



HAL
open science

Caractérisation expérimentale des jonctions composites thermoplastiques surmoulées fibres courtes sur fibres longues

Xiaofei Song, Federica Daghia, Christophe Cluzel, Yannick Elie

► **To cite this version:**

Xiaofei Song, Federica Daghia, Christophe Cluzel, Yannick Elie. Caractérisation expérimentale des jonctions composites thermoplastiques surmoulées fibres courtes sur fibres longues. JNC23 : Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606964

HAL Id: hal-04606964

<https://hal.science/hal-04606964>

Submitted on 10 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation expérimentale des jonctions composites thermoplastiques surmoulées fibres courtes sur fibres longues

Experimental characterization of overmolded thermoplastic composite junctions between short and long fibers

Xiaofei Song¹, Federica Daghia¹, Christophe Cluzel^{1,2} et Yannick Elie³

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

3 : Pôle Ingénierie Polymères & Composites, CETIM-Technocampus Composites,
Chemin du Chaffault, ZI du Chaffault, 44340 Bouguenais
e-mail : yannick.elie@cetim.fr

Résumé

Le procédé de fabrication de composites *Quilted Stratum Process (QSP)*, proposé par le CETIM, consiste à estamper des pièces composites thermoplastiques constituées de plaques de stratifié thermoplastique (fibres longues), puis à surmouler des détails structuraux (injection avec fibres courtes). Un élément crucial pour le dimensionnement des pièces est le comportement de l'interface entre les zones à fibres longues et à fibres courtes. Dans ce travail, des essais habituellement utilisés pour la caractérisation du délaminage et des joints collés ont été adaptés pour caractériser la jonction fibres longues/fibres courtes. L'objectif est d'identifier le taux de restitution d'énergie critique et ensuite alimenter un modèle de zone cohésive.

Abstract

CETIM has proposed a novel composite manufacturing process called Quilted Stratum Process (QSP). It consists in thermoforming thermoplastic composite parts made of long fiber laminate sheets, then overmolding structural elements (injection reinforced by short fibers). A crucial element for the sizing of the parts is the behavior of the interface between the long fiber and short fiber zones. In this work, experimental tests usually used to characterize delamination and bonded joints were adapted to characterize the long fiber/short fiber junction. The aim is to identify the critical strain energy release rate and to provide material data for a numerical cohesive zone model.

Mots Clés : caractérisation, interface, surmoulage, composite à matrice thermoplastique

Keywords : characterization, interface, overmolding, thermoplastic matrix composite

1. Introduction

L'utilisation croissante de matériaux composites à matrice thermoplastique dans l'industrie du transport nécessite le développement de procédés de fabrication rapides et fiables. Dans ce cadre, le CETIM a développé le procédé *QSP*, qui consiste à injecter des raidisseurs en matériaux composites à fibres courtes sur une structure stratifiée mince en composite à fibres longues orientées. L'interface entre la structure stratifiée et la partie injectée est donc une zone d'adhésion très spécifique, dont les propriétés de résistance mécanique sont très dépendantes de la géométrie externe de la zone de jonction ainsi que du comportement de la zone d'interface, lié aux matériaux et au procédé de fabrication. Afin d'alimenter les modèles numériques, il est nécessaire de caractériser l'interface en réalisant des essais

expérimentaux. Un des paramètres à identifier est notamment le taux de restitution d'énergie critique associé à la propagation d'une fissure à l'interface.

Les essais classiques tels que l'essai *Double Cantilever Beam (DCB)* [1] pour le mode I et l'essai *End Notched Flexure (ENF)* [2] pour le mode II ont été conçus pour une fissure qui se propage dans le plan moyen d'un stratifié ayant un empilement symétrique, dans le but de maîtriser la mixité modale. Dans notre cas, la structure étant composée d'une partie fibres courtes et d'une partie fibres longues, la symétrie est perdue, ce qui complexifie la propagation de la fissure. En effet, il existe des risques de rupture en flexion lors de l'avancée de la fissure, ainsi que de déviation de celle-ci vers la zone à fibres courtes. De plus, une structure asymétrique telle que l'assemblage fibres longues/fibres courtes engendre systématiquement une propagation sous conditions de mode mixte : des essais de mode pur ne sont en général pas possibles. Lors des campagnes d'essais, il a été décidé d'adapter l'essai *Climbing Drum Peel (CDP)* [3] utilisé par la communauté des adhésifs à notre problématique.

2. Essai CDP

Le principe de l'essai CDP est présenté en Fig. 1. L'éprouvette est constituée d'une partie fine (le bras de pelage constitué de trois plis de fibres longues) et d'une partie épaisse (fibres courtes) avec une préfissure entre les deux. Le bras de pelage est attaché au tambour, tandis que le haut de l'éprouvette est pris entre les mors supérieurs de la machine de traction. Le tambour est relié au bâti de la machine par des courroies de traction fixées sur les flasques du tambour. Lors de l'essai, les courroies de traction provoquent la rotation du cylindre dans le sens horaire, et font "grimper" ("Climbing Drum Peel") le tambour le long de l'éprouvette, ce qui fait propager la fissure. L'avantage de l'essai CDP par rapport à l'essai DCB est que la cinématique est imposée par le tambour, d'où une propagation de fissure plus stable et un front de fissure plus droit. Initialement conçu pour les sandwichs, il a été adapté pour les composites monolithiques dans [4]. Cet essai est principalement gouverné par une rupture de l'interface en mode I, mais une composante de mode II existe qui tend à dévier la fissure dans la direction du bras de pelage. La partie fibres longues a été choisie comme bras de pelage afin d'éviter la déviation de fissure dans la zone à fibres courtes mais également pour assurer une résistance à la charge de traction et à la courbure d'enroulement sur le tambour.

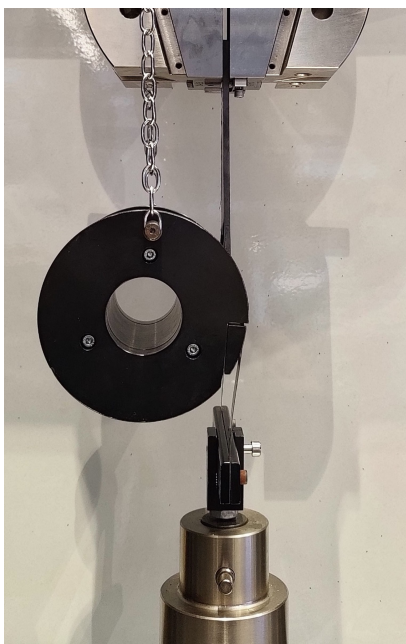


FIG. 1. – Montage d'essai CDP

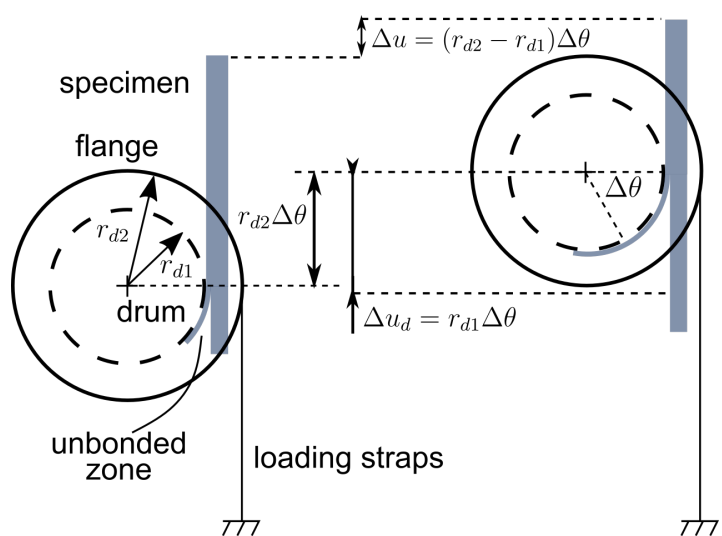


FIG. 2. – Principe d'essai

A partir des courbes force-déplacement (exemple en Fig. 3), on peut déduire la valeur du taux de restitution d'énergie critique G_c avec l'Eq. 1 en utilisant la géométrie du tambour et de l'éprouvette (Fig. 2) :

$$G_c = \frac{\Delta E}{\Delta A} = \frac{F_d - F_w}{w} \frac{r_2 - r_1}{r_1} \quad (\text{Eq. 1})$$

Où ΔE représente l'incrément de l'énergie dissipée dans la propagation de fissure, ΔA l'incrément de la surface fissurée, F_d l'effort d'enroulement et de délaminage, F_w l'effort d'enroulement, w la largeur de l'éprouvette, r_1 et r_2 définis comme suit :

$$r_1 = r_{d1} + h_p/2 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$r_2 = r_{d2} + h_s/2 \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec r_{d1} et r_{d2} les rayons du tambour et du flasque, h_p et h_s les épaisseurs du bras de pelage et de la courroie de chargement.

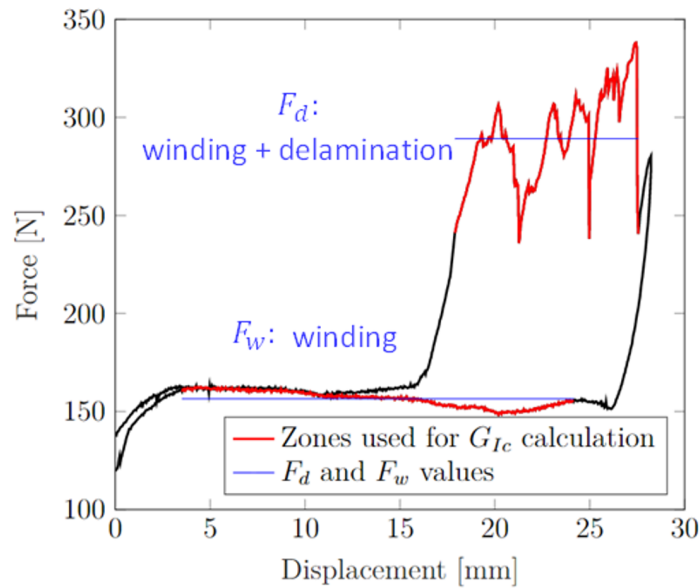


FIG. 3. – Exemple de courbe force-déplacement

Sur la Fig. 3, on peut observer des variations locales et des chutes brutales de l'effort qui correspondent à des avancées rapides de la fissure. Lorsqu'on calcule G_c en prenant la valeur moyenne de F_d sur la totalité de la zone de propagation, les variations en effort et notamment les stick-slips sont moyennées et elles n'auront pas d'influence sur le résultat. Cependant, une variation importante de F_d dans une zone de propagation stable de la fissure peut correspondre à une modification locale de G_c qui est intéressante à identifier. Pour accéder à cette information, on peut également calculer G_c avec une moyenne glissante de F_d . Cette méthode a donc été choisie pour la suite.

3. Adaptation de l'essai CDP à l'interface fibres longues/courtes

L'essai CDP décrit en Section 2 a été adapté à la caractérisation de l'interface fibres longues/fibres courtes. Pour un déroulement optimal de l'essai, l'éprouvette doit avoir les caractéristiques suivantes :

- le bras de pelage doit être suffisamment flexible pour permettre son enroulement sans rupture autour du rayon interne du tambour (50 mm), et suffisamment résistant pour supporter en traction le poids du tambour (environ 4 kg) ;
- la partie épaisse de l'éprouvette doit être suffisamment rigide pour limiter la flexion de l'ensemble pendant l'essai ;
- la composante de mode II du chargement doit tendre à diriger la fissure vers la partie fibres longues, pour lui empêcher de sortir de l'interface à caractériser (car la direction de propagation de la fissure n'est pas contrainte dans la zone à fibres courtes).

En vue de ces conditions, une éprouvette a été conçue avec les caractéristiques suivantes :

- le bras de pelage est constitué de trois plis à fibres longues d'épaisseur nominale 0,184 mm, avec un empilement [0/90/0], où 0 est la direction de propagation de la fissure ;
- la partie épaisse est constituée d'un surmoulage en fibres courtes de 3,5 mm d'épaisseur ;
- un film séparateur antiadhésif est inséré entre les parties fibres courtes et fibres longues pour créer une préfissure d'environ 85 mm de longueur.

Les dimensions globales des éprouvettes sont 20 mm de largeur pour 210 mm de longueur.

4. Microscopie des échantillons

La plaque bi-composante (stratifié et surmoulage) préfissurée qui a été fabriquée par le CETIM est de dimensions 270 mm × 270 mm. Un film séparateur antiadhésif a été inséré avant l'injection des fibres courtes pour produire une préfissure d'environ 85 mm entre le stratifié et le surmoulage. On notera que la surface de la partie surmoulée est significativement plus grande que dans la plupart des cas d'application, où le surmoulage est utilisé pour fabriquer des détails structuraux. À cause de cette différence, la fabrication des plaques pour les essais CDP a présenté des difficultés. En particulier, les plaques présentaient une courbure initiale lors du démoulage à cause des différents coefficients d'expansion thermique des zones fibres longues et fibres courtes. De plus, il existe des défauts dans les échantillons coupons qui ont été découpés dans la plaque. Plusieurs types ont été observés sous microscopie avant les essais :

1. délaminage dans la partie fibres longues (Fig. 4) ;
2. présence de fissures et bifurcation dans la zone nominale non préfissurée (Fig. 5) ;
3. rupture dans la partie fibres courtes (Fig. 6).

Les défauts de types 1 et 3 n'ont pas d'influence significative sur le taux de restitution d'énergie recherché car ils ne sont pas situés sur l'interface. En revanche, le type 2 pourrait diminuer localement la valeur de G_c obtenu pendant les essais. Si ce défaut n'est pas présent dans les futures pièces de production, les zones où il est présent sont à exclure de l'analyse.

5. Résultats d'essais et analyse

L'essai CDP est robuste grâce aux fortes contraintes cinématiques imposées par le tambour (son rayon et son inertie), et a permis d'obtenir des résultats cohérents, malgré une courbure initiale non négligeable de la plaque (et donc des éprouvettes découpées dans celles-ci). Les faciès de rupture du côté fibres courtes sont visibles en Fig. 7. Les 7 éprouvettes y sont mises côte à côte selon leur position originale sur la plaque. La propagation de la fissure est globalement stable, mais des stick-slips qui correspondent à des propagations rapides sont visibles sur certaines éprouvettes en Fig. 7. L'effort d'enroulement et de délaminage F_d baisse sur la plupart des éprouvettes, ce qui indique une baisse du taux de restitution d'énergie critique. Le sens de propagation de fissure va de gauche à droite : la marque noire à gauche correspond au film inséré pendant la fabrication pour produire la préfissure et délimite le début de la propagation ; la trace bleue sur la droite des éprouvettes note la fin de propagation pendant l'essai.

Pour filtrer les stick-slip, tout en gardant l'information sur les variations du taux de restitution d'énergie dans différentes zones des éprouvettes, on présente la valeur de G calculée avec une moyenne glissante de F_d sur 2 mm en fonction du déplacement en Fig. 8 et 9. Le déplacement de la traverse Δu a été converti en déplacement de la fissure sur l'éprouvette Δu_d par l'Eq. 4 :

$$\Delta u_d = \frac{r_2 - r_1}{r_1} \Delta u \quad (\text{Eq. 4})$$

D'abord, G est proche de 0 pendant la phase d'enroulement du bras de pelage. Ensuite, la courbe augmente brusquement car on sort de la zone préfissurée et l'éprouvette commence à délaminer. Enfin, le plateau correspond la propagation de la fissure.

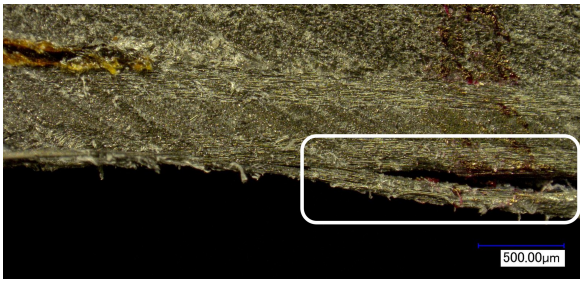


FIG. 4. – *Délamination dans les fibres longues*

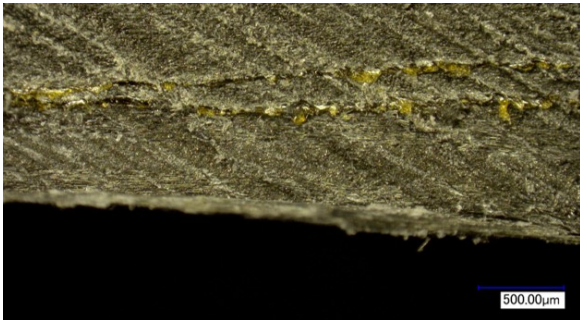


FIG. 5. – *Bifurcation dans la zone non préstressée*

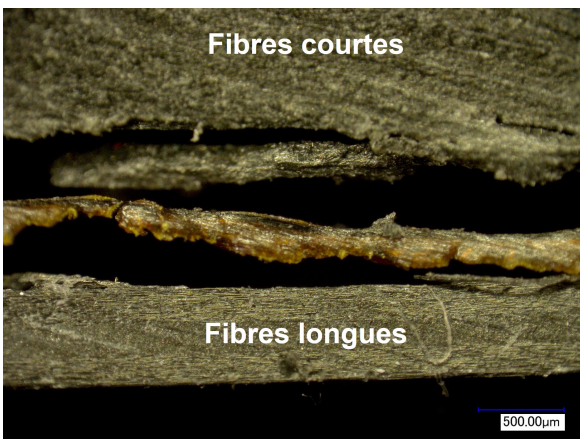


FIG. 6. – *Rupture dans les fibres courtes*

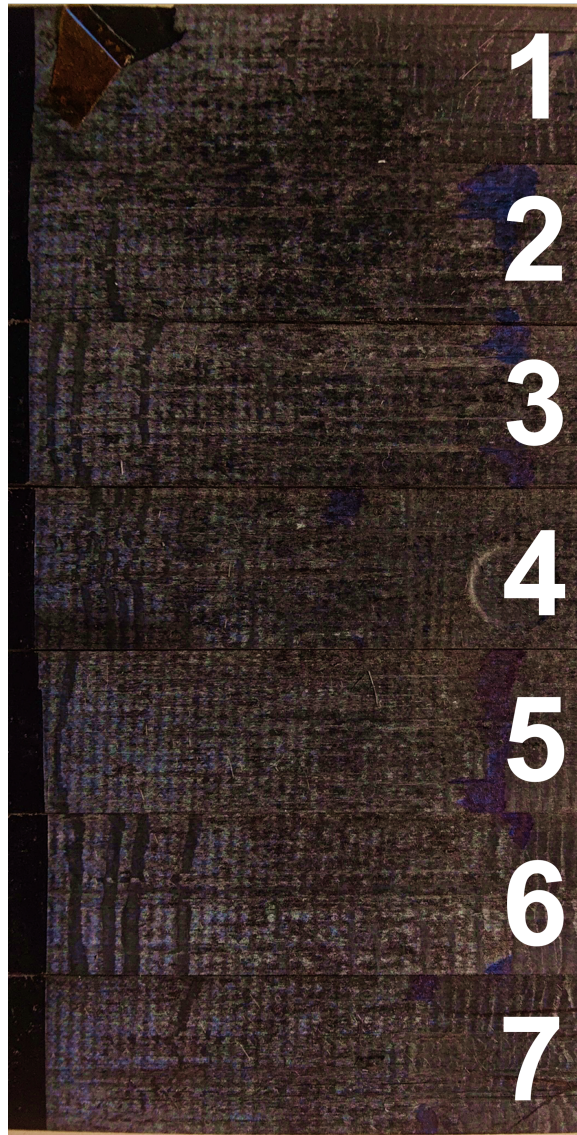


FIG. 7. – *Faciès de rupture sur la partie fibres courtes des sept éprouvettes replacées dans leur position dans la plaque*

On remarque une chute quasi-systématique de G_c pendant la seconde moitié de propagation de la fissure. Lorsqu'on se réfère aux faciès de rupture sur le côté fibres courtes présentés en Fig. 7, on observe une potentielle coïncidence entre les zones de différentes couleurs et le niveau de G_c : les zones plus claires correspondent à des G_c élevés, tandis que les zones foncées correspondent à des G_c faibles. On peut observer une transition douce entre les zones claires et obscures, à l'exception des stick-slips et une zone sombre au début (à gauche) de l'éprouvette 4.

En particulier, le début de la courbe de l'éprouvette 1 montre un premier plateau en plus par rapport aux autres courbes car il s'est avéré que le défaut numéro 2 mentionné dans la partie précédente était dû à un morceau de ruban séparateur présent dans la plaque fabriquée. Il faudrait exclure ce plateau si on a besoin d'obtenir une valeur de G_c définitive par éprouvette. L'éprouvette 4 présente un G_c plus faible et un faciès de rupture plus sombre. Enfin, l'éprouvette 7 ne suit pas la tendance de chute pendant la seconde moitié de la propagation.

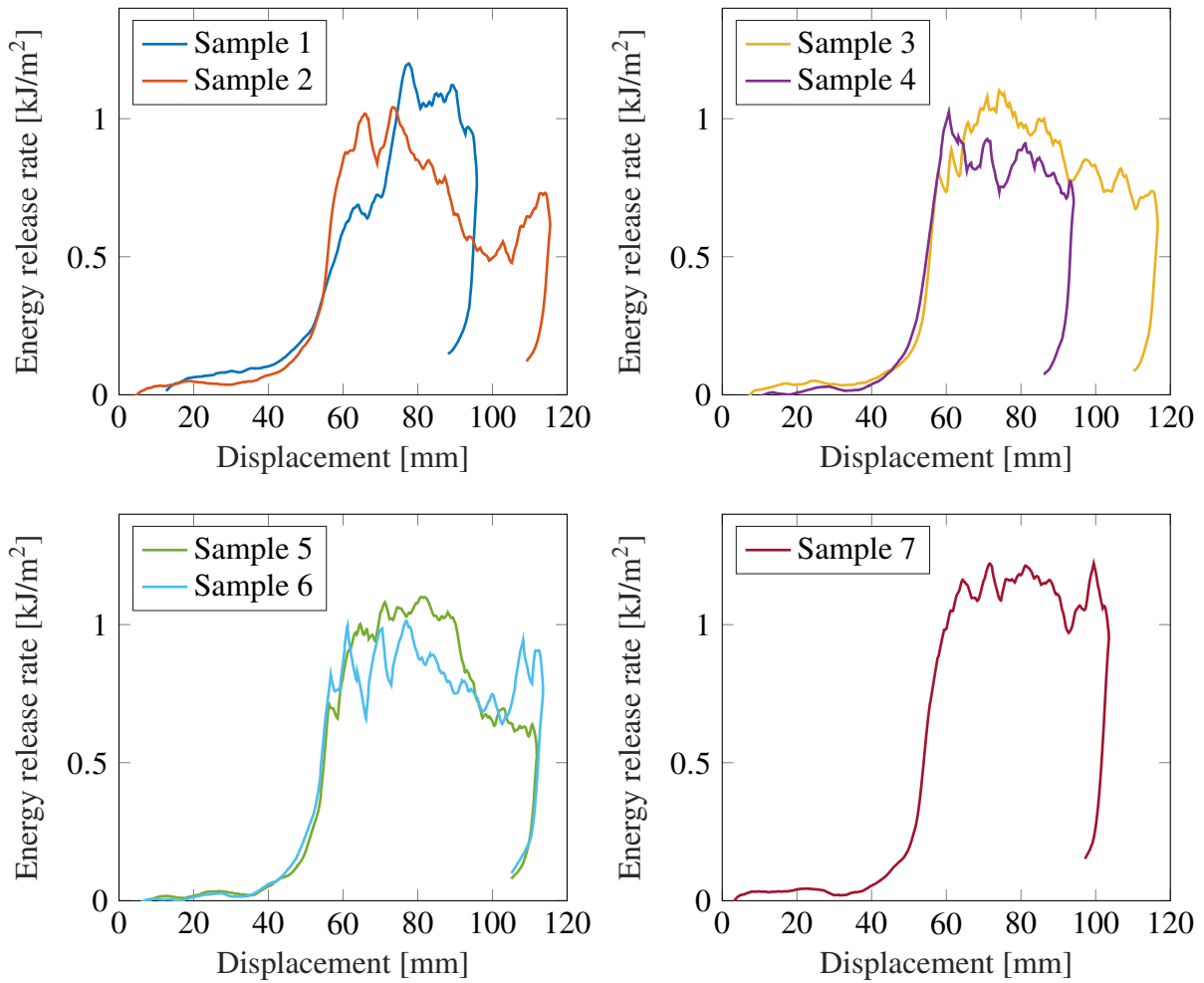


FIG. 8. – Évolution de la moyenne glissante du taux de restitution d'énergie G_I en fonction du déplacement des 7 éprouvettes

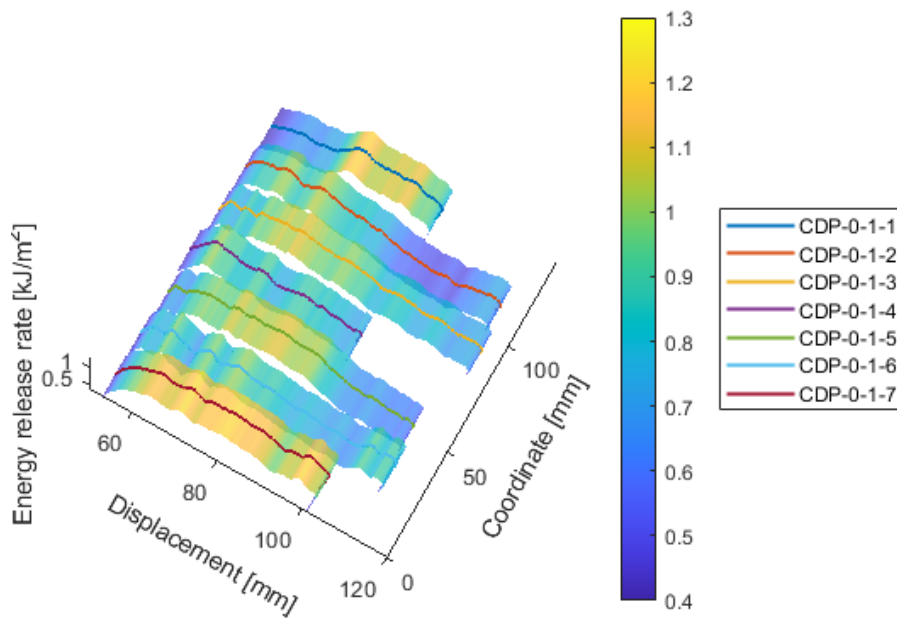


FIG. 9. – Évolution de la moyenne glissante du taux de restitution d'énergie G_I en fonction du déplacement et de la position sur la plaque des 7 éprouvettes

5.1. Observations sous microscopie électronique à balayage (MEB) des faciès de rupture

Les éprouvettes ont été observées sous MEB afin de mieux comprendre les modes de rupture associés aux zones où G_c est différent. Deux exemples de prises de vue regardant vers les fibres courtes/vers le bras non chargé dans l'essai sont présentés en Fig. 10 : l'image de gauche est prise dans une zone où le taux de restitution d'énergie G_c est élevé, contrairement à celle de droite, où G_c est plus faible. On retrouve une grande quantité d'empreintes de fibres longues sur l'image de gauche, associées à une forte déformation plastique de la matrice qui est en blanc. En revanche, l'image de droite montre une omniprésence de fibres courtes noyées dans la matrice qui est moins déformée. En conclusion, nous avons les deux cas suivants :

- Dans les zones avec G_c élevé, la fissure est proche du côté fibres longues et il y a de la dissipation dans la matrice ;
- Dans les zones avec G_c faible, la fissure est proche du côté fibres courtes et il y a peu de dissipation dans la matrice.

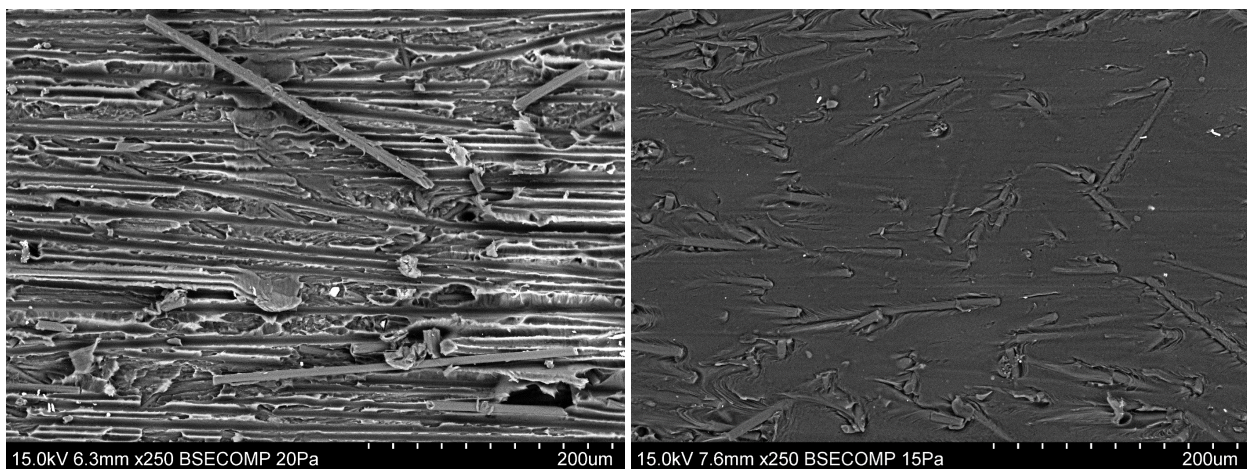


FIG. 10. – Images MEB des faciès de rupture côté fibres courtes : zone avec G_c élevé (à gauche), zone avec G_c faible (à droite)

5.2. Interprétation

Premièrement, l'adaptation de l'essai CDP à la caractérisation de l'interface fibres longues/fibres courtes a permis d'obtenir des valeurs de taux de restitution d'énergie critique de l'ordre du kJ/m^2 , ce qui paraît cohérent avec le matériau composite à matrice thermoplastique objet de l'étude. Cependant, quelques aspects restent à interpréter. D'après la mécanique de la rupture, la fissure est censée dévier vers le côté bras de pelage donc vers la zone à fibres longues. Cependant, on observe le contraire pendant la seconde moitié de la propagation où la fissure se propage dans la zone à fibres courtes proche de l'interface. Une hypothèse pour expliquer pourquoi la fissure passe de l'interface fibres longues - matrice à la zone fibres courtes est que les orientations des fibres courtes changent entre les zones qui sont proches du point d'injection et les zones plus éloignées, ce qui fait que le chemin le plus favorable (le moins énergivore) devient la zone des fibres courtes. Cette hypothèse est actuellement en cours d'investigation. En particulier, une tomographie à rayons X de la partie surmoulée est en cours afin d'obtenir les orientations des fibres courtes à proximité du plan de fissuration.

Un deuxième aspect concerne la représentativité des valeurs de G_c obtenues, étant donné que les éprouvettes planes ont été réalisées avec une longueur d'injection importante, qui ne sera pas forcément reproduite sur d'autres éprouvettes de caractérisation ou futures pièces de production.

En troisième lieu, les éprouvettes ainsi que l'essai étant non symétriques, une composante de mode

Il existe dans l'énergie dissipée pendant la propagation de fissure. Cette composante supplémentaire doit donc être estimée pour identifier proprement les paramètres d'interface.

6. Conclusions et perspectives

Dans ce travail, l'essai CDP utilisé pour les adhésifs a été adapté à notre structure pour caractériser le taux de restitution d'énergie pour la propagation d'une fissure à l'interface entre des zones à fibres longues et fibres courtes. Un deuxième essai, avec une mixité modale différente, est proposé également en adaptant l'essai ENF défini par la norme ASTM à la structure asymétrique. Les essais sont en cours d'exploitation.

Remerciements

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

Références

- [1] NF ISO 15024 :2001 « Détermination de la ténacité à la rupture interlaminaire en mode I, G_{Ic} , de matériaux composites à matrice polymère renforcés de fibres unidirectionnelles », 2002.
- [2] ASTM D7905/D7905M-19 « Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites », 2019.
- [3] ASTM D1781-98 « Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives », 2012.
- [4] F. Daghia, C. Cluzel « The Climbing Drum Peel Test : An alternative to the Double Cantilever Beam for the determination of fracture toughness of monolithic laminates », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 78, pp. 70–82, 2015.