

Caractérisation de structures composites thermoplastiques à renforts en fibres de carbone, verre, et biosourcés mises en forme par pultrusion

Characterization of thermoplastic composite structures with carbon, glass and biosourced fibers reinforcements manufactured by pultrusion

Léo Sudriès¹, Jean-Emmanuel Chambe¹, Ilian Diboune¹, Joël Serra¹, Wiyao-Leleng Azoti¹ et Bruno Castanié¹

1 : Université de Toulouse, Institut Clément Ader, UMR CNRS 5312, INSA/UPS/ISAE-SUPAERO/IMT-Mines Albi, 3 rue Caroline Aigle, F-31400 Toulouse, France.

e-mails : leo.sudries@insa-toulouse.fr, jean-emmanuel.chambe@insa-toulouse.fr, wiyao-leleng.azoti@insa-toulouse.fr, et bruno.castanie@insa-toulouse.fr*

Résumé

Les solutions adaptées aux infrastructures ferroviaires légères réalisées en matériaux composites sont étudiées dans une optique de réduction des coûts environnementaux dans le secteur des transports. La conception de rails composite exige une réflexion sur le dimensionnement, notamment sur la tenue mécanique et structurelle. A cet effet, une étude expérimentale est réalisée pour déterminer les propriétés orthotropes de matériaux composites pultrudés à matrices thermoplastiques (ex. Elium[®]) et renforts en fibres de verre / ou carbone / ou bio-sourcés (basalte et lin). Des essais de caractérisation en traction et en compression sont effectués dans les directions longitudinale, transversale et hors-axe du composite selon les normes ISO 527-4, ASTM 3410 et NF EN 2563. Un total de 100 échantillons a été testé. Les essais montrent que les propriétés mécaniques des matrices thermoplastiques sont sensiblement équivalentes. De meilleures propriétés sont obtenues avec des fibres de carbone comparées aux fibres de verre ou végétales. Toutefois, les fibres de verre sembleraient être privilégiées en raison de leur coût plus faible et de leur fin de vie plus favorable par rapport aux fibres de carbone. De même, les fibres bio-sourcées, aux propriétés inférieures de l'ordre de 25%, présentent cependant un cycle de vie intéressant et valorisable.

Abstract

Solutions adapted for light railway infrastructures made with composite materials are studied with reducing environmental costs in mind in the transport sector. The design of composite rails requires consideration of dimensioning, in particular mechanical and structural strength. To this end, an experimental study is carried out to determine the orthotropic properties of pultruded composite materials with thermoplastic (ex. Elium[®]) matrix and glass / or carbon / or bio-sourced (basalt and flax) reinforcement fibers. Tensile and compressive characterization tests are carried out in the longitudinal, transverse and off-axis directions of the composite according to ISO 527-4, ASTM 3410 and NF EN 2563 standards. A total of 100 samples were tested. The tests show that the mechanical properties of the thermoplastic matrices are substantially equivalent. Better properties are obtained with carbon fibers compared to glass or vegetable fibers. However, glass fibers would seem to be preferred due to their lower cost and more favorable end of life compared to carbon fibers. Similarly, bio-sourced fibers, with inferior properties of around 25%, still have an interesting and rewardable life cycle.

Mots Clés : Thermoplastique – Basalte – Lin – Pultrusion

Keywords : Thermoplastic – Basalt – Flax – Pultrusion

1 Introduction

Dans une optique de réduction des coûts budgétaires et environnementaux dans le secteur des transports ferroviaires, tout en renforçant les infrastructures actuelles et en déployant une offre étendue de connectivité inter-cités, le remplacement des rails métalliques usuels par des rails en matériaux composites, connectés et innovants, est à l'étude.

La question des infrastructures des lignes de dessertes fines du territoire (LDFT), voies permettant de relier les localités de tailles modérées et isolées, est particulièrement regardée. Les solutions adaptées pour le transport ferroviaire circulant sur ces voies réalisées en matériaux composites sont étudiées.

La réalisation des rails composites pose cependant de nombreuses questions de mise en œuvre, de la conception à l'implémentation, en passant par la tenue mécanique et structurelle. La structure finale de rails composites pour les voies devra être réalisée par procédé de pultrusion. Le procédé permet la fabrication de pièces en continu, (barres, rails, glissières, pales, mats, ...) au cours de laquelle la matière est guidée à travers une filière de géométrie prédéfinie, lui conférant sa forme finale désirée.

Le procédé est ainsi adapté à la fabrication en continu de profilés composites à matrice thermoplastique tels que les rails d'infrastructures ferroviaires. Lors de la fabrication par pultrusion de pièces composites, la matière tirée à travers la filière chauffante étape durant laquelle la résine polymérise, conférant ainsi au profilé sa forme et ses propriétés finales [1]. Cependant, ce procédé de mise en forme nécessite des connaissances matériaux en termes de propriétés physico-chimiques (amont, production) et mécaniques (aval, utilisation) [1-5].

Dans cette optique, une étude a été menée sur la caractérisation de matériaux composites à renfort fibres industrielles et matrice thermoplastique. Également, dans un souci de recyclabilité des matériaux, des composites à base de composants bio-sourcés (ex. basalte ou lin) associés aux résines thermoplastiques recyclables (ex. Arkema Elium®) sont étudiés. Des essais de caractérisation en traction et en compression dans les directions longitudinale et transversale du composite, ainsi qu'une caractérisation en orientation hors-axe de la fibre, ont ainsi été réalisés sur coupons issus d'une fabrication par pultrusion.

2 Campagne de caractérisation

2.1 Campagne d'essais :

L'objectif des essais de caractérisation est d'identifier les propriétés orthotropes (en 3D) des coupons pultrudés unidirectionnels, en traction et en compression, à savoir : les raideurs (E_l^t , E_t^t , E_l^c , E_t^c , G_{lt} , G_{lz} , G_{tz}), les contraintes à rupture (σ_l^t , σ_t^t , σ_l^c , σ_t^c , τ_{lt} , τ_{lz} , τ_{tz}) et les coefficients de Poisson (ν_{lt} , ν_{lz} , ν_{tz}).

Les essais, ainsi que leur nombre, les caractéristiques mécaniques recherchées, et la norme sur laquelle se base l'essai, sont répertoriés et synthétisés dans le tableau 1.

Type d'essai	Orientation des fibres	Caractéristiques recherchées	Norme pour l'essai	Dimensions [mm]	Quantité d'échantillons
Traction	0°	σ_l^t , E_l^t , ν_{lt}	ISO 527-4	250 x 25	5
Traction	90°	σ_t^t , E_t^t , ν_{tz}	ISO 527-4	100 x 25	5
Traction	10°	G_{lt} , τ_{lt}	ISO 527-4	250 x 25	5
Compression	0°	σ_l^c , E_l^c	ASTM 3410	110 x 10	5
Compression	90°	σ_t^c , E_t^c	ASTM 3410	100 x 25	5
TOTAL échantillons/types d'essais					25
TOTAL échantillons/types d'essais/matériaux					100

Tableau 1. Présentation de la campagne d'essais selon le type, la norme et la configuration des échantillons.

En traction, 3 orientations sont étudiées : 0° (sens fibre), 90° (sens matrice) et 10° (cisaillement plan). En compression, seuls 2 orientations, à savoir 0° (sens fibre) et 90° (sens matrice) sont étudiées.

Ainsi, 5 types d'essais caractéristiques différents ont été réalisés sur 4 configurations de matériaux, pour un total de 5 éprouvettes par configuration, menant le nombre total d'éprouvettes testées à 100.

2.2 Matériaux :

Les différentes configurations de composites testés sont recensées dans le tableau 2, avec leurs références résines et fibres.

Désignation de la Configuration	Resine	Référence Résine	Fibre	Référence Fibre
M1	Elium®	C595 E	Carbone	SIGRAFIL® C T50-4.0/240-V100
M2	Elium®	C595 E	Verre	PULSTRAND® 4100
M3	Elium®	C595 E	Basalte	BASALTEX® 2400tex
M4	Elium®	C595 E	Lin	LINCORE® 2400tex

Tableau 2. Présentation des matériaux utilisés avec leur références pour les différents échantillons. (résine Elium® : Arkema).

Au total 4 configurations composites UD sont testées. Elles sont référencées de M1 à M4 pour l'étude et sont reportées dans le tableau 2. La principale distinction se fait entre la résine thermoplastique utilisée (Elium® de Arkema) combinée à des fibres de carbone (M1) et de verre (M2), ainsi que de basalte (M3) et de lin (M4). A titre de comparaison, et faisant office de référence de par la littérature abondante, une configuration annexe a été formulée et testée avec une base de matrice thermodurcissable Epoxy pour des fibres de basalte.

2.3 Moyens d'essais :

- Essais de traction

Les essais en traction permettent de déterminer la limite à rupture en traction, la raideur en traction ainsi que la limite à rupture et la raideur en cisaillement à l'aide d'un essai hors-axe.

Pour cette campagne d'essais, les essais sont réalisés selon la norme NF EN ISO 527-4 [6].

Les essais de traction ont été réalisés au moyen d'une machine INSTRON 5900R de cellule de charge de 100 kN pour le matériau 1 (orientation à 0°). Les essais de traction pour les matériaux 2 à 4 (orientation à 0°) ainsi que les essais de traction à 90° pour tous les matériaux (1 à 4) ont été réalisés au moyen d'une machine INSTRON 8862 de cellule de charge de 100 kN. La vitesse d'essai a été fixée à 1 mm.min⁻¹.

- Essais de compression

Les essais en compression permettent de déterminer la limite à rupture en compression, et la raideur en compression.

Pour cette campagne, les essais en compression sont basés sur la norme ASTM-3410 [7].

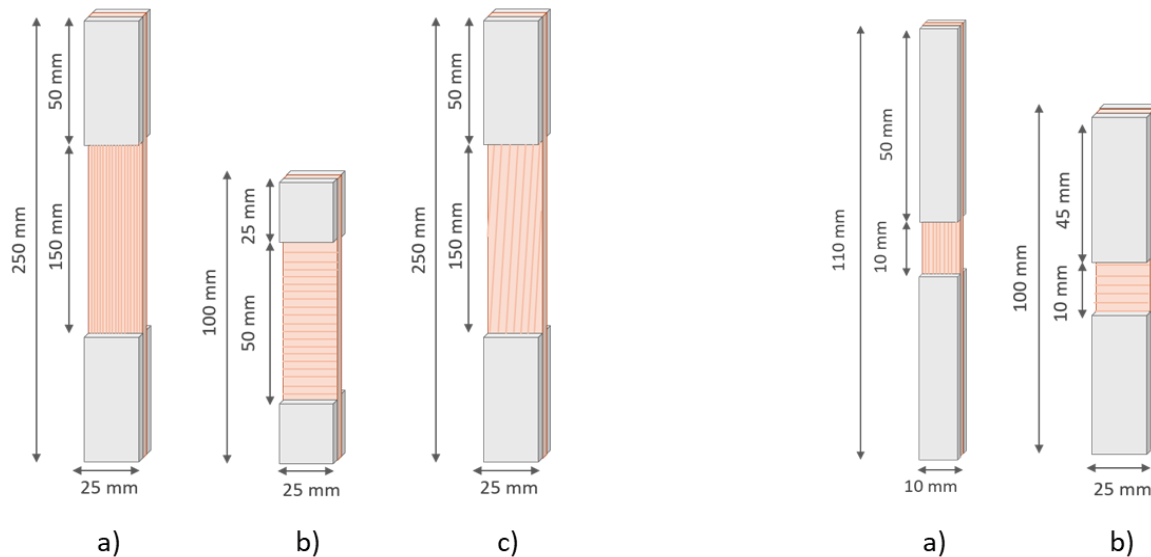
Les essais de compression pour tous les matériaux ont été réalisés au moyen d'une machine INSTRON 8862 de cellule de charge de 100 kN. Les dimensions des éprouvettes pour les essais de compression à 90° ont été adaptées par rapport à la norme, de quelques millimètres, de manière à correspondre au diamètre des profils pultrudés. La vitesse d'essai a été fixée à 1 mm.min⁻¹.

- Corrélation d'images

Pour les deux configurations, un suivi par stéréo-corrélation d'images (DIC) a également été effectué, afin de suivre le champ de déplacements et vérifier les déformations subies par l'éprouvette au cours de l'essai.

2.4 Eprouvettes :

Les dimensions des échantillons et des talons sont présentées sur la figure 1.



A) Traction

- Epaisseur stratifiés : 2 à 3 mm
- Epaisseur talons : 1,5 mm

B) Compression

- Epaisseur stratifiés : 2 à 3 mm
- Epaisseur talons : 1,5 mm

Figure 1 : Dimensions des échantillons conçus pour les essais de traction A) et de compression B) :
 A : a) orientation à 0°, b) orientation à 90°, c) orientation à 10°,
 B : a) orientation à 0°, b) orientation à 90°, avec talons chacun.

Pour chaque matériau (1 à 4), cinq échantillons ont été réalisés par orientation, soit un total de quinze éprouvettes soumises à un essai de traction, et dix éprouvettes soumises à un essai de compression.

Afin de déterminer les niveaux de contraintes admissibles en cisaillement dans le plan des matériaux, une orientation à 10° a été choisie. Cette configuration est courante dans la littérature et il est établi qu'elle peut faire office de référence dans la caractérisation des contraintes intra laminaire [8]. Elle est de plus compatible avec les pultrudés fournis. Un angle de 10° est alors privilégié en substitution à l'angle à 45° car cette configuration permet d'obtenir de bonnes valeurs de cisaillement à la rupture en lien avec la contrainte de cisaillement imposée [9]. En revanche, cette configuration peut induire des erreurs dans les mesures des propriétés en raison des effets de bords. En effet, si l'échantillon est totalement contraint à ses extrémités par des mors rigides, il apparaît une déformation non homogène dans le matériau testé [9]. Afin de prévenir cela, il est recommandé d'utiliser des mors avec un degré de liberté en rotation [10].

3 Résultats et conclusions

Les résultats issus de la campagne d'essais de caractérisation sont présentés et regroupés dans le tableau 3. Un histogramme, montré en figure 2, détaille les résultats expérimentaux obtenus pour les essais en traction (T) et en compression (C) dans le sens transverse (orientation des fibres à 90°) pour les 4 matériaux M1-4, reportant la contrainte à rupture [MPa] à gauche et le module [MPa] à droite.

		M1	M2	M3	M4
		Elium®/Carbone	Elium®/Verre	Elium®/Basalte	Elium®/Lin
Traction longitudinale	E_l^t (MPa)	154 000	57 000	56 200	25 000
	σ_l^t (MPa)	1 060	1 050	1 085	350
	ν_{lt}	0,39	0,27	0,27	0,45
Compression longitudinale	E_l^c (MPa)	142 000	54 450	57 500	17 830
	σ_l^c (MPa)	795	765	670	85
Traction transverse	E_t^t (MPa)	7 800	8 500	12 000	2 240
	σ_t^t (MPa)	26	9	15	6
	ν_{tz}	0,38	0,39	0,42	0,46
Compression transverse	E_t^c (MPa)	9 700	15 000	17 750	2 795
	σ_t^c (MPa)	115	110	98	34
Traction hors-axe	τ_{lt} (MPa)	42	25	28	15
	G_{lt} (MPa)	5 500	6 200	6 430	2 800
Cisaillement longitudinal	τ_{lz} (MPa)	42	25	28	15
	G_{lz} (MPa)	5 500	6 200	6 430	2 800
Cisaillement transverse	τ_{tz} (MPa)	21	12	14	7
	G_{tz} (MPa)	2 830	3 060	4 225	770

Tableau 3. Tableau de synthèse des résultats d'essais de la campagne de caractérisation, matériaux 1 à 4.

En complément des données issues des essais, des observations micro ont été faites par échantillons. Une forte porosité a été observée, elle a été attribuée au procédé de fabrication par pultrusion.

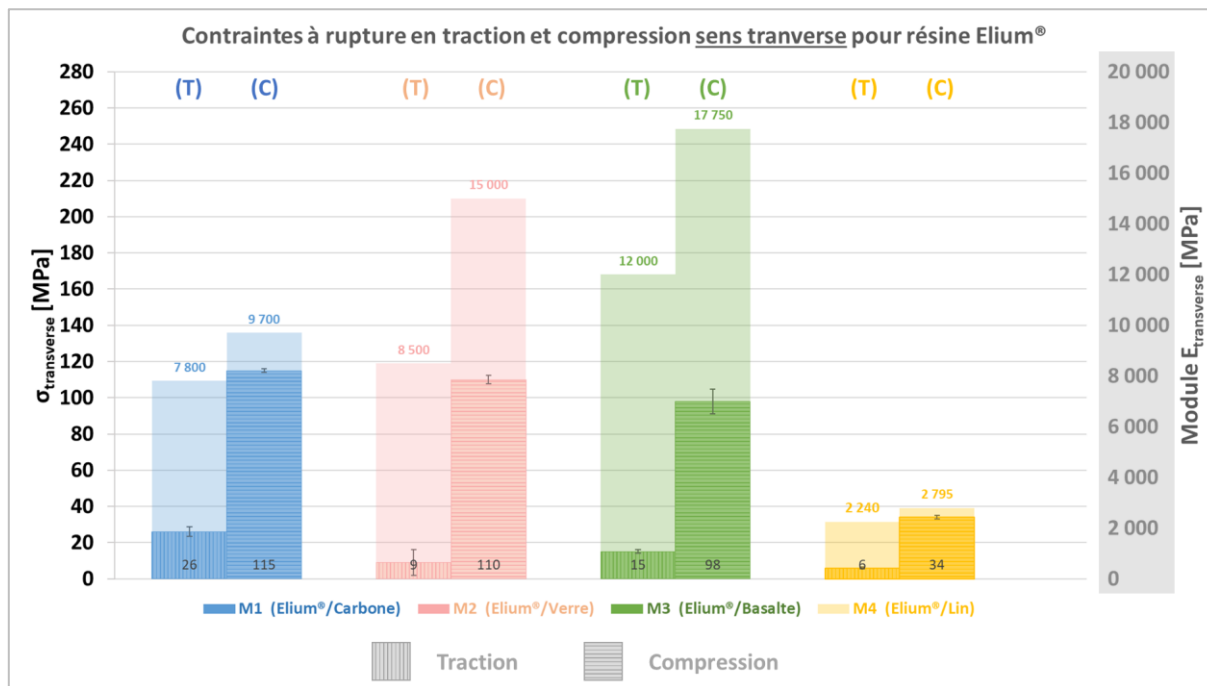


Figure 2 : Synthèse des résultats d'essais en traction (T) et en compression (C) dans le sens transverse (90°) des échantillons à base de résine Elium® présentant la contrainte à rupture (hachures), et le module (plein).

Les propriétés des résines thermoplastiques étant sensiblement identiques, le choix matériau pour la réalisation d'un rail composite a été guidé principalement par le renfort, et donc le type de fibres.

En parallèle des essais, de premières simulations numériques (non présentés ici) prédisent un chargement relativement faible dans la direction des fibres, de l'ordre de 1 à 3% de la contrainte admissible. Ces analyses numériques initiales montrent qu'une structure composite en fibre de verre est apte à reprendre les charges imposées.

Ainsi, en conclusion de l'étude de dimensionnement, outre un coût plus élevé pour le carbone, à propriétés mécaniques quasiment équivalentes expérimentalement et numériquement validé pour la tenue des efforts, le choix pour le prototypage d'un rail se porterait sur une réalisation par pultrusion avec un matériau Elium[®]/Verre.

Remerciements

Les remerciements sont adressés à l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) pour le financement de cette étude.

Références

- [1] M. Saha, R. Prabhakaran, W. A. Waters, « Compressive Properties of Pultruded Composites », *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 36, pp. 469–474, 2000, ISSN 1573-8922, doi: 10.1023/A:1006706616386.
- [2] S. R. Vankar, A. N. Kaore, C. S. Yerramalli, « Methodology for testing the compressive strength of pultruded composites », *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 42 n°11–12, pp. 544-557, 2023, ISSN 1530-7964, doi: 10.1177/07316844221133293.
- [3] C. Colombo, M. Guagliano, L. Vergani, « High-cycle fatigue strength of a pultruded composite material », *Fracture and Structural Integrity*, Vol. 3 n°7, pp. 65–72, 2013, ISSN 1971-8993, doi: 10.3221/IGF-ESIS.07.05.
- [4] S. Zhang, C. Caprani, A. Heidarpour, « Influence of fibre orientation on pultruded GFRP material properties -> », *Composite Structures*, Vol. 204, pp. 368–377, 2018, ISSN 0263-8223, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.07.104.
- [5] S. Zhang, C. Caprani, « Mechanical properties of pultruded GFRP at intermediate strain rates », *Composite Structures*, Vol. 278, 114699, 2021, ISSN 0263-8223, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114699.
- [6] ISO: Plastiques - Détermination des propriétés en traction. Norme ISO-527-4, 2020.
- [7] ASTM: Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading. Norme ASTM D3410, 2021.
- [8] C. C. Chamis et J. H. Sinclair, « 10° off-axis tensile test for intralaminar shear characterization of fiber composites », NASA Technical Note, Number E-8577, Nasa TN D-8215, avril 1976.
- [9] M.-J. Pindera, C. T. Herakovich, « Shear characterization of unidirectional composites with the off-axis tension test », *Experimental Mechanics*, Vol. 26 n° 1, pp. 103–112, 1986, ISSN 0014-4851, doi: 10.1007/BF02319962.
- [10] R. R. Rizzo, « More on the Influence of End Constraints on Off-Axis Tensile Tests », *Journal of Composite Materials*, Vol. 3 n° 2, pp. 202–219, 1969, ISSN 1530-793X, doi: 10.1177/002199836900300201.