

Étude expérimentale de la rupture de joints en T surmoulés sur composites avec une maîtrise fine des conditions aux limites

Experimental study of failure in overmolded T-joint composites with fine control of boundary conditions

Xiaofei Song¹, Federica Daghia¹, Yannick Elie² et Christophe Cluzel^{1,3}

1 : Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS,
LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay
91190, Gif-sur-Yvette

e-mail : xiaofei.song@ens-paris-saclay.fr, federica.daghia@ens-paris-saclay.fr et christophe.cluzel@ens-paris-saclay.fr

2 : Pôle Advanced materials & Components Engineering, CETIM-Technocampus Composites,
Chemin du Chaffault, ZI du Chaffault, 44340 Bouguenais
e-mail : yannick.elie@cetim.fr

3 : IUT d'Evry Val d'Essonne, Département SGM
Université d'Evry - Université Paris-Saclay
3 rue du Père Jarlan, 91025 Evry CEDEX

Résumé

Le surmoulage, technique largement utilisée, consiste à mouler un matériau (souvent thermoplastique) sur une base existante. Un défi majeur est l'adhésion à l'interface entre le stratifié de base et la partie surmoulée. Il n'existe pas encore d'essai normalisé pour mesurer directement la contrainte maximale à cette interface. Les essais de traction sur des joints en T surmoulés sont courants, mais ils induisent souvent des flexions non souhaitées du stratifié de base, dues à des conditions aux limites non maîtrisées ou à des erreurs d'alignement des charges, générant une répartition non uniforme des contraintes. Ce travail vise à étudier expérimentalement la rupture et à identifier la contrainte maximale à l'interface, en s'appuyant sur un nouveau montage d'essais spécialement conçu à cet effet. Il permet de contrôler l'axe de chargement et de moduler la flexion du stratifié de base. Des supports métalliques épais collés sur le stratifié permettent d'éliminer la flexion et de rendre les contraintes plus uniformes à l'interface. Des essais sur deux formes de joints en T, droit et chanfreiné, ont montré que si une distribution uniforme est possible en début d'essai, l'apparition des fissures dans le stratifié de base, fragilisé par la fabrication, modifie les conditions aux limites en cours d'essai, empêchant l'identification directe de la contrainte maximale. Les résultats expérimentaux valident les simulations numériques effectuées dans un travail précédent, mais la variabilité observée soulignent la nécessité de stabiliser le processus de fabrication.

Abstract

Overmolding, a widely used technique, involves molding a material (often thermoplastic) onto an existing base. A major challenge is the adhesion at the interface between the base laminate and the overmolded part. There is currently no standardized test to directly measure the maximum stress at this interface. Tensile tests on overmolded T-joints are common, but they often induce unintended bending of the base laminate due to uncontrolled boundary conditions or misalignment of loads, resulting in a non-uniform stress distribution. This study aims to experimentally investigate the failure and identify the maximum stress at the interface, using a newly designed test fixture specifically developed for this purpose. It allows for controlling the loading axis and modulating the bending of the base laminate. Thick metal supports glued onto the laminate help reduce bending and achieve more uniform stress distribution. Tests conducted on two T-joint shapes, straight and chamfered, showed that while a uniform distribution is possible at the beginning of the test, the formation of cracks in the base laminate, weakened by manufacturing, alters the boundary conditions during testing, preventing direct identification of the maximum stress. The experimental results validated the numerical simulations carried out in a previous work, but the observed scatter highlight the need to stabilize the manufacturing process.

Mots Clés : surmoulage, joint en T, montage d'essai, conditions aux limites, conditions de chargement

Keywords : overmolding, T-joint, test fixture, boundary conditions, loading conditions

1. Introduction

Technique de fabrication courante, le surmoulage consiste à mouler un matériau, généralement un thermoplastique, sur une base existante. Cette technique, prisée pour sa flexibilité, est essentielle dans l'aéronautique, l'automobile ou l'électronique. Cependant, l'interface entre le stratifié de base et la partie surmoulée reste un défi majeur. Sous contrainte mécanique, des fissures peuvent se développer dans cette zone critique, et notamment à l'interface entre le stratifié et le surmoulage, compromettant la structure. Maîtriser son comportement est donc crucial pour la fiabilité des pièces surmoulées.

De nombreuses recherches ont été menées pour étudier l'adhésion entre les matériaux composites et les matériaux de surmoulage. Ces travaux se concentrent sur diverses combinaisons de matériaux, telles que le surmoulage thermoplastique sur un substrat thermoplastique ou métallique [1, 2, 3, 4]. Ces études soulignent l'impact des propriétés des matériaux, des traitements de surface et des procédés de fabrication sur l'adhésion. Cependant, la compréhension complète du comportement de l'interface, surtout sous des charges complexes, reste limitée. Comme souligné dans la littérature, il n'existe actuellement aucun essai normalisé permettant de mesurer directement la contrainte maximale au niveau de l'interface stratifié/surmoulage. Pour pallier ce manque, des essais de traction sur des joints en T surmoulés sont couramment utilisés pour évaluer leur comportement mécanique [1, 2, 4]. Bien qu'ils fournissent des informations sur la résistance et les fissures, ces essais présentent des limites : la flexion imprévue du stratifié due à des conditions aux limites imparfaites [5] et les désalignements de charge peuvent biaiser les résultats et réduire leur fiabilité.

Des simulations numériques basées sur des modèles de zones cohésives ont montré que la flexion du stratifié et le désalignement de la charge provoquent des contraintes non uniformes à l'interface [6]. La rupture dépend alors de deux facteurs : la contrainte maximale pour initier une fissure et l'énergie nécessaire à sa propagation. Un contrôle précis des conditions de chargement permettrait de moduler les distributions de contraintes, qu'elles soient uniformes pour identifier directement la contrainte maximale ou avec des gradients élevés pour simuler des conditions réelles, où la tenue mécanique peut être contrôlée par la contrainte et/ou l'énergie.

Cette étude propose un nouveau montage isostatique pour analyser l'interface stratifié/surmoulage. Doté de fonctionnalités innovantes, il permet un contrôle précis des conditions aux limites et de chargement. La contrainte maximale peut alors être identifiée par une méthode inverse couplant expériences et simulations. Les essais avec flexion ou désalignement confirment les prédictions numériques sur les charges maximales, validant le modèle. Malgré ces avancées, la dispersion des résultats souligne la nécessité de stabiliser le processus de fabrication pour une reproductibilité accrue.

2. Montage et configurations d'essais

2.1. Montage d'essai dédié

Le montage isostatique développé est illustré en Fig. 1 et la Fig. 2 présente son schéma cinématique. Comparé aux configurations classiques des essais de traction, deux rotules sont utilisées au lieu de connexions rigides avec le reste de la machine. Cela permet de matérialiser l'axe de chargement. Un réglage de position des appuis de flexion par rapport à cet axe permet de maîtriser la position du milieu de l'éprouvette, donc de piloter une charge combinée flexion/tension. Le réglage de l'écartement des appuis permet de moduler la composante de flexion du stratifié de base, voire de l'annuler complètement en rigidifiant la base composite via une plaque d'acier épaisse collée en face arrière. Enfin, le déport de la rotation du palonnier par des lames composites flexibles au niveau de l'interface étudiée permet une bonne répartition des charges sur les deux appuis de flexion et autorise la visualisation permanente du joint lors des essais.

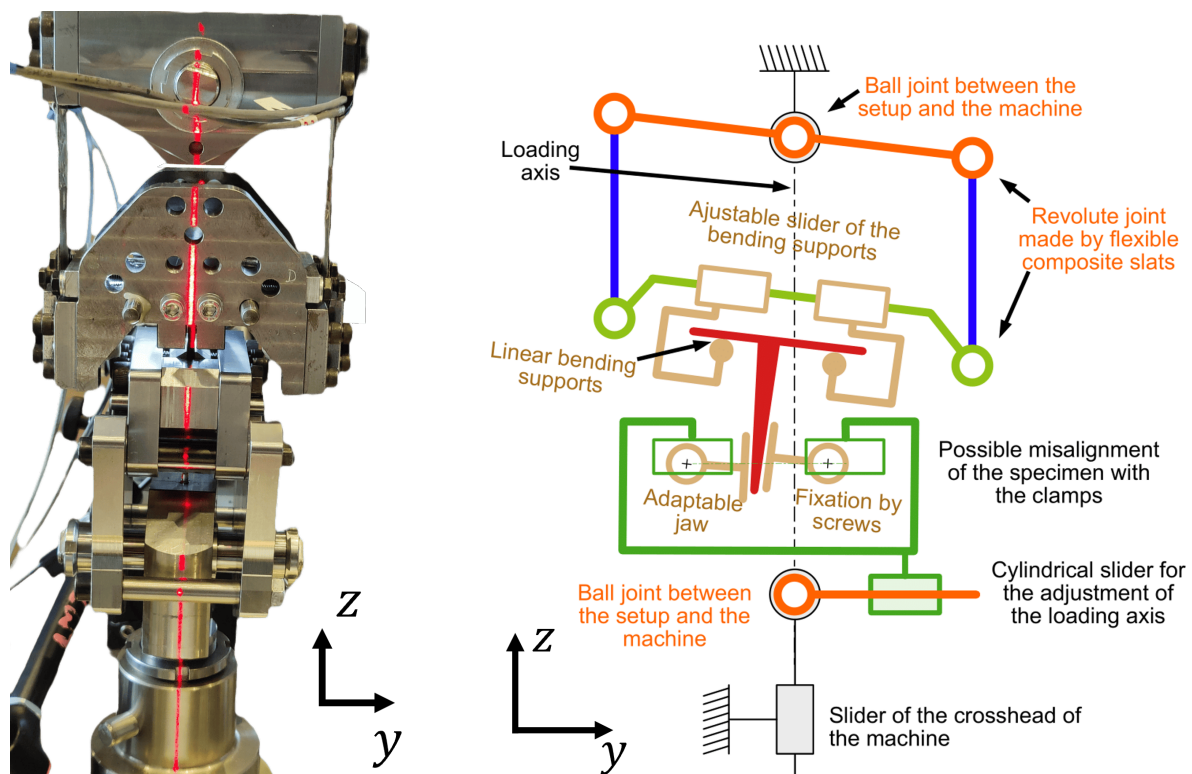


FIG. 1. – Photo : vue de face du montage. FIG. 2. – Schéma cinématique du montage dans le plan (y,z)

2.2. Éprouvettes et configurations d'essais

En ce qui concerne les éprouvettes, deux géométries de joints sont étudiées : un joint en T avec pied droit ou chanfreiné. La structure originale du joint en T chanfreiné est illustrée en Fig. 3. La longueur dans le sens de l'injection est d'environ 42 mm. Deux éprouvettes, chacune de 20 mm de large (Fig. 4), ont été extraites de chaque joint en T. Pour mieux garantir l'uniformité de la distribution des contraintes à l'interface, la longueur restante du stratifié dans la direction 2 (sans la partie surmoulée) a été retirée.

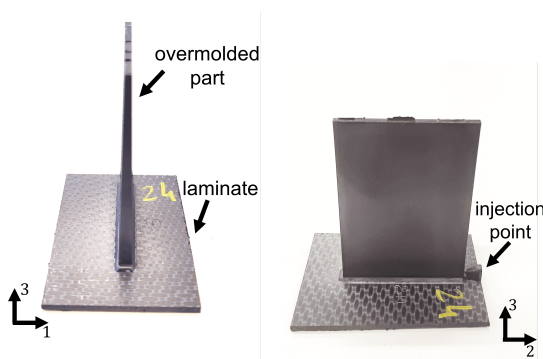


FIG. 3. – Joint en T chanfreiné avant la découpe



FIG. 4. – 20 mm-large joint en T chanfreiné après la découpe

Différentes conditions aux limites et de chargement ont été appliquées pour étudier l'influence de la flexion du stratifié et de l'alignement de la charge sur le comportement à la rupture de la structure. En termes de maintien du stratifié de base, trois configurations ont été testées : une condition sans flexion (b) et deux conditions permettant une flexion plus ou moins importante du stratifié, où la distance entre les appuis de flexion correspond à la largeur du pied + 2 mm (c1) ou + 10 mm (c5). Pour neutraliser complètement la flexion, la solution choisie est de conserver la mise en charge par

des appuis, mais en rigidifiant le stratifié de base via une plaque d'acier épaisse collée en face arrière. En termes d'alignement, l'axe de chargement a été positionné en correspondance de l'axe du joint en T (configuration alignée) ou écarté d'une distance de 5 mm (configuration désalignée).

2.3. Localisations des fissures

Divers mécanismes de fissurations ont été observés pendant les essais, qu'ils provoquent ou non la rupture ultime. Ces mécanismes peuvent être classés en 2 catégories et 5 types (Fig. 5) :

1. Critiques, entraînant la rupture ultime :
 1. À l'intérieur de la partie surmoulée
 2. À l'interface surmoulage/stratifié
2. Sous-critiques, apparaissant pendant l'essai mais n'entraînant pas la rupture ultime :
 3. À l'intérieur du stratifié, près de l'interface surmoulage/stratifié
 4. À l'intérieur du stratifié, près de l'interface stratifié/colle/acier
 5. À l'interface stratifié/colle/acier

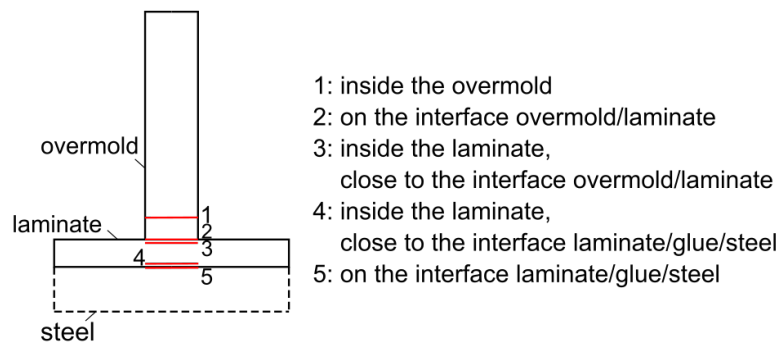


FIG. 5. – Localisations des fissures

2.4. Courbes effort - déplacement

Fig. 6 et 7 illustrent des courbes force-déplacement pour quelques configurations testées. Les essais qui autorisent la flexion du stratifié de base, comme en Fig. 6, ne montrent pas de chute d'effort avant la rupture finale, tandis que dans le cas où il n'y a pas de flexion (comme en Fig. 7), une chute d'effort est visible en cours d'essai. D'après les photos prises durant l'essai, cette chute correspond à l'apparition des fissures dans le stratifié proche de l'acier (type 4 selon la classification Fig. 5). La fonction de blocage de la flexion est donc efficace, mais l'essai ne permet pas une exploitation d'une contrainte quasi uniforme dans le joint car le point faible devient alors la tenue transverse du substrat composite.

2.5. Variabilité des éprouvettes

Les scans tomographiques aux rayons X réalisés sur des joints en T initiaux avant la découpe et les essais ont montré que le stratifié de base remonte dans la zone de surmoulage à une hauteur variable (Fig. 8), en fonction de la distance par rapport au point d'injection. Cela a été confirmé pendant les essais : deux échantillons découpés à partir des mêmes joints en T ont présenté des comportements différents. Par exemple, sur la Fig. 6, les éprouvettes 23071 (orange) et 23072 (bleu) sont issues du même joint en T original. Cependant, les forces maximales obtenues sont aux extrêmes au sein de ce groupe. Des échantillons nominale-ment identiques peuvent donc présenter des microstructures locales différentes.

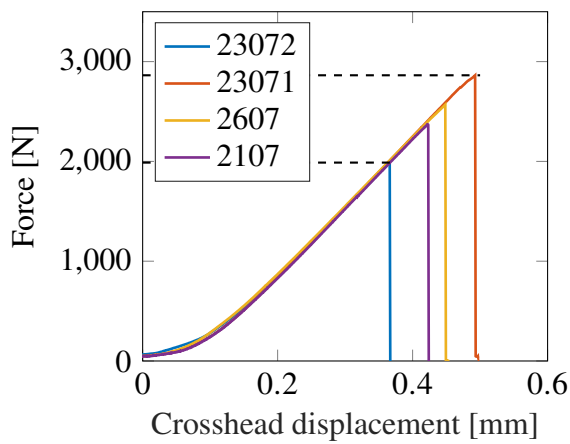


FIG. 6. – Courbes effort - déplacement [pied droit avec flexion du stratifié, chargement aligné, distance appuis largeur + 2 mm]

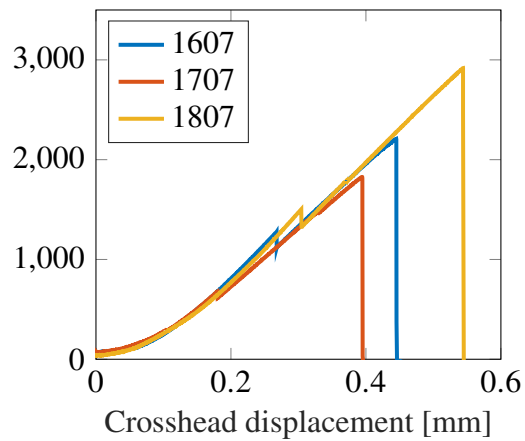


FIG. 7. – Courbes effort - déplacement [pied droit sans flexion du stratifié, chargement aligné]

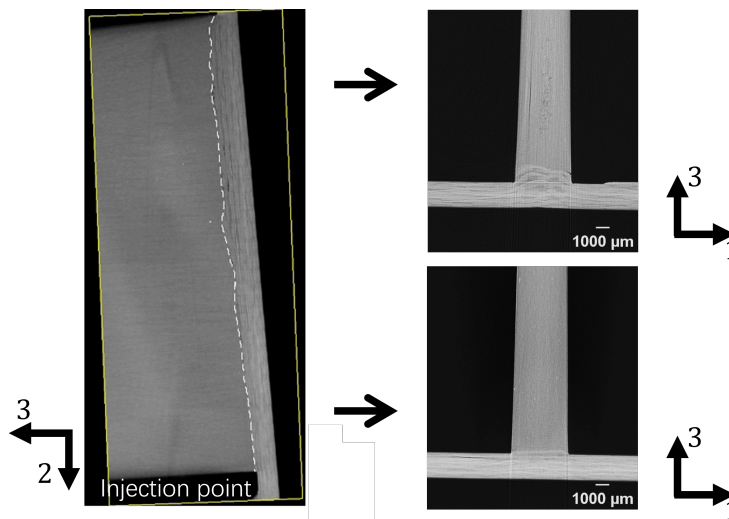


FIG. 8. – Exemple : Variation du bombement de l'interface le long du chemin d'injection sur un joint en T initial, éloigné (en haut) et proche (en bas) du point d'injection

2.6. Comparaison des flux d'effort maximaux

Une partie des résultats en matière de flux d'effort maximaux (*i.e.* force par unité de largeur de l'éprouvette) est présentée en Fig. 9. Dans les simulations numériques, l'interface entre le stratifié et le surmoulage a été représentée à l'aide d'un modèle de zone cohésive triangulaire avec une contrainte maximale de 50 MPa en un taux critique de restitution d'énergie de $G_c = 1050 \text{ J/m}^2$. Dans le cas où la flexion n'est pas autorisée, une fissure dans le stratifié, observée dans les essais, a été rajoutée. En revanche, la forme bombée du stratifié n'a pas été simulée. Dans l'ensemble, les tendances prédites numériquement sont confirmées expérimentalement. La différence entre les résultats des simulations et ceux des essais peut être expliquée par la non prise en compte des porosités créées sur l'interface lors du procédé d'injection et de la forme bombée de l'interface. L'écart-type des essais peut s'interpréter par la variabilité des éprouvettes mentionnée dans la section précédente. Des fissures plus longues, sans provoquer une rupture immédiate, sont visibles parmi les échantillons présentant une force de rupture plus élevée. Du point de vue de la conception des formes de joints, l'ajout d'un chanfrein contribue à améliorer les performances. Cependant, cet effet est moins efficace lorsque la flexion du stratifié est plus importante.

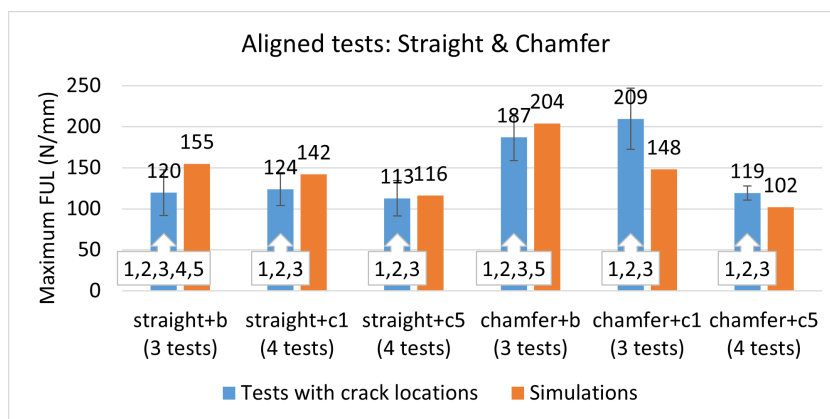


FIG. 9. – Exemple : flux d’effort maximaux [chargement aligné, joint en T simple et chanfreiné]

3. Conclusions et perspectives

Dans cette étude, un montage isostatique a été développé et utilisé pour analyser l’influence des conditions aux limites et de chargement sur la rupture des joints en T lors d’essais de traction. Ce montage bi-rotulé permet de contrôler l’axe de chargement, dont la position par rapport à l’axe du joint en T peut être variée.

Lors des essais impliquant le support métallique collé, une répartition uniforme des contraintes a pu être obtenue en début d’essai, mais cette uniformité n’a pas été maintenue jusqu’à la rupture finale. En effet, en l’absence de concentration de contraintes à l’interface stratifié/surmoulage, le point faible devient la tenue transverse du stratifié de base : cela provoque la formation de fissures dans le stratifié de base et modifie le chargement vu par l’interface stratifié/surmoulage. L’identification directe de la contrainte maximale devient alors impraticable, mais elle reste possible par une méthode d’identification inverse, corrélant les résultats expérimentaux et les simulations.

Dans les essais où le stratifié subit une flexion ou la structure est soumise à un désalignement de la charge, les tendances numériques concernant la charge maximale en fonction des conditions aux limites ont été confirmées expérimentalement. Différentes localisations de fissures ont été observées, en lien avec les simulations, validant ainsi l’approche numérique adoptée. Cependant, la dispersion des résultats expérimentaux souligne la nécessité de stabiliser davantage le processus de fabrication pour améliorer la reproductibilité.

Remerciements

Ce travail a été motivé et soutenu par le CETIM dans le cadre de CompInnov OpenLab.

Références

- [1] M. Valverde, R. Kupfer, T. Wollmann, L. Kawashita, M. Gude, S. Hallett « Influence of component design on features and properties in thermoplastic overmoulded composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 132, pp. 105823, 2020, ISSN 1359835X.
- [2] R. Akkerman, M. Bouwman, S. Wijskamp « Analysis of the Thermoplastic Composite Overmolding Process : Interface Strength », *Frontiers in Materials* Vol. 7, pp. 27, 2020, ISSN 2296-8016.
- [3] G. Lucchetta, F. Marinello, P. Bariani « Aluminum sheet surface roughness correlation with adhesion in polymer metal hybrid overmolding », Vol. 60 n° 1, pp. 559–562, 2011, ISSN 00078506.
- [4] F. Neveu, C. Cornu, P. Olivier, B. Castanié « Manufacturing and impact behaviour of aeronautic overmolded grid-stiffened thermoplastic carbon plates », *Composite Structures* Vol. 284, pp. 115228, 2022, ISSN 02638223.
- [5] X. Song, F. Daghia, Y. Elie « Numerical simulations of overmolded composite parts by means of a cohesive zone model », in : 11th European Solid Mechanics Conference (EMSC 2022), Galway, Ireland, 2022.
- [6] X. Song, F. Daghia, C. Cluzel, Y. Elie « Influence of boundary conditions on the failure behavior of T-joint-shaped overmolded composite structure », in : 21st European Conference on Composite Materials, Nantes Université, Nantes, France, 2024.