Procedia Engineering* Vol.64, pp. 562-570, 2013.
- [5] H. T. N. Kuan, W. J. Cantwell, M. A. Hazizan, C. Santulli « The fracture properties of environmental-friendly fiber metal laminates», *Journal of Reinforced Plastics and Composites* Vol. 30, n° 6, pp. 499–508, 2011.
- [6] J. G. Carrillo, J.W. Cantwell « Mechanical properties of a novel fiber–metal laminate based on a polypropylene composite », *Mechanics of Materials* Vol.41 n° 7, pp. 828-838, 2009.
- [7] A.P. Sharma, S. H. Khan, R. Kitey, V. Parameswaran « Effect of through thickness metal layer distribution on the low velocity impact response of fiber metal laminates», *Polymer Testing* Vol.65, pp. 301-312, 2018.
- [8] S. H. Khan, A.P. Sharma, R. Kitey, V. Parameswaran « Effect of metal layer placement on the damage and energy absorption mechanisms in aluminium/glass fibre laminates », *International Journal of Impact Engineering* Vol.119, pp. 14-25, 2018.