

Capacité d'absorption d'énergie d'une structure tubulaire en composite hybride

M. CHAUVIN^a, Y. LEBaupin^a

a. ESTACA'LAB, Pôle Mécanique des Structures Composites et Environnement,
ESTACA Campus Ouest, Parc Universitaire Laval Changé,
Rue Georges Charpak, 53000 Laval
michael.chauvin@estaca.fr

Résumé :

De nos jours, l'utilisation des matériaux composites semblent inévitable pour répondre aux questions d'allègement dans le monde des transports. En effet, les matériaux composites offrent des performances mécaniques élevées en alliant la légèreté. En revanche, ils doivent répondre aux mêmes attentes que les aciers. De ce fait, les structures en matériaux composites sont dimensionnées par faire face à la fatigue, aux vieillissements (hygrométrie et/ou thermique), mais aussi à des capacités d'absorption d'énergie. Afin d'augmenter l'allègement de ces structures, il est envisageable d'y associer les fibres naturelles qui possèdent une faible densité. L'objectif de cette étude est de déterminer la capacité d'absorption d'énergie d'une structure tubulaire en matériau composite avec différents renforts. Pour ce faire, la structure sera soumise à un écrasement de 10mm/min afin de déterminer l'énergie d'absorption. Cette structure est réalisée par enroulement filamentaire. Les renforts utilisés pour l'étude sont des fibres de carbone, de verre, et de lin et associés à une résine époxy. La structure est réalisée avec un angle de renfort à 54° selon l'axe du tube. Dans un premier temps, l'ensemble des tubes composés de chaque renfort a permis de montrer leurs capacités d'absorption. Ces premiers résultats ont confirmé les résultats de la littérature sur le fait que les fibres minérales (verre et carbone) restent plus performantes que les fibres naturelles. Dans la littérature, l'utilisation d'un chanfrein comme amorce pour la destruction de la structure est essentielle pour guider l'effondrement de la structure tubulaire sur elle-même. Dans cette étude, l'utilisation du chanfrein n'est pas prise en compte afin de tenir compte des contraintes industrielles (temps et coût). Ce choix montre la difficulté pour maîtriser l'écrasement. De plus, la destruction repose aussi sur des couches dans l'épaisseur plus sensible à la sollicitation. De ce fait, l'étude s'est orienté sur des structures hybrides composées de renforts de carbone et de lin. En effet, ces deux matériaux possèdent une masse volumique très petite par rapport aux fibres de verres. Au vu des résultats globaux, les structures tubulaires hybrides (lin et carbone) offrent des propriétés mécaniques, face à l'écrasement, prometteuses dans le cadre de l'allègement.

Abstract:

Today, the use of composite materials seems inevitable to answer questions of lightening in the world of transport. Indeed, composite materials offer high mechanical performance by combining lightness. On the other hand, they have to meet the same expectations as steel. As a result, the structures made

of composite materials are dimensioned to cope with fatigue, aging (hygrometry and / or thermal), but also with energy absorption capacities. In order to increase the lightening of these structures, it is possible to combine the natural fibers, which have a low density. The objective of this study is to determine the energy absorption capacity of a composite tubular structure with different reinforcements. To do this, the structure will be subjected to a crushing of 10 mm / min in order to determine the absorption energy. This structure is achieved by filament winding. The reinforcements used for the study are carbon, glass, and linen fibers and are combined with an epoxy resin. The structure is made with a reinforcement angle of 54° along the axis of the tube. Initially, all the tubes composed of each reinforcement made it possible to show their absorption capacities. These first results confirmed the results of the literature on the fact that mineral fibers (glass and carbon) remain more efficient than natural fibers. In the literature, the use of a chamfer as a primer for the destruction of the structure is essential to guide the collapse of the tubular structure on itself. In this study, the use of the chamfer is not taken into account in order to take account of industrial constraints (time and cost). This choice shows the difficulty in controlling the crushing. Moreover, the destruction also rests on layers in the thickness more sensitive to the stress. As a result, the study focused on hybrid structures composed of carbon and linen reinforcements. In fact, these two materials have a very small density relative to the glass fibers. In view of the overall results, the hybrid tubular structures (flax and carbon) offer mechanical properties, in the face of crushing, promising in the context of lightening.

Mots clefs : structure tubulaire, carbone, lin, verre, capacité d'absorption, composite

1 Introduction

Les contraintes environnementales croissantes imposent de mieux maîtriser les rejets de CO₂ à l'avenir. La réglementation européenne imposera, dès 2020, 95g de CO₂ au km et nous pouvons penser que des nouveaux accords réduiront à nouveau cette valeur dans la décennie suivante. La France souhaite anticiper ces évolutions qui correspond à des émissions de l'ordre de 50 g/km pour des véhicules de grande série [1]. Les solutions d'amélioration sont multiples : chaîne de traction, aérodynamique, résistance au roulement, et la réduction de la masse. A l'heure actuelle, deux tendances se dégagent qui sont l'amélioration de la chaîne de traction et l'allègement de la masse. Pour atteindre l'objectif de 50 g/km d'émission de CO₂, les études d'optimisation économiques montrent que l'allègement d'environ 20% est nécessaire. Quels sont les solutions envisageables ? Actuellement, les solutions existantes sont les aciers à très haute limite élastique [2] et l'aluminium. Pour les solutions à venir, les matériaux étudiés sont le magnésium et les matériaux composites. Depuis plusieurs années, l'arrivée des matériaux composites prennent une part grandissante pour répondre à cette attente. En effet, les matériaux composites ont de bonnes propriétés mécaniques vis-à-vis de leur densité, une forte résistance à la corrosion et une bonne capacité d'absorption d'énergie [3]. En ingénierie automobile, l'allègement aura un impact sur la protection des occupants. Malheureusement, la protection de ces occupants est d'ordre 1 dans la conception d'un véhicule. De ce fait, les structures en composites doivent absorber l'énergie lors d'un crash. Ce qui implique une réflexion sur la conception des absorbeurs de choc [4]. Toutes les fibres (carbone, verre, kevlar) associés à des résines thermodurcissables ou thermoplastiques sont envisageables pour des applications d'absorption d'énergie. Ces matériaux offrent des conditions d'effondrement stable par rapport à l'acier [4]. Les conditions d'effondrement et l'énergie d'absorption spécifique sont dépendant de multiples paramètres comme le liste Priem et al [5]. Ces paramètres sont la géométrie du

tube, le type de fibre et résine, l'orientation du pli, la vitesse de déformation, la température, et le déclencheur (trigger). La figure 1 montre un panel d'énergie d'absorption spécifique en fonction du matériau [6].

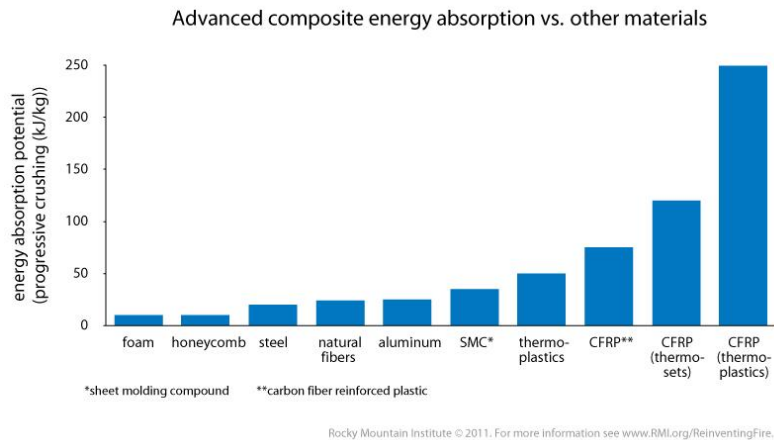


Figure 1 : Energie d'absorption spécifique des matériaux pour l'automobile.

L'énergie d'absorption spécifique (E_s) est l'énergie dissipée de la structure par rapport à la masse de cette dernière. Cette grandeur est déterminée avec l'équation suivante [7] :

$$E_s = \frac{\bar{\sigma} (S_b - S_i)}{\rho L} \quad \text{Equation 1}$$

Où

- $\bar{\sigma}$ contrainte moyenne d'écrasement ;
- S_b déplacement maximum d'écrasement ;
- S_i déplacement en début d'écrasement ;
- L longueur total du tube ;
- ρ masse volumique.

Les figures 2a et 2b montre la courbe typique de la charge en fonction du déplacement pour un écrasement progressif [7].

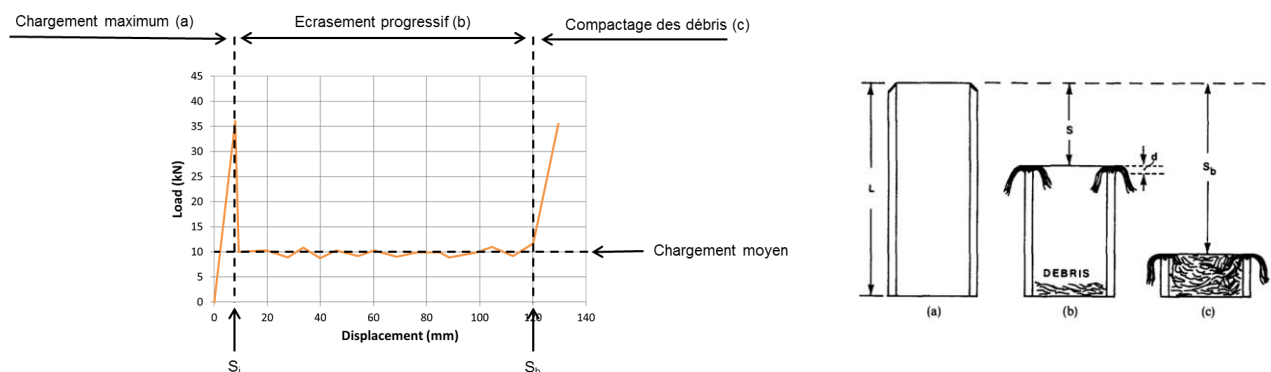


Figure 2 : Courbe typique d'écrasement (a), scénario de l'écrasement (b).

La charge augmente jusqu'à atteindre le chargement maximum (a) correspondant au déplacement en début d'écrasement (S_i). Pendant la phase d'écrasement progressif, la charge reste constant jusqu'au déplacement maximum d'écrasement (S_b). Dans la zone de compactage, la charge augmente jusqu'à

dépasser la valeur du chargement maximum. Cette valeur donne fin à l'essai de compression. La capacité d'absorption est obtenue en calculant l'aire qui se trouve sous la courbe Load/Displacement avec l'aide de l'équation 1.

La figure 3 montre les modes de dégradation de la paroi constituant la structure tubulaire [8].

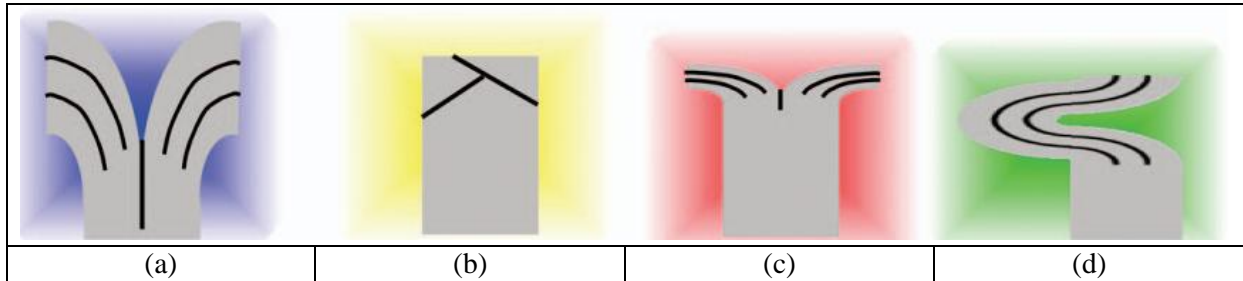


Figure 3 : Mode de dégradation de la structure tubulaire : évitement (a), fragmentation (b), pliage (c), flambement (d).

Sous l'effet du chargement, les parois vont se rompre selon quatre modes différents :

- l'évitement qui est la séparation des plis et se rempliant sur eux-mêmes,
- la fragmentation qui est la fissuration de la résine dans les plis,
- le pliage qui est écrasement des parois,
- le flambement qui est une flexion des parois.

L'objectif de cette étude est de déterminer la capacité d'absorption d'énergie d'une structure tubulaire hybride.

2 Spécimens et protocole

Cette partie est consacrée à la description des matériaux utilisés, à la présentation du moyen d'élaboration permettant de fabriquer les différents spécimens. De plus, elle décrira les spécimens étudiés ainsi que le moyen expérimental utilisé.

2.1 Matériaux

Le tableau 1 résume les propriétés mécaniques et physiques des constituant de la structure tubulaire.

	Module d'Young GPa	Masse volumique kg/m ³
Fibre de lin	71	1400
Fibre de carbone	230	1800
Fibre de verre	73	2600
Epoxy	3,5	1200

Tableau 1 : Caractéristiques des constituants de la structure tubulaire.

La structure tubulaire envisagée est constituée de fibres minérales et/ou naturelles. Ces dernières sont associées à une résine époxyde.

2.2 Elaboration

La structure tubulaire utilisée dans cette étude, est fabriquée par enroulement filamentaire par la société Plasticon Composites. Ce procédé est représenté sur la figure 4 :

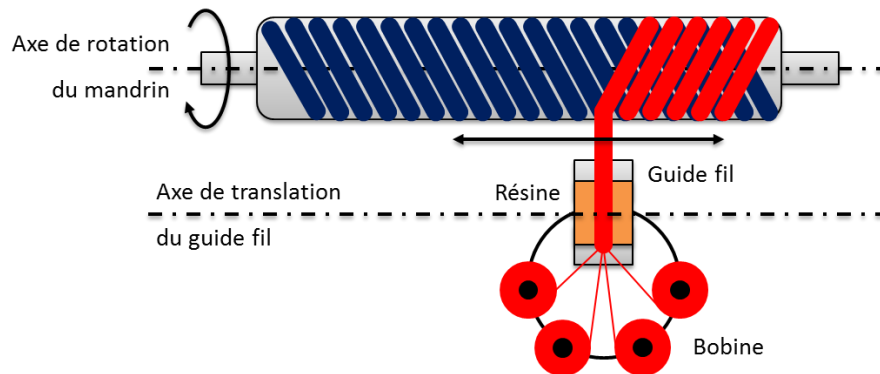


Figure 4: Procédé d'élaboration par enroulement filamentaire.

D'abord, la mèche part des bobines pour constituer une nappe. Cette nappe passe dans un bain de résine. Puis, elle est tendue et essorée pour se débarrasser du surplus de résine. Ces deux opérations se déroulent dans le guide fil. Cette phase n'est pas faite, dans le cas, d'un fil en fibre de lin. Ensuite, la nappe est enroulée sur un mandrin qui est tournant. Le guide fil fait des aller/retour le long du mandrin. A chaque passage, le guide fil dépose une couche qui constituera la structure tubulaire. Après enroulement, le mandrin passe 90 minutes au four en rotation à 150°C.

2.3 Structure

Avec le procédé d'enroulement filamentaire, les structures sont constituées de six couches de :

- carbone,
- verre,
- lin,
- spécimen 1 : Lin / Carbone,
- spécimen 2 : Lin / Carbone.

Pour ces deux dernières structures, leurs compositions sont décrites sur la figure 5.



Figure 5 : Structure interne des spécimens 1 et 2.

Le spécimen 1 (figure 5a) est constitué de deux couches de carbone en peaux et quatre couches de lin au cœur (soit 2/3 de lin). Pour le spécimen 2 (figure 5b), les couches sont réparties comme suit : quatre couches de carbone sur les peaux et deux couches de lin en cœur (soit 1/3 de lin).

La figure 6 représente un synoptique de la structure tubulaire sur laquelle l'étude a été réalisée.

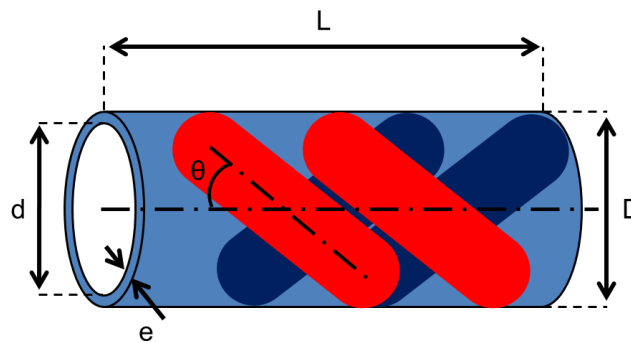


Figure 6 : Géométrie de la structure tubulaire.

Le tableau 2 résume les valeurs moyennes des échantillons pour chaque association.

			Carbone	Verre	Lin	Spécimen 1	Spécimen 2
Diamètre extérieur	D	mm	51,3	50,9	51,3	51,9	51,7
Diamètre intérieur	d	mm	44	44	44	44,1	44,1
Épaisseur	e	mm	3,7	3,4	3,6	3,9	3,8
Masse	m	g	116,3	150,3	86,1	112,9	114,7
Longueur	L	mm	151,8	151,2	152,9	150	150,1
Angle d'enroulement	θ	°	54	54	54	54	54

Tableau 2 : Grandeurs dimensionnelles de différentes structures tubulaires.

Les structures tubulaires ne possèdent pas de trigger permettant l'amorçage de la ruine de ces dernières. En effet, l'idée est d'utiliser des couches moins résistantes pour amorcer et guider la destruction de la structure [7].

2.5 Dispositif expérimental

La figure 7 montre le dispositif expérimental pour cette étude :

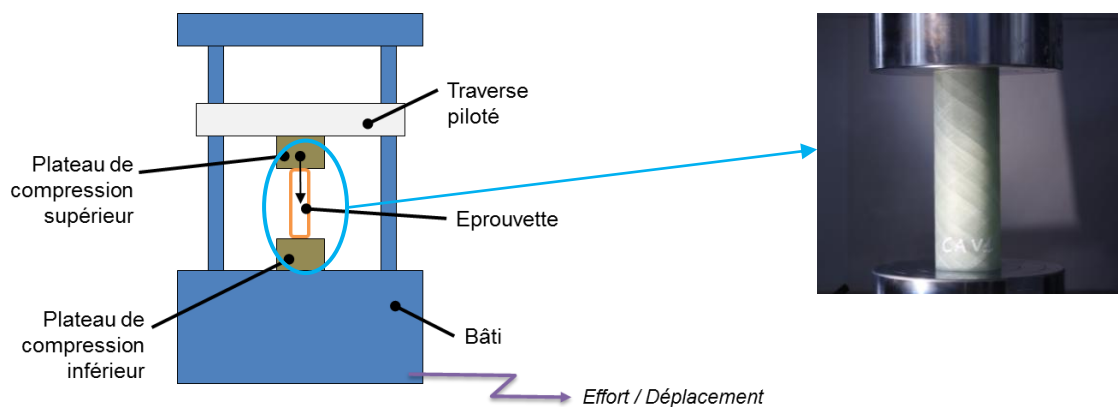


Figure 7 : Machine de traction Instron 5884 150kN.

Le dispositif expérimental est composé d'une machine de traction de marque Instron avec une capacité maximum de 150 kN. La machine de traction est de deux plateaux de compression. Les données

mesurées sont la charge de compression et le déplacement de compression en fonction du temps. Le déplacement de la traverse est fixé à 10 mm/min selon la norme ASTM 7336M-12.

3 Résultats et analyses

Les données expérimentales obtenues permettent de tracer les courbes de la charge de compression (Load) en fonction du déplacement de compression (Displacement). Pour rappel, l'énergie d'absorption spécifique réelle est déterminée à partir de l'aire sous la courbe de chaque spécimen entre les deux bornes S_i et S_b .

La figure 8 montre la synthèse des courbes obtenues par les spécimens testés.

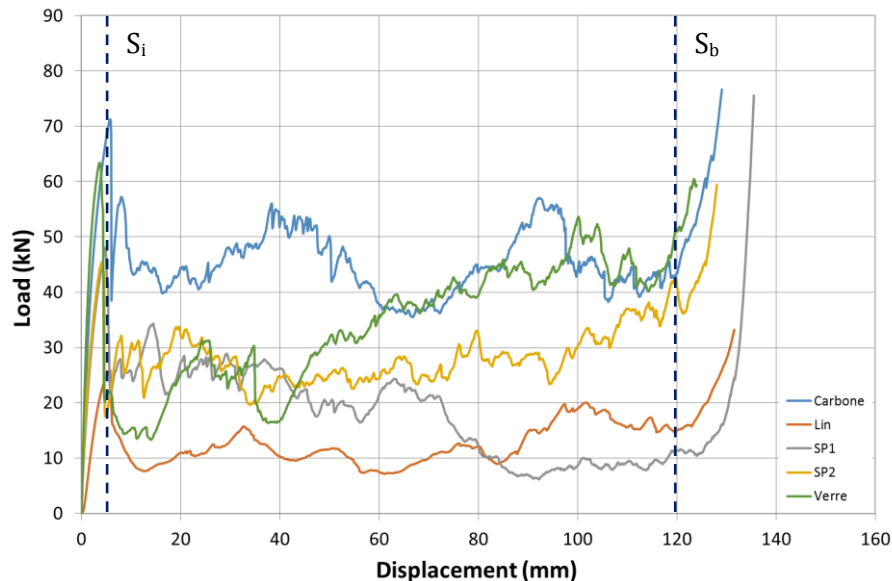


Figure 8 : Charge en compression en fonction du déplacement.

La courbe commence par une augmentation rapide de la charge de compression jusqu'à atteindre le chargement maximum. Ce chargement correspond à un pic de flambement de la structure. Ce pic varie entre 25 kN et 70 kN (du lin au carbone) pour un déplacement d'environ 5 mm. La raideur dans cette zone varie de 8500 N/mm à 30000 N/mm respectivement du spécimen en lin au spécimen en verre. Après le pic de flambement, les courbes évoluent sur un palier (zone d'écrasement progressif). Ce palier évolue en fonction de la destruction interne de la paroi. Et, il permet de calculer l'énergie spécifique d'absorption réelle. Enfin, la courbe de charge de compression augmente. Cela correspond au compactage de débris. Pour l'ensemble des spécimens, le compactage a lieu autour de 120 mm, comme le montre la figure 8.

Le tableau 3 résume les énergies spécifiques d'absorption réelles pour chaque spécimen. Elles sont exprimées en J/g. Cette énergie permet de comparer les performances de chaque structure. Elle est moyennée sur cinq essais.

		Carbone	Verre	Lin	SP1	SP2
Energie spécifique d'absorption réelle (Es)	(J/g)	35,8	20	15,9	17,6	19,8

Tableau 3 : Energie spécifique d'absorption réelle pour chaque spécimen.

Ce tableau montre que le tube en Carbone reste le plus performant. En effet, son palier reste constant et élevé. L'énergie obtenue est de 36 J/g. Pour le tube en Verre, l'énergie calculée est de 20 J/g. Son palier évolue de manière très chaotique avec de grande variation de charge. Ensuite, le tube en lin donne une capacité d'énergie de 15,9 J/g. Son palier reste le plus constant mais le niveau de charge de

compression reste bas. Pour les spécimens 1 et 2, l'énergie spécifique d'absorption réelle est respectivement 17,6 J/g et 19,8 J/g. Les performances du spécimen 1 sont dues à plus grande densité de couche de carbone par rapport à celles en lin. En effet, le palier chute à mi-course donnant ainsi une charge de compression moyenne plus faible que le spécimen 2.

La figure 9 montre l'évolution de la structure tubulaire de chaque échantillon pendant l'essai.

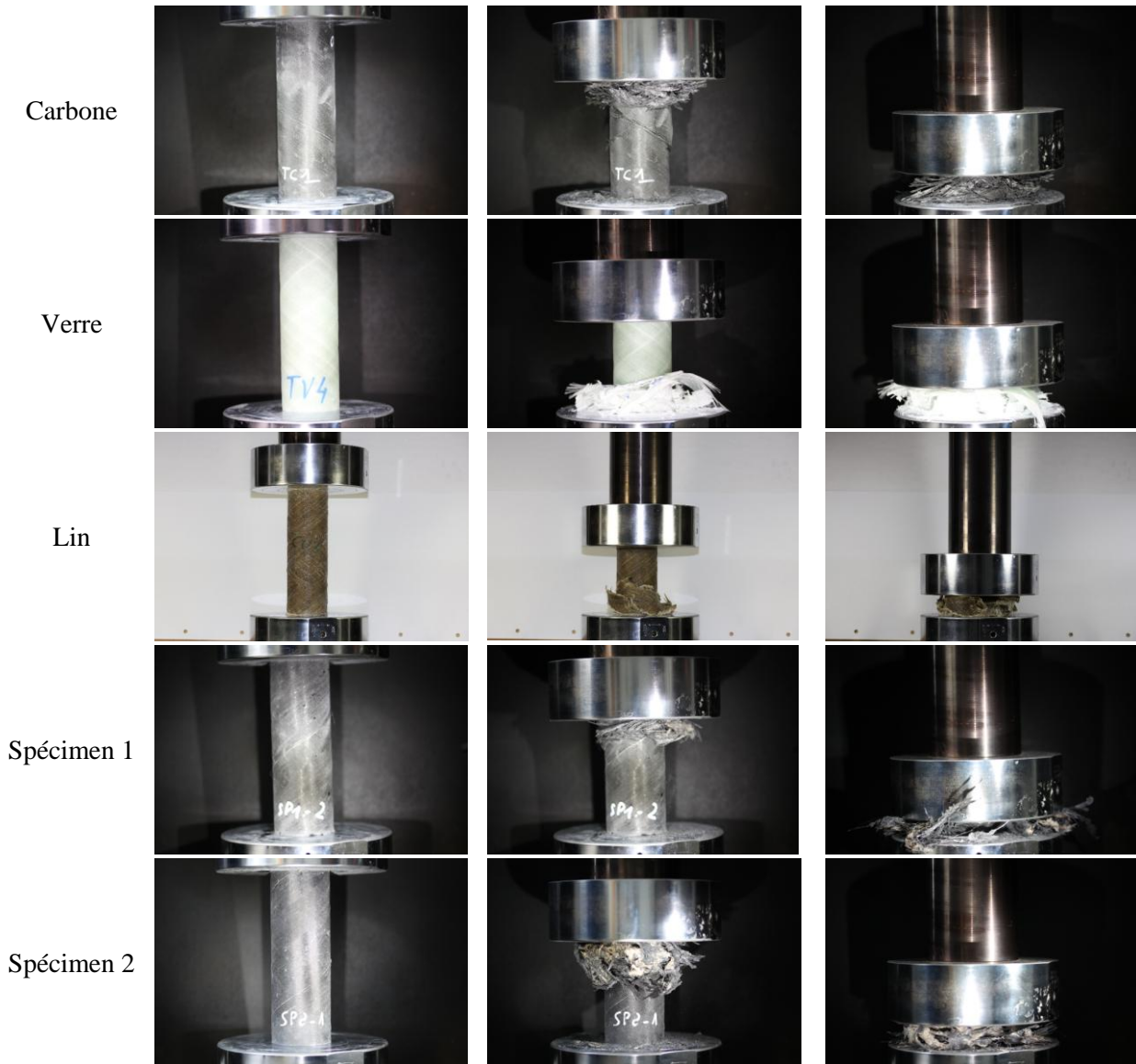


Figure 9 : Scénario de ruine des structures tubulaires.

Dans tous les cas, la structure tubulaire s'effondre sur elle-même. Mais, trois modes de ruine apparaissent pendant les essais. D'abord, les tubes carbone et verre se détruisent avec un éclatement des nappes constituant les couches. Pour les spécimens 1 et 2, les parois des tubes s'effondrent sur eux-mêmes comme pour les matériaux composites en thermoplastique [5]. Ce phénomène se produit grâce aux couches de lin qui permettent de guider l'effondrement de la paroi. Enfin, la structure tubulaire en Lin se disloque par morceaux comme le montre la figure 9. Ce qui génère moins de débris.

6 Conclusion

L'allègement des structures est un enjeu important pour le monde des transports qui font face à une réglementation environnementale sévère. Cette réglementation a un coût pour chaque kilogramme gagné, limitant la généralisation des matériaux composites base de fibre de carbone. De ce fait, l'hybridation permet de réduire le coût en conservant des performances mécaniques proches. Mais, l'emploi de ces matériaux passent par la maîtrise des procédés et la compréhension des modes de défaillances. De ce fait, cette étude a été proposée dans ce sens. Et, elle se focalise sur la problématique d'absorption d'énergie. En effet, la sécurité passive est une des causes de la prise de masse du châssis.

L'étude s'est concentrée sur des structures tubulaires en composite de type carbone, verre, et lin associé à une résine époxyde. La capacité d'absorption d'énergie d'une telle structure est élevée pour un matériau carbone (environ 36 J/g). Mais, elle reste proche pour des structures en verre et hybride (environ 20 J/g). La performance en absorption d'énergie est liée principalement à la zone d'écrasement progressif, en maintenant un niveau de charge de compression proche du chargement maximum. L'hybridation de la structure a permis de contrôler la ruine par l'effondrement de cette dernière sur elle-même telle qu'elle est observée dans le cas des résines thermoplastiques. La difficulté de cette étude réside dans la répétabilité des essais. Les résultats obtenus ont fait l'objet de nombreux essais pour avoir une analyse objective. En effet, l'utilisation de ce type de matériaux apporte son lot de variabilité, rendant difficile la modélisation de ces structures. Ceci fera l'objet d'une prochaine étude. Mais, les résultats obtenus ont permis d'estimer la capacité d'énergie de la structure considérée et de la vérifier via des essais sur un tour de chute.

Remerciement

L'étude sur les structures tubulaires n'aurait pas eu lieu sans la collaboration de Plasticon Composites basé à La Roche-sur-Yon. Les auteurs s'associent pour remercier la société Plasticon Composites.

Références

- [1] PFA Filière Automobile & Mobilités, L'allègement pour répondre aux objectifs CO₂ 2020 : Matériaux et allègement, PTF_21_01, 2014
- [2] M. Chauvin, B. Lascoup, Contribution à l'allègement dans l'automobile : application à la liaison au sol, Revue de Métallurgie, Vol. 108 N° 7-8, p. 427-437, 2011
- [3] L. Yan, N. Chouw, Crashworthiness characteristics of flax fibre reinforced epoxy tubes for energy absorption application, Materials & Design (2013), 629-640
- [4] P. Thornon, J. Harwood, P. Beardmore, Fiber-reinforced plastic composites for energy absorption purposes, Composites Science and Technology (1985), 275-298
- [5] C. Priem, R. Othman, P. Rozycki, D. Guillon, Experimental investigation of the crash energy absorption of 2.5D-braided thermoplastic composite tubes, Composite Structures (2014), 814-826
- [6] G. C. Jacob, J. F. Fellers, S. Simunovic, Energy Absorption in Polymer Composites for Automotive Crashworthiness, Journal of Composite Materials (2002), 813-850
- [7] D. Hull, A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes, Composites Science and Technology (1991), 377-421
- [8] G. L. Farley, R. M. Jones, Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes, Journal of Composite Materials (1992), 37-50