



HAL
open science

Étude de l'influence de la vitesse de chargement sur le comportement de composite thermoplastique soudé par ultrasons

Pauline Bourda, Patrick Rozycki, Mamadou A. Mbacke

► To cite this version:

Pauline Bourda, Patrick Rozycki, Mamadou A. Mbacke. Étude de l'influence de la vitesse de chargement sur le comportement de composite thermoplastique soudé par ultrasons. 25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280076

HAL Id: hal-04280076

<https://hal.science/hal-04280076>

Submitted on 10 Nov 2023

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.

Étude de l'influence de la vitesse de chargement sur le comportement de composite thermoplastique soudé par ultrasons

P. BOURDA^{a,b}, P. ROZYCKI^a, M. A. MBACKÉ^b

a. Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes,
pauline.bourda@ec-nantes.fr, patrick.rozycki@ec-nantes.fr

b. Nantes Université, IRT Jules Verne, F-44000 Nantes, France, mamadou.mbacke@irt-jules-verne.fr

Résumé :

Le soudage est une méthode particulièrement étudiée ces dernières décennies pour assembler des composites thermoplastiques. Cette méthode est rapide, permet de ne pas percer le stratifié et de créer une continuité entre les parties assemblées. Cette étude s'intéresse à l'influence de la vitesse de chargement sur un assemblage de composite thermoplastique soudé, d'un point de vue expérimental et numérique. En effet, les résines thermoplastiques et leurs composites sont en grande partie sensibles à la vitesse de déformation. De plus, ces matériaux pourraient être utilisés pour des pièces de structure qui sont soumises à des chargements dynamiques au cours de leur vie en service (chute d'outil, crash). Ainsi, il est essentiel de déterminer si la vitesse de déformation a une influence sur le comportement de ces structures. Pour cela, des essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes de simple recouvrement pour des vitesses de chargement allant de 1.2 mm/min à 7 m/s. Une augmentation de la tenue mécanique est constatée avec la vitesse de sollicitation. Le comportement de l'interface a été modélisé par la suite en utilisant des éléments cohésifs.

Abstract :

Welding is a method that has been mainly studied in recent decades for joining thermoplastic composites. This method is fast, does not need to drill the laminate and creates continuity between the assembled parts. This study investigates the influence of the loading velocity on a welded thermoplastic composite assembly from an experimental and numerical point of view. A large part of thermoplastic resins and their composites are strain-rate sensitive. In addition, structural parts potentially manufactured from these materials are subject to dynamic loading during their service life (tool drop, crash). Thus, it is essential to determine whether the strain rate influences the behaviour of these structures. Therefore, tensile tests were carried out on single lap specimens for loading velocities ranging from 1.2 mm/min to 7 m/s. Lap shear strength increases with increasing loading velocity. Then, the interface behaviour was modelled using cohesive elements.

Mots clefs : Composites thermoplastiques, soudage ultrason, vitesse de sollicitation, comportement mécanique

1 Introduction

Les composites thermoplastiques présentent un intérêt grandissant pour l'industrie des transports grâce à leurs propriétés mécaniques et leurs procédés de mise en forme. Cet intérêt est accompagné de l'étude de méthodes d'assemblage adaptées à ces matériaux. Parmi ces différentes méthodes, le soudage (ou collage par fusion) apparaît comme un procédé rapide et conférant une grande tenue mécanique au joint assemblé [1]. Les nombreuses études autour de ce procédé permettent de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu et de mieux paramétrer le procédé [2, 3]. Dernièrement, plusieurs auteurs se sont intéressés à l'influence de paramètres environnementaux tels que la température [4] et l'hygrométrie [5] sur le comportement d'éprouvettes soudées. Les résines thermoplastiques étant en grande partie dépendantes de ces paramètres environnementaux, une influence significative a été observée sur la tenue mécanique des joints soudés. Cependant, les résines thermoplastiques peuvent également dépendre de la vitesse de déformation. À la connaissance des auteurs, l'influence de ce paramètre sur le comportement des joints de composites thermoplastiques soudés n'est pas étudiée dans la littérature, malgré son importance dans le domaine des transports. Néanmoins, de multiples études se sont consacrées à l'étude de l'influence de la vitesse de chargement sur le délaminage et sur les assemblages collés, montrant une certaine sensibilité de ces interfaces à la vitesse de sollicitation [6, 7].

L'objectif de ce papier est d'étudier la sensibilité à la vitesse de chargement d'assemblage de composite thermoplastique soudé. Pour cela, une étude expérimentale a été menée sur des éprouvettes de simple recouvrement (SLJ - Single Lap Joint) sollicitées en traction à différentes vitesses. La tenue mécanique a été calculée pour chaque éprouvette afin de comparer les performances du joint soudé pour chaque vitesse testée. Enfin, une étude numérique a été initiée dans le but de modéliser le comportement complet de l'éprouvette : modèle de comportement dépendant de la vitesse de déformation pour le stratifié et éléments cohésifs pour l'interface soudée. Les paramètres de la loi d'interface ont été déterminés pour différentes vitesses.

2 Matériaux et méthodes

Cette étude porte sur un composite polyamide 6-6 renforcé par un sergé 2x2 en fibres de verre (équilibré). Les éprouvettes à assembler ont été découpées dans des plaques de quatre plis : $[45]_4$ et $[0/45]_5$. Un procédé statique de soudage par ultrasons a été utilisé dans cette étude (Figure 1). Des directeurs d'énergie linéaires ont été placés sur un des deux substrats, au niveau de la zone de recouvrement. Ces ajouts de résine pure ont pour objectif d'améliorer la qualité de la soudure en ayant une plus grande quantité de résine entrant en jeu dans le processus d'adhésion, tout en concentrant l'énergie dissipée à l'interface en limitant l'étendue de la zone affectée thermiquement. Le procédé est contrôlé en énergie avec une fréquence de vibration de la sonotrode de 20 kHz et une amplitude de 60 μm . La force de soudure, de maintien et la durée de maintien sont fixées.

La tenue mécanique des joints soudés a été étudiée à l'aide d'essais de traction sur des éprouvettes de simple recouvrement. L'interface est sollicitée en cisaillement et en pelage du fait de la flexion de l'éprouvette au cours de l'essai. Les essais ont été réalisés à température ambiante (+23 °C) et hygrométrie relative nulle (HR0). Pour cela, un processus de désorption a été suivi en plaçant toutes les éprouvettes dans un dessiccateur à 90 °C pendant 17 jours. Les essais ont été conduits au Centre de Ressource en Essais Dynamique à l'école Centrale de Nantes à l'aide d'une machine Instron 5581 en quasi-statique et avec une machine de traction rapide MTS 819 pour les sollicitations de 2 mm/s à 7 m/s. Ils ont été

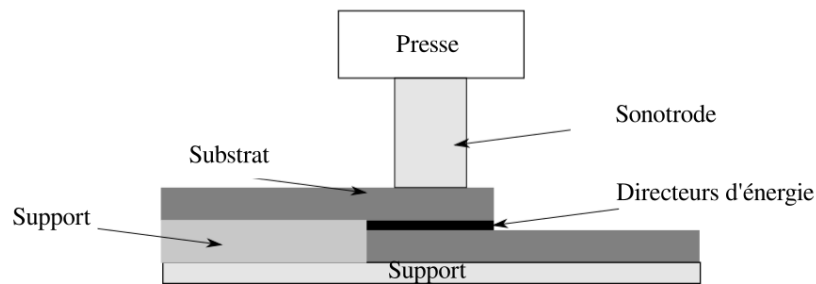


FIGURE 1 – Schéma de principe du procédé de soudage par ultrasons statique

filmés à l'aide d'une caméra haute fréquence afin d'accéder aux champs de déplacement par corrélation d'images. Trois types d'assemblages sont étudiés : $[45]_4/[45]_4$, $[0/45]_S/[0/45]_S$ et $[45]_4/[0/45]_S$. Trois éprouvettes sont testées pour chaque configuration.

Par la suite, les éprouvettes ont été modélisées avec le code de calcul éléments finis Abaqus [8]. Le comportement du stratifié est défini par une routine utilisateur VUMAT développée par Mbacké et Rozycski [9]. Des essais de traction dans le plan du stratifié ont montré que les directions longitudinale et transversale ont un comportement élastique fragile endommageable avec une influence négligeable de la vitesse de déformation. Le comportement en cisaillement est quant à lui défini comme élastoplastique endommageable avec une rigidification lorsque la vitesse de déformation augmente. Des conditions aux limites en déplacement sont appliquées à partir des champs de déplacement extraits des données expérimentales. L'interface soudée est modélisée par des éléments cohésifs dont le comportement est défini par une loi de traction-séparation bilinéaire (Eq. (1)). La mixité des modes est prise en compte par un critère quadratique d'initiation de l'endommagement et un critère de mixité des modes de type Benzeggagh-Kenane pour la propagation de l'endommagement.

$$\sigma = \begin{cases} K\delta & \text{si } \delta \leq \delta_0 \\ (1-d)K\delta & \text{si } \delta_0 \leq \delta \leq \delta_f \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

Avec δ_0 la séparation à l'initiation de la rupture, δ_f la séparation à rupture, K la raideur pour le mode considéré et d l'endommagement.

3 Résultats et discussion

3.1 Partie expérimentale

Plusieurs types de rupture ont été observés lors de la campagne expérimentale : cohésive et mixte (cohésive + adhésive). Une rupture cohésive correspond à la rupture de l'interface soudée telle que présentée par la Figure 2a)). Ce type de rupture conduit à la meilleure tenue mécanique observée dans cette étude, car elle est caractéristique d'un bon niveau d'adhésion. Concernant le mode de rupture mixte, il est composé de deux zones, une première cohésive et une seconde adhésive (Figure 2b)). Cette seconde zone est causée par un faible niveau d'adhésion atteint lors du procédé de soudage, ainsi il y a un décollement entre les directeurs d'énergie et le stratifié.

La tenue mécanique de cisaillement (LSS - Lap Shear Strength) est calculée selon l'équation 2 pour chaque éprouvette afin de s'affranchir de la variation de surface soudée. Les valeurs sont moyennées pour



FIGURE 2 – Exemple de (a) rupture cohésive et de (b) rupture mixte cohésive + adhésive

chaque configuration et vitesse de chargement dans le but de comparer les performances mécaniques.

$$LSS = \frac{F_{max}}{S_{soudée}} \quad (2)$$

Avec $S_{soudée}$ la surface soudée pour l'éprouvette considérée et F_{max} la force maximale supportée par l'éprouvette lors de l'essai.

Les résultats présentés en Figure 3 montrent une augmentation de la LSS lorsque la vitesse de chargement augmente. Par ailleurs, la tenue mécanique est plus importante pour les assemblages de substrats les plus rigides. Ainsi, les éprouvettes soudées considérées dans cette étude sont sensibles à la vitesse de sollicitation. Ce phénomène est causé par la sensibilité de la résine, présente dans l'interface et le stratifié, à la vitesse de déformation dans ces conditions de température et d'hygrométrie.

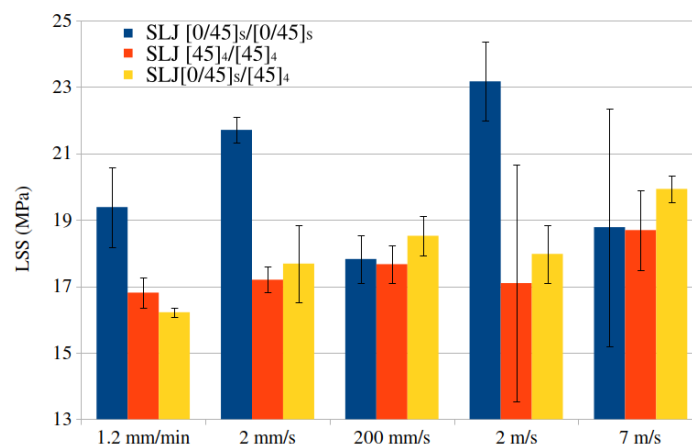


FIGURE 3 – LSS en fonction de la vitesse de sollicitation pour les trois orientations testées

Les chutes de LSS observées à 200 mm/s et 7 m/s pour [0/45]_s/[0/45]_s sont causées par une variabilité du procédé de soudage contrôlé en énergie. En effet, un temps de soudage plus faible est observé pour les éprouvettes concernées ; cela est associé à une distance de soudage et de maintien plus grande (c'est-à-dire la distance d'enfoncement de la sonotrode dans l'éprouvette lors de la phase de soudage et de maintien). Ainsi, cela a pu réduire le niveau d'adhésion dans l'interface et augmenter la quantité de résine qui s'est écoulée en dehors de l'interface. La quantité de résine à l'interface étant plus faible de même que le temps de diffusion de macromolécules à l'interface, ainsi la qualité de l'interface est réduite. Il en est de même pour la forte dispersion pour les essais à 2 m/s [45]₄/[45]₄, avec une éprouvette

soudée pendant un temps supérieur à la moyenne et inversement pour les deux autres éprouvettes.

3.2 Partie numérique

Les paramètres de la loi d'interface ont été déterminés pour les simples recouvrements $[45]_4/[45]_4$ et $[0/45]_S/[0/45]_S$ en quasi-statique puis pour une vitesse de 2 m/s et 7 m/s respectivement. Les raideurs de l'interface en ouverture et en cisaillement sont définies à partir des propriétés de la résine ($K_{I,e} = E = 3.9$ GPa et $K_{II,e} = G = 1$ GPa [10], avec e l'épaisseur de l'interface)

Pour les simples recouvrements $[45]_4/[45]_4$, les paramètres d'interface déterminés en quasi-statique permettent également de décrire correctement le comportement de l'éprouvette soudée à 7 m/s (Figure 4a)). La prise en compte de la sensibilité à la vitesse de déformation du substrat est suffisante pour décrire le comportement de cette configuration. Cependant, pour les simples recouvrements $[0/45]_S/[0/45]_S$, les énergies de rupture (G_{IC} et G_{IIC}) augmentent entre l'essai quasi-statique et l'essai à 2 m/s. En effet, l'utilisation des paramètres déterminés pour la quasi-statique ne permettent pas d'atteindre les tenues mécaniques obtenues expérimentalement en dynamique (Figure 4b)). Enfin, les écarts relatifs sont inférieurs à 3% entre les LSS expérimentaux et numériques, en utilisant les premiers jeux de paramètres déterminés pour les interfaces $[0/45]_S/[0/45]_S$ et $[45]_4/[45]_4$, en quasi-statique et en dynamique. Ici les paramètres ont été déterminés pour chaque vitesse indépendamment avec une loi de traction-séparation indépendante de la vitesse de chargement. Dans un second temps, l'influence de cette vitesse devra être prise en compte directement dans le modèle via l'implémentation d'une loi de traction-séparation dépendante de la vitesse de déformation dans Abaqus (routine utilisateur type VUMAT). Cette loi sera basée sur les travaux de May et Lässig [7] et de Marzi et al. [11] appliqués au délaminage et aux assemblages collés.

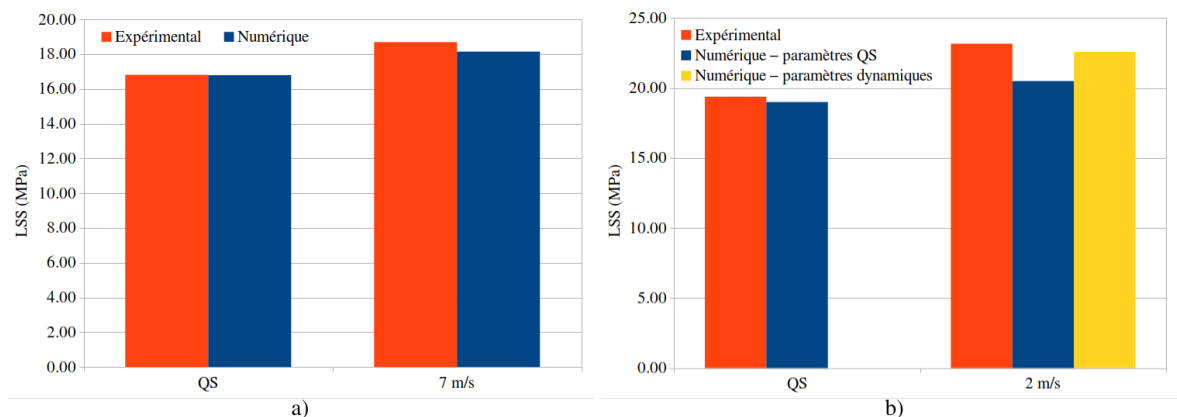


FIGURE 4 – Comparaison des tenues mécaniques expérimentales et numériques pour les simples recouvrements a) $[45]_4/[45]_4$ et b) $[0/45]_S/[0/45]_S$

4 Conclusion

Cette étude a permis de montrer que la tenue mécanique de l'assemblage de PA66/GF soudé est sensible à la vitesse de déformation, d'un point de vue expérimental. Quelle que soit la configuration, la LSS augmente avec la vitesse de sollicitation. De plus, l'augmentation est plus importante pour les substrats qui sont plus rigides. Par ailleurs, le type de rupture est similaire pour toutes les vitesses de chargement testées dans cette étude.

Les premières simulations numériques ont montré que la sensibilité du joint soudé nécessite une adaptation des paramètres d'interface selon la vitesse pour les assemblages $[0/45]_S/[0/45]_S$. Néanmoins, l'influence de la vitesse de déformation sur le substrat semble être suffisante pour décrire le comportement des assemblages soudés $[45]_4/[45]_4$. L'influence de la vitesse de chargement sur le comportement de l'interface $[0/45]_S/[0/45]_S$ sera par la suite prise en compte via une routine utilisateur implémentée dans Abaqus. Cette routine se basera sur les travaux de May et al. [7] et Marzi et al. [11] en faisant évoluer l'énergie de rupture en fonction de la vitesse de déformation dans l'interface.

5 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'IRT Jules Verne pour le financement de ces travaux de recherche à travers le programme de thèses PERFORM.

Références

- [1] Ageorges, C., Ye, L., & Hou, M. (2001). Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites : a review. *Composites Part A : applied science and manufacturing*, 32(6), 839-857.
- [2] Villegas, I. F. (2019). Ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Frontiers in Materials*, 6, 291.
- [3] Levy, A., Le Corre, S., & Villegas, I. F. (2014). Modeling of the heating phenomena in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(7), 1361-1371.
- [4] Koutras, N., Villegas, I. F., & Benedictus, R. (2018). Influence of temperature on the strength of resistance welded glass fibre reinforced PPS joints. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 105, 57-67.
- [5] Rohart, V., Lebel, L. L., & Dube, M. (2020). Effects of environmental conditions on the lap shear strength of resistance-welded carbon fibre/thermoplastic composite joints. *Composites Part B : Engineering*, 198, 108239.
- [6] J. J. M. Machado, E. A. S. Marques & Lucas F. M. da Silva (2018) Adhesives and adhesive joints under impact loadings : An overview, *The Journal of Adhesion*, 94 :6, 421-452, DOI : 10.1080/00218464.2017.1282349
- [7] May, M., & Lässig, T. (2017). Rate-dependent mode I delamination in ballistic composites—Experiment and simulation. *Composite Structures*, 180, 596-605.
- [8] ABAQUS/Standard User's Manual, Version 2019. Providence, RI : Dassault Systèmes Simulia Corp, 2019.
- [9] Mbacké, M. A., & Rozycki, P. (2018, June). Non-linear constitutive law for a glass-pa66 fabric composite dedicated to numerical simulations in crash studies. In *ECCM18-18th European conference on composite materials* (pp. 24-28).
- [10] Pivdiablyk, I. (2019). Durability of mechanical performance of prestressed bolted composite joints in a hygro-thermo-mechanical environment (Doctoral dissertation, École centrale de Nantes).

- [11] Marzi, S., Hesebeck, O., Brede, M., & Kleiner, F. (2009). A rate-dependent cohesive zone model for adhesively bonded joints loaded in mode I. *Journal of adhesion science and technology*, 23(6), 881-898.