

## **Définition d'un essai de matage dans une structure bi-composant composite/métal.**

### ***Definition and sizing of a test to study the bearing stresses in a composite/metal structure.***

**Léo Sudriès<sup>1</sup>, Joël Serra<sup>1</sup>, Wiyao Azoti<sup>1</sup> et Bruno Castanié<sup>1</sup>**

1 : Université de Toulouse, Institut Clément Ader (UMR CNRS 5312)  
ISAE-SUPAERO / INSA / IMT-Mines Albi / UPS  
10 Av Edouard Belin 31055 Toulouse Cedex 4, France  
e-mail : [sudries@insa-toulouse.fr](mailto:sudries@insa-toulouse.fr), [azoti@insa-toulouse.fr](mailto:azoti@insa-toulouse.fr), [castanie@insa-toulouse.fr](mailto:castanie@insa-toulouse.fr)

### **Résumé**

Décarboner le transport humain et matériel représente un levier important pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Dans cet objectif, le développement de nouvelles infrastructures ferroviaires en matériaux composites adaptées à des trains légers est étudié. Lors de la conception de ces équipements, une problématique structurelle sur un bi-composant composite/métal est soulevée. Afin d'étudier la diffusion des contraintes de matage dans une telle structure, un montage expérimental est mis en place. Cinq configurations matériaux différentes sont étudiées, comprenant des parties en tissu 0/90, en tresse biaxiale et triaxiale. Des fibres de verre et de basalte ainsi qu'une résine thermoplastique Elium® et thermodurcissable Epoxy sont étudiées. Des charges de 10 à 70 kN sont appliquées sur les échantillons par l'intermédiaire d'un indenteur. Enfin, une analyse par tomographie RX est utilisée afin d'identifier les phénomènes d'endommagement du composite.

### **Abstract**

Decarbonization of transports represents a key action for reducing carbon emissions. Therefore, solutions for lightweight rail infrastructures in composite materials are investigated. During the design stage, a structural issue about a composite/metal bi-component happened. An experimental set-up was set up to study the diffusion of bearing stresses in this structure. Five material configurations were studied. Parts in 0/90 fabric, biaxial braid and triaxial braid, glass and basalt fibers, Elium® thermoplastic and Epoxy thermoset resin were studied. Loads from 10 to 70 kN were applied to the samples using an indenter. Finally, an X-ray tomography analysis is used to identify damage phenomena in the composite.

**Mots Clés :** ferroviaire, pultrusion, matage composite, bi-composant

**Keywords:** railway, pultrusion, bearing, bi-component

## **1. Introduction**

### **1.1 Contexte industriel de la recherche**

Enjeu majeur du développement économique d'un pays, la mobilité est aujourd'hui sujette à de nombreuses transformations provoquées par la nécessité de réduire l'empreinte carbone, l'évolution des usages et la digitalisation. Le transport ferroviaire a pris un certain retard dans cette évolution mais subit de plus en plus fortement la pression de la société et des institutions pour accélérer sa mutation. En 2021 en France, 30% des émissions de CO<sub>2</sub> proviennent du transport [1]. Sur ces émissions, 94,9% proviennent du transport routier : 53% des voitures individuelles et 27% des véhicules lourds pour la mobilité humaine et de marchandise. Dans l'objectif de réduire ce fort poste d'émission, le développement d'un nouveau type de transport ferroviaire adapté aux enjeux du 21<sup>ème</sup> siècle s'impose.

Pour poursuivre les efforts déjà entrepris sur le sujet, des projets de développement de nouveaux trains légers voient le jour. Mais les solutions de train léger ne sont qu'une partie de l'équation

budgétaire. En effet, au cœur du sujet repose la question des infrastructures des lignes de dessertes fines du territoire (LDFT), véritables artères permettant le désenclavement bas carbone des petites et moyennes localités. Or, la réhabilitation et les coûts d'exploitation de ces voies représentent le poste de dépense le plus conséquent pour l'Etat et les Régions. Ceci explique principalement la fermeture régulière de ces lignes. Ainsi, afin de permettre une revitalisation des territoires, il convient de proposer des solutions innovantes d'infrastructures adaptées à ces nouveaux trains légers à des coûts abordables.

L'objectif du projet INFRAlight<sup>1</sup> dans lequel s'inscrit la recherche présentée ici, est de proposer une infrastructure innovante connectée, adaptée à tout type de trains légers, peu coûteuse en investissements et en exploitation. L'infrastructure proposée repose sur un rail conçu en composite recyclable, fixée sur un système de pieux verticaux. Cette infrastructure innovante embarque en son sein un ensemble de capteurs et de câbles pour établir un système de communication sécuritaire et non sécuritaire pour l'interaction avec les infrastructures de signalisation et de circulation (passage à niveau, aiguillage, ...). L'ensemble de cette infrastructure a pour objectif de diminuer drastiquement les coûts de mise en œuvre et d'exploitation afin de permettre un renouvellement des voies de desserte fine [2].

## 1.2 Problématique de recherche dans la conception d'une infrastructure en composite

A l'issue de plusieurs boucles itératives de conception de l'infrastructure en matériaux composite, une problématique structurelle a émergé. Le verrou identifié découle du contact rail/roue au niveau de l'interface métal/composite. Les contraintes de matage générées lors de ce contact se diffusent dans la structure en composite. La configuration expérimentale matériaux bi-composant composite/métal est illustrée sur la *figure 1*.

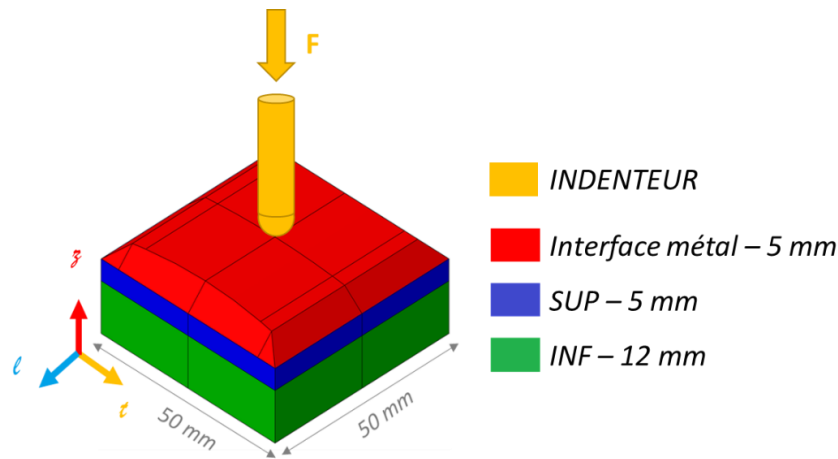


Figure 1. Représentation schématique de la configuration bi-matériaux étudiée.

La partie en rouge sur la *figure 1*, désignée « Interface métal » est réalisée en acier ferroviaire R260 d'une épaisseur de 5 mm. Sa géométrie est conditionnée par le cahier des charges du projet. La partie en vert dite « INF » est un composite unidirectionnel de 12 mm d'épaisseur dont les fibres suivent la direction longitudinale notée «  $\ell$  ». Enfin, la partie « SUP » est un composite non-unidirectionnel de 5 mm d'épaisseur. Les parties composites sont produites via un procédé de pultrusion et assemblées par collage. Une forte contrainte est appliquée sur la partie en acier par l'intermédiaire d'un « INDENTEUR ». Plusieurs itérations de conception ont eu lieu afin de déterminer la géométrie de l'échantillon et notamment de l'interface métal. Afin d'éviter un décollement du reste de la structure, les bords de cette interface sont biseautés.

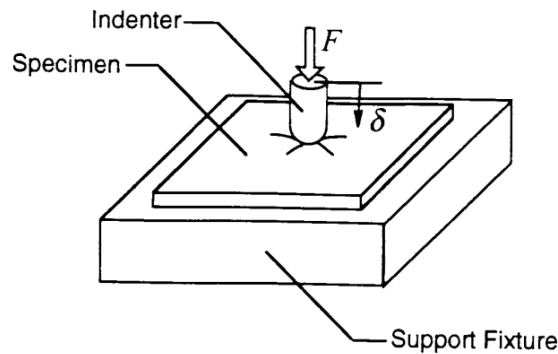
<sup>1</sup>Projet financé par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projet France 2030.

Les objectifs de cette recherche se résument ainsi à identifier et comprendre les mécanismes d'endommagement du composite qui entrent en jeu lors de la diffusion des contraintes de matage dans une structure bi-composant composite/métal et à apporter une solution permettant de les limiter. La détermination expérimentale des modes d'endommagement pourrait permettre d'enrichir le modèle numérique en y intégrant le modèle d'endommagement le plus adéquat.

## 2. Définition de l'essai

### 2.1 Etat de l'art sur le matage des composites

La norme ASTM D6264 [3] permet de déterminer la résistance d'un composite stratifié soumis à une contrainte induite par une indentation. Le montage expérimental prévu par cette norme se présente comme illustré sur la *figure 2*.



*Figure 2. Montage expérimental - indentation quasi-statique [3].*

Ces essais sont adaptés pour une configuration matériaux spécifique : les stratifiés à fibres longues unidirectionnelles d'une épaisseur de 4 à 6 mm avec un empilement de type [45/0/-45/90]<sub>s</sub>.

Les essais menés suivant la norme ASTM D5961 [4] permettent l'observation des mécanismes d'endommagement et de ruptures générés par des contraintes de matage localisées aux bordures d'un trou de perçage dans un stratifié composite. La contrainte est générée par l'intermédiaire d'une pièce annexe comme un boulon [5] [6] ou des rivets [7].

Pour ces essais, les phénomènes d'endommagements observés sont principalement une rupture de la matrice par compression et/ou par cisaillement [8], [9]. Après rupture de la matrice, la ruine du composite intervient par délaminage et microfissures aux interfaces des différents plis [10]. Dans le cas où la fibre est dans le sens de l'effort, l'endommagement est initié par micro-flambement des fibres [11].

Ces deux essais expérimentaux normalisés se rapprochent des essais à réaliser pour cette recherche mais ne correspondent pas exactement à la configuration étudiée : soit par la géométrie des échantillons soit par la méthode d'application de la contrainte. En revanche, l'étude des résultats produits par ces essais normatifs permettent d'anticiper le comportement mécanique d'une structure bi-composant composite/métal.

Le scénario de rupture attendu est donc une rupture en compression ou en cisaillement de la matrice entraînant un délaminage aux interfaces de la partie composite. Dans le cas où des fibres sont positionnées dans le sens de l'effort, l'initialisation de l'endommagement devrait se produire par micro-flambement des fibres. Au final, seule la résistance de la matrice permettra d'assurer la tenue structurelle des échantillons étudiés.

## 2.2 Modèle numérique

Un modèle par éléments finis sur le logiciel ABAQUS a été mis en place. Il reprend l'architecture de l'échantillon présenté en *Figure 1*. Un maillage de 0.5 mm a été attribué aux sections Interface métal (acier R260), SUP (Tissu verre 0/90) et INF (unidirectionnel PA6/Verre). Un effort de 55 000N est appliqué sur l'interface métal par l'intermédiaire de l'INDENTEUR.

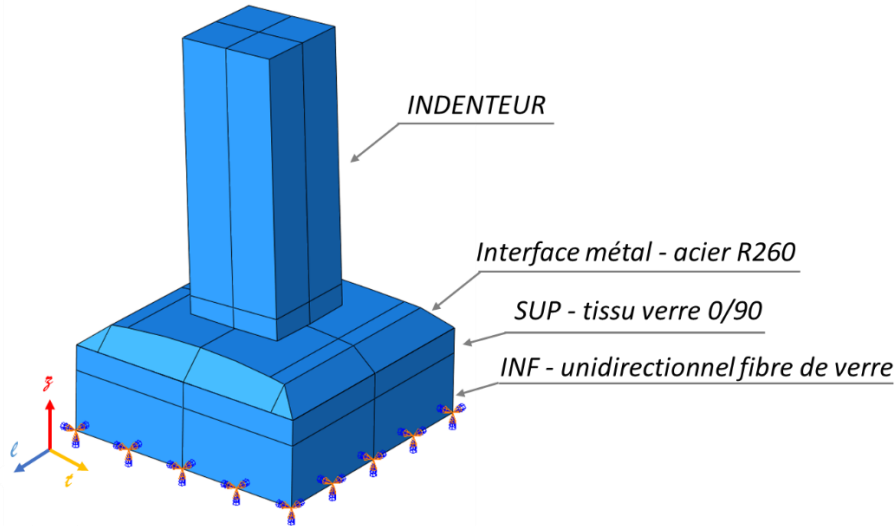


Figure 3. Modèle structure bi-composant composite/métal par éléments finis.

## 2.3 Résultats numériques

Les résultats montrent une contrainte élevée en cisaillement ainsi qu'en compression de la matrice selon l'axe «  $z$  » dans la partie SUP. Ces résultats sont cohérents avec la littérature vu précédemment : les contraintes induites à l'interface rail/roue se diffusent bien dans la section en composite en compression et cisaillement de la résine.

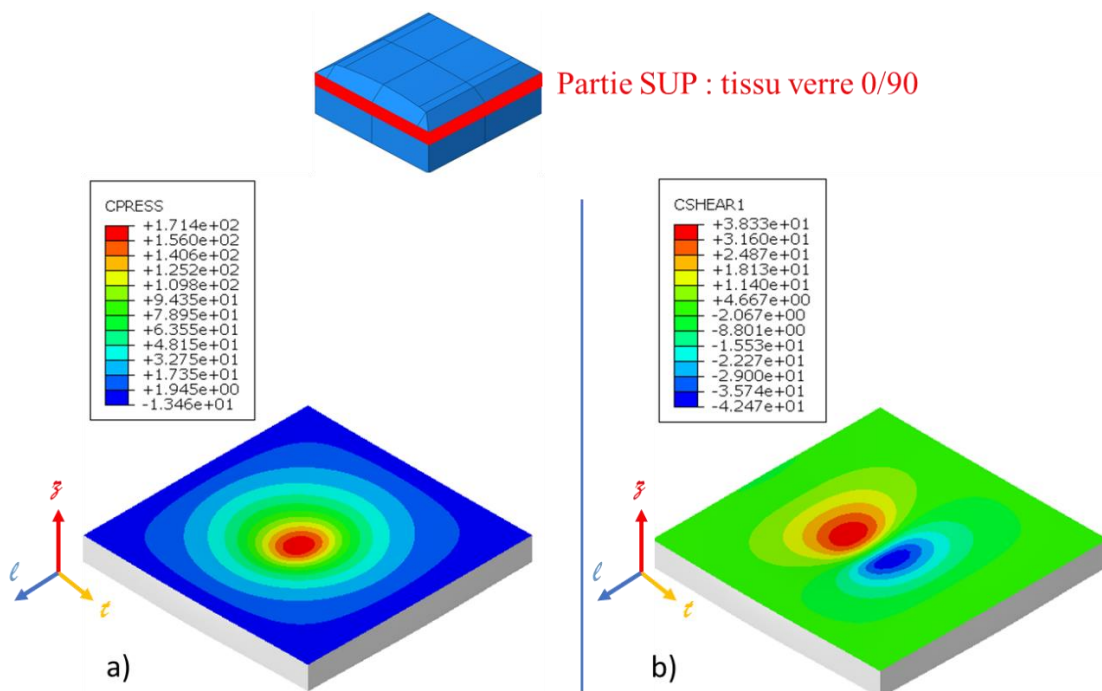


Figure 4. Contrainte dans la partie SUP a) compression selon  $z$  b) cisaillement

## 2.4 Configurations matériaux étudiées

Plusieurs configurations matériaux sont étudiées et sont détaillées dans le *tableau 1*. La première configuration est composée d'une partie SUP en tissu 0/90 en fibre de verre et d'une partie INF en unidirectionnel verre. Cette configuration est la plus simple à mettre en œuvre lors du procédé de fabrication par pultrusion et sert de référence pour les autres combinaisons de matériaux.

CONFIGURATIONS	SUP			INF	
	fibre	config	orientation	fibre	config
[1] Résine Elium®	Verre	Tissu	0°/90°	Verre	UD
[2] Résine Elium®	Verre	Tresse biax	+/- 45°	Verre	UD
[3] Résine Elium®	Verre	Tresse triax	+/- 45° / 0°	Verre	UD
[4] Résine Elium®	Basalte	Tresse triax	+/- 45° / 0°	Basalte	UD
[5] Résine Epoxy	Basalte	Tresse triax	+/- 45° / 0°	Basalte	UD

Tableau 1. Configurations étudiées pour l'étude de la diffusion des contraintes de matage dans une structure bi-composant.

L'influence de l'orientation des fibres (+/-45°) est étudiée avec la configuration n°2. L'influence d'une fibre quasi hors plan qui pourrait reprendre la charge verticale appliquée par l'indenteur est étudiée avec la configuration n°3 par l'intermédiaire d'une tresse triaxiale pour la partie UP.

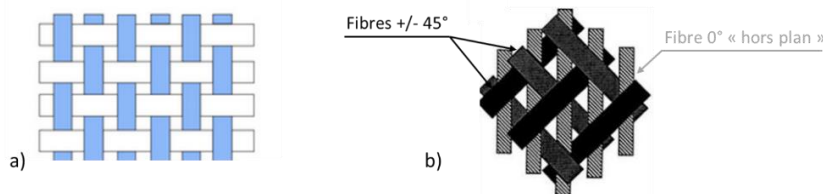


Figure 5. Représentation d'un a) Tissu 0/90 b) Tresse triaxiale +/-45° / 0° [12].

L'influence de la nature des fibres (basalte et verre) est étudiée avec la configuration n°4. Enfin, l'influence de la résine (thermoplastique avec la résine Elium® et thermodurcissable avec la résine Epoxy) est étudiée avec la configuration n°5.

## 2.5 Montage expérimental

Le montage expérimental choisi est présenté en *figure 6*. Un support d'échantillons permet le maintien en position des éprouvettes. Ce support est pris en étau dans les mors inférieurs de la machine d'essais INSTRON 8862 avec une cellule d'effort de 100 kN. De la même manière, l'indenteur est fixé aux mors supérieurs de la machine.

Les efforts sont appliqués sur les échantillons de 10kN à 70kN par palier de 1 tonne. Entre chaque montée en effort, une observation des endommagements est effectuée par tomographie RX.

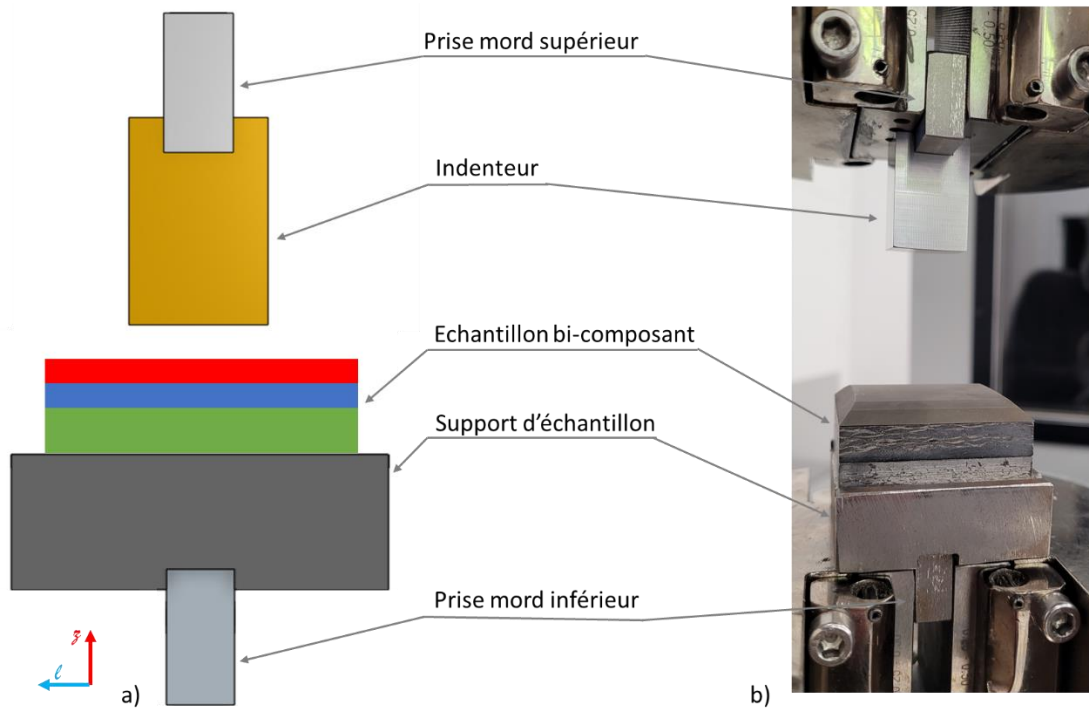


Figure 6. Montage expérimental avec une éprouvette bi-composant composite/métal a) schéma b) montage réel.

## 2.6 Moyen d'observation

Afin d'identifier et de quantifier les endommagements des éprouvettes, des essais arrêtés sont réalisés avec une augmentation progressive de la contrainte appliquée. Une méthode non destructive s'impose puisqu'il est nécessaire d'observer l'état des éprouvettes entre chaque applications de charge.

Non invasive, la tomographie aux rayons X permet d'obtenir une reconstruction de l'éprouvette en trois dimensions. Cette méthode est la plus couramment utilisée dans l'observation des endommagements de stratifiés composites et ce pour diverses configurations. On peut la retrouver sur l'analyse de l'endommagement de jonctions rivetées [5], de liaisons boulonnées [13] ou encore sur l'indentation de plaque demi trou [14].

## 3. Conclusion

Dans le contexte d'un projet industriel sur le développement de nouvelles infrastructures ferroviaires innovantes, un rail composite est dimensionné. Lors de son développement, une problématique structurelle de matage dans une structure composite/métal a émergée. Afin de comprendre les mécanismes d'endommagement dans la partie composite de cette structure et de proposer des configurations matériaux permettant de les limiter, un essai spécifique à la problématique est proposé. Plusieurs configurations matériaux sont étudiés. Après application d'une contraintes, des tomographies RX permettent d'observer les endommagements. Les modes de ruptures attendus sont par compression et/ou cisaillement de la matrice et par micro-flambement des fibres dans les cas des configurations avec des fibres hors plan.

## Références

- [1] Service des données et études statistiques (SDES), « Chiffres clés des transports - édition 2023 », 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-transport-édition-2023>
- [2] ADEME (Agence de la transition écologique), « INFRALight - Infrastructure innovante connectée, adaptée aux trains très légers », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/6078-infralight-Infrastructure-innovante-connectee-adaptee-aux-trains-tres-legers.html>

- [3] « Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite to a Concentrated Quasi-Static Indentation Force ». ASTM International.
- [4] D30 Committee, *Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates*. doi: 10.1520/D5961\_D5961M-17.
- [5] Y. Xiao et T. Ishikawa, « Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part I: Experimental investigation) », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 65, n° 7-8, p. 1022-1031, juin 2005, doi: 10.1016/j.compscitech.2005.02.011.
- [6] B. Castanić, S. Crézé, J. J. Barrau, F. Lachaud, et L. Risse, « Experimental analysis of failures in filled hole compression tests of carbon/epoxy laminate », *Compos. Struct.*, vol. 92, n° 5, p. 1192-1199, avr. 2010, doi: 10.1016/j.compstruct.2009.10.008.
- [7] M. Torres-Arellano, M. D. J. Bolom-Martínez, E. A. Franco-Urquiza, R. Pérez-Mora, O. A. Jiménez-Arévalo, et P. Olivier, « Bearing Strength and Failure Mechanisms of Riveted Woven Carbon Composite Joints », *Aerospace*, vol. 8, n° 4, p. 105, avr. 2021, doi: 10.3390/aerospace8040105.
- [8] C. Bouvet, B. Castanić, M. Bizeul, et J.-J. Barrau, « Low velocity impact modelling in laminate composite panels with discrete interface elements », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 46, n° 14-15, p. 2809-2821, juill. 2009, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2009.03.010.
- [9] L. Sheng, « Quasi-impact damage initiation and growth of thick-section and toughened composite materials », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 31, n° 22, p. 3079-3098, nov. 1994, doi: 10.1016/0020-7683(94)90042-6.
- [10] O. Jørgensen, A. E. Giannakopoulos, et S. Suresh, « Spherical indentation of composite laminates with controlled gradients in elastic anisotropy », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 35, n° 36, p. 5097-5113, déc. 1998, doi: 10.1016/S0020-7683(97)00209-6.
- [11] A. Crosky, D. Kelly, R. Li, X. Legrand, N. Huong, et R. Ujjin, « Improvement of bearing strength of laminated composites », *Compos. Struct.*, vol. 76, n° 3, p. 260-271, nov. 2006, doi: 10.1016/j.compstruct.2006.06.036.
- [12] C. Lanceron, B. Duchamp, D. Soulat, et F. Veyet, « Analyse du comportement en traction de renforts tressés pour application composite », 2017.
- [13] H. Alshahrani et T. A. Sebaey, « Bearing Properties of CFRP Composite Laminates Containing Spread-Tow Thin-Plies », *Polymers*, vol. 14, n° 10, p. 2076, mai 2022, doi: 10.3390/polym14102076.
- [14] C. Sola, B. Castanić, L. Michel, F. Lachaud, A. Delabie, et E. Mermoz, « On the role of kinking in the bearing failure of composite laminates », *Compos. Struct.*, vol. 141, p. 184-193, mai 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.01.058.