

# COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES JOINTS COLLÉS SOUS SOLLICITATIONS DE CISAILLEMENT

J. Bertrand <sup>a</sup>, J. Jumel <sup>a</sup>, J. Renart <sup>b</sup>, J. B. Kopp <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Université de Bordeaux, CNRS UMR 5295, I2M, Bordeaux \*justine.bertrand@u-bordeaux.fr ; <sup>b</sup>AMADE research group, Gérone, Espagne ; <sup>c</sup> Arts et Métiers ParisTech, CNRS UMR 5295, I2M, Bordeaux ;

**Mots-clés :** Joints collés, cisaillement, mécanique de la rupture, fissuration, campagne expérimentale.

## Résumé

*L'utilisation des joints collés est de plus en plus populaire. Cette méthode d'assemblage est efficace notamment pour des joints sollicités en cisaillement (mode II). Or dans bien des études, le dimensionnement est réalisé à partir de données issues d'essais de fissuration sous clivage ou pelage (mode I) [3, 6]. Les travaux présentés ici ont pour but de développer une méthode pour l'analyse du processus de fissuration (amorçage et propagation) des joints collés en mode II. L'étude porte sur un adhésif bi-composant à base de polyméthacrylate de méthyl (SAF 30 MIB de Bostik) qui polymérise à température ambiante. Ce matériau est caractérisé grâce à des essais "Arcan" en configuration cisaillement sous sollicitation quasi-statique et de fluage à différentes températures. L'état de contrainte uniforme observé permet d'accéder aux données élasto-visco-plastique et à rupture de l'adhésif [1]. L'adhésif utilisé est très sensible à la température et présente une déformation en cisaillement à rupture élevée. Ces données servent ensuite dans l'analyse des essais "Inversed End Loaded Split" (I-ELS) qui permettent d'assurer une propagation de fissure stable [9]. L'utilisation de la corrélation d'image digitale et de jauges de déformation permet de suivre le champ de déformation. L'analyse montre qu'il est possible de mettre en évidence le comportement mécanique de joints collés et de suivre l'amorçage et la propagation de fissure sous sollicitation de cisaillement à partir de données macroscopiques.*

## 1 Introduction

Il y a plusieurs avantages à utiliser la méthode d'assemblage par collage par rapport aux méthodes traditionnelles (rivetage, soudage, ...). Notons, par exemple, la réduction de poids tout en ayant une redistribution des contraintes performantes entre les deux substrats. Concevoir robustement ce type d'assemblage requiert d'être en mesure de prédire leur rupture sous différents types de sollicitations : pelage (mode I), cisaillement dans le plan (mode II), cisaillement hors-plan (mode III). Notre étude porte sur le comportement en cisaillement de ces assemblages car ils montrent une bonne efficacité sous ce type de sollicitation [8].

Il existe plusieurs types d'essais pour caractériser une interface en cisaillement. Si l'on s'intéresse à l'adhésif seul, les essais Arcan permettent d'obtenir un état de contrainte uniforme au sein du joint de colle et ainsi obtenir des propriétés propres au matériau [1, 2]. Or pour prédire la rupture de l'assemblage collé, il faut être en mesure de suivre la propagation de fissure dans le joint de colle. Dans le cas des essais de fissuration en mode II pure de type End-Notched-Flexure (ENF, flexion 3 points), End Loaded Split (ELS, flexion pure) ou Inverse-End Loaded Split (I-ELS, flexion pure) [7, 4], la variation du moment de flexion local permet de créer un gradient de contrainte au sein du joint de colle, déclencheur de fissure [9].

Les essais ENF et ELS ont pour principal désavantage une propagation de fissure instable si des conditions géométriques sévères concernant la longueur du joint de colle ne sont pas respectées [5]. La même géométrie d'éprouvette est utilisée pour les 3 essais présentés ci-avant. L'instabilité de la propagation de fissure dans le cas des essais ENS et ELS provient du fait que le moment de flexion local augmente lors de la propagation de fissure. Dans le cas de l'essai I-ELS, la fissure se propage vers le point d'application de la charge, provoquant un moment de flexion local décroissant lors de la propagation de fissure qui reste stable sans restriction sur la longueur du joint de colle [9].

Grâce à la corrélation d'image, le comportement mécanique de l'assemblage collé est étudié en identifiant les déplacements transverses et normaux et les rotations au sein du joint de colle. La zone de propagation de fissure est, elle aussi, identifiée. Dans cette zone, le matériau est endommagé mais encore capable de transférer des contraintes, la fissure ne peut s'amorcer qu'une fois la taille maximale de cette zone atteinte (énergie de rupture totalement dissipée) [10]. Le développement de cette zone dépend du matériau, de la géométrie de

l'assemblage et du mode de sollicitation. Utiliser la théorie de Griffith ou la méthode des intégrales  $J$  avec les données locales issues de la corrélation d'image permet de suivre la propagation de fissure sans suivre sa longueur en temps réel. L'objectif est d'aboutir à des modèles analytiques et numériques permettant de prédire le comportement à rupture des assemblages collés.

Dans cette étude, l'essai I-ELS est exposé plus en détail. Le dépouillement analytique pour exploiter les déplacements et les rotations obtenus par corrélation d'image au sein du joint de colle est décrit. Les résultats expérimentaux d'essais I-ELS sous sollicitations quasi-statiques sont présentés.

## 2 Matériaux et méthode

### 2.1 Propriétés mécaniques des matériaux

Les éprouvettes de fissuration sont composées de substrats en alliage Aluminium-Zinc 7075 et d'une colle à base de Polyméthacrylate de Méthyl (PMMA, SAF 30 MIB, Bostik, France). Les propriétés mécaniques des substrats sont présentées dans le Tableau 1. Les propriétés mécaniques de la colle sont issues d'une campagne d'essais de type Arcan en configuration cisaillement (Tableau 1). La Figure 1 montre les résultats expérimentaux de cette campagne. La déformation à rupture en cisaillement de cette colle (128.4 %) est très importante ainsi que son module de cisaillement ( $G_a = 62 \text{ MPa}$ ).

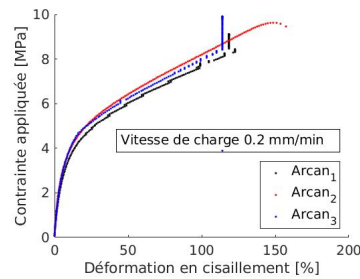


FIGURE 1 – Contrainte en fonction de la déformation sous cisaillement quasi-statique pour la colle SAF MIB 30

TABLEAU 1 – Propriétés mécaniques des matériaux

Matériau	Propriété	Valeur
Aluminium 7075	$R_e$ (Résistance élastique)	470 MPa
	$E$ (Module d'Young)	72000 MPa
	$\nu$ (Coefficient de poisson)	0,3
SAF 30 MIB	$R_{ea}$ (Résistance élastique)	5,1 MPa
	$\gamma_{ea}$ (Déformation élastique)	6,28 %
	$R_{ma}$ (Résistance mécanique)	8,85 MPa
	$\gamma_{ma}$ (Déformation à rupture)	128,4 %
	$G_a$ (Module de cisaillement)	62 MPa

### 2.2 Montage

La géométrie de l'essai I-ELS est présentée à la Figure 2 et les valeurs des paramètres géométriques sont répertoriées dans le Tableau 2. Les substrats ont une épaisseur  $t$  et une largeur  $w$ . La colle a une épaisseur  $t_a$ . La longueur du joint de colle est  $l_c$ . Le paramètre  $a$  désigne la longueur de fissure initiale. Les éprouvettes sont fabriquées en laboratoire. L'épaisseur d'adhésif est assurée constante à l'aide d'inserts en téflon superposés. L'adhésif sèche à température ambiante.

Dans le cas de l'essai I-ELS, la partie "décollée" est maintenue tandis qu'une charge transverse est appliquée au bout de la partie collée. L'éprouvette est maintenue dans des rouleaux afin de permettre un déplacement horizontal. La force est appliquée à une distance  $L$  du dernier rouleau d'appui.

Une machine Zwick de traction/compression avec une cellule de charge de 10 kN est utilisée. En plus des informations issues de la machine, deux appareils photos (un pour une vue locale, un pour une vue macroscopique) sont utilisés afin de procéder à une analyse par corrélation d'image avec le logiciel VIC 2D (décrite dans la section 2.3). Pour obtenir une bonne qualité d'image et éviter de chauffer l'éprouvette, une lampe à LED est utilisée pour chaque appareil photo. Un mouchetis noir sur blanc est appliqué aléatoirement grâce à des bombes de peinture sur l'éprouvette pour créer le contraste nécessaire à l'analyse par corrélation d'image.

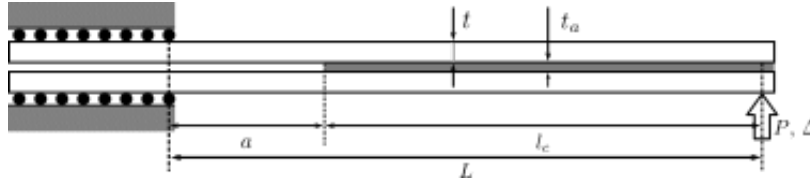


FIGURE 2 – Géométrie de l'éprouvette pour essai I-ELS

TABLEAU 2 – Données géométriques de l'éprouvette

Paramètre géométrique	$t_a$ [mm]	$l_c$ [mm]	$a$ [mm]	$L$ [mm]	$t$ [mm]	$w$ [mm]
Dimension	0.38	138	2	140	5	25

### 2.3 Dépouillement analytique

Pour chaque image prise, la zone d'intérêt lors de l'analyse par corrélation d'image est composée du joint de colle ainsi que des deux substrats. Elle est divisée en sections composées des centres de facette. Les déplacements transverses et normaux associés à chaque centre de facette ainsi que leurs coordonnées initiales dans le repère initial (repère image) sont extraits.  $X_k^0$  et  $Y_k^0$  sont les coordonnées dans le repère initial des centres de facette de la section  $k$  initialement.  $X_k^i$  et  $Y_k^i$  sont les coordonnées dans le repère initial des centres de facette de la section  $k$  au temps  $i$ .  $u_k^i$  et  $v_k^i$  désignent les déplacements transverses et normaux dans le repère initial associés à chaque centre de facette de la section  $k$  au temps  $i$ . Les indices  $s$  et  $i$  permettent de différencier les substrats supérieur et inférieur respectivement. L'indice  $g$  désigne le centre de gravité.

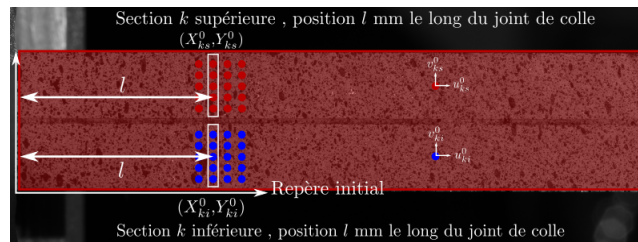


FIGURE 3 – Description de la zone d'intérêt lors de l'analyse par corrélation d'image

#### 2.3.1 Évolution de la flèche des sections droites des substrats

L'image et l'éprouvette sont supposées droites l'une par rapport à l'autre. Les déplacements verticaux obtenus lors de l'analyse par corrélation d'image sont utilisés. La flèche correspond au déplacement vertical du centre de gravité de chaque section. On a :

$$f_k^i = Y_{g_k}^i - Y_{g_k}^0 = v_{g_k}^i \tag{1}$$

Où  $f_k^i$  est la flèche du centre de gravité de la section  $k$  au temps  $i$ .

### 2.3.2 Évolution de l'angle de rotation des sections droites des substrats

L'image et l'éprouvette sont supposées droites l'une par rapport à l'autre. L'angle de rotation de la section par rapport à la verticale est calculé. On a :

$$X_k^i = \tan(\varphi_k^i) * Y_k^i + \delta_k^i \quad (2)$$

Où  $\varphi_k^i$  est l'angle de rotation de la section  $k$  au temps  $i$ .  $\delta_k^i$  est l'ordonnée à l'origine de la droite définie par la ligne passant par les points de la section  $k$  au temps  $i$ . La norme est minimisée par les moindres carrés pour prendre en compte les incertitudes de mesures issues de la corrélation d'image. La résolution du système matriciel (3)) permet d'obtenir l'angle de rotation de chaque section droite à chaque instant :

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \frac{Y_k^i * X_k^i}{\sigma_k^{i2}} \\ \sum_{k=1}^N \frac{X_k^i}{\sigma_k^{i2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_{k=1}^N \frac{Y_k^i}{\sigma_k^{i2}} & \sum_{k=1}^N \frac{Y_k^i}{\sigma_k^{i2}} \\ \sum_{k=1}^N \frac{Y_k^i}{\sigma_k^{i2}} & \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_k^{i2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tan(\varphi_k^i) \\ \delta_k^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

On obtient aussi les déplacements des centres de gravité  $ug$  et  $vg$  dans le repère de l'éprouvette (tourné d'un angle  $\varphi$  par rapport au repère initial) pour chaque centre de gravité de chaque section à tout instant.

### 2.3.3 Evolution du cisaillement de l'interface

Le déplacement transversal entre les deux substrats à l'interface au niveau de chaque section droite est déterminé en projetant le centre de gravité de chaque section sur l'arête du substrat qui est à la limite de l'interface. Les déplacements  $ug_k^i$  et  $vg_k^i$  du centre de gravité ainsi que l'angle de rotation  $\varphi_k^i$  de chaque section droite  $k$  sont pris en compte. On a :

$$\begin{bmatrix} Xps_k^i - Xgs_k^i \\ Yps_k^i - Ygs_k^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s^i) & -\sin(\varphi_s^i) \\ \sin(\varphi_s^i) & \cos(\varphi_s^i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ d \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} Xpi_k^i - Xgi_k^i \\ Ypi_k^i - Ygi_k^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s^i) & -\sin(\varphi_s^i) \\ \sin(\varphi_s^i) & \cos(\varphi_s^i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -d \end{bmatrix} \quad (5)$$

Où  $Xp_k^i, Yp_k^i$  sont les coordonnées du centre de gravité projeté sur l'arête du substrat. Le vecteur entre les deux points projetés sur chaque arête des substrats qui limitent l'interface est projeté le long de l'interface. L'angle de rotation  $\varphi_m$  de l'interface dans le repère initial est la moyenne des angles de rotation des sections droites de chaque substrat (supérieur et inférieur).

$$\varphi_{mk}^i = \frac{\varphi_s^i + \varphi_i^i}{2} \quad (6)$$

La projection sur la ligne de joint de colle du vecteur reliant les points projetés se traduit par :

$$\begin{bmatrix} \Delta_u \\ \Delta_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{mk}^i) & \sin(\varphi_{mk}^i) \\ -\sin(\varphi_{mk}^i) & \cos(\varphi_{mk}^i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xpi_k^i - Xps_k^i \\ Ypi_k^i - Yps_k^i \end{bmatrix} \quad (7)$$

Où  $\Delta_u$  et  $\Delta_v$  sont les déplacements relatifs transverse et normal respectivement. On en déduit la déformation en cisaillement  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{\Delta_u}{t_a} \quad (8)$$

## 3 Résultats

Trois essais I-ELS sous sollicitation quasi-statique ont été réalisés sur une même éprouvette dont la géométrie est décrite à la section 2.2. Trois niveaux d'efforts ont été appliqués : 600 N, 900 N, 1000 N. La charge et la décharge sont analysées. Ces trois niveaux de chargement ont été déterminés lors de calculs préliminaires décrivant l'effort minimum à appliquer pour provoquer l'amorçage de la fissure et l'effort maximum pour éviter la plastification des substrats. En s'appuyant sur la théorie développée par Jumel *et al.* [9] l'essai a été simulé.

La Figure 4 présente l'évolution de la charge appliquée en fonction de la déflexion en bout d'éprouvette. La Figure 4a) décrit l'évolution observée expérimentalement pour les trois niveaux d'effort. La Figure 4b) décrit l'évolution simulée ainsi que l'évolution expérimentale observée jusqu'à 1000 N. L'évolution simulée est composée de 3 parties : la première est la zone dans laquelle la process zone se développe, la troisième est la zone dans laquelle la fissure s'amorce et se propage (quand la process zone est totalement développée). Sur la figure 4a) la courbe décrivant l'évolution de la déflexion pour un effort appliqué de 1000 N présente un comportement linéaire puis au niveau de 900 N une légère baisse de la complaisance. Cela peut s'expliquer par le fait que les substrats plastifient à un tel niveau de chargement. Mais cela peut aussi témoigner d'une amorce de fissuration et d'un régime de propagation stable (pas de saut observé). Cette dernière affirmation est confirmée par la figure 4b) où d'après la simulation on observe aussi une baisse de la complaisance et l'entrée dans la zone de propagation au même niveau d'effort. On ne peut quantifier l'effet de la plastification des substrats et de l'amorçage de fissure sur la courbe force-déflexion.

La Figure 5 montre l'évolution de la flèche le long des substrats supérieur et inférieur ainsi que l'évolution des rotations des sections des substrats supérieur et inférieur aux trois niveaux d'effort maximum. Les évolutions sont similaires pour chacun des deux substrats au cours de l'essai comme prévu par la simulation. On remarque aussi qu'il n'y a pas de changements significatifs dans l'évolution de ses deux grandeurs pouvant apporter des informations complémentaires sur le comportement durant la fissuration de ce type d'adhésif.

La Figure 6 montre l'évolution du cisaillement dans le joint de colle le long de celui ci aux trois niveaux d'effort maximum. La ligne horizontale correspond à la déformation à rupture de l'adhésif. Pour le niveau d'effort le plus élevé, le cisaillement dans l'adhésif dépasse la limite à rupture décrivant un amorçage de fissure.

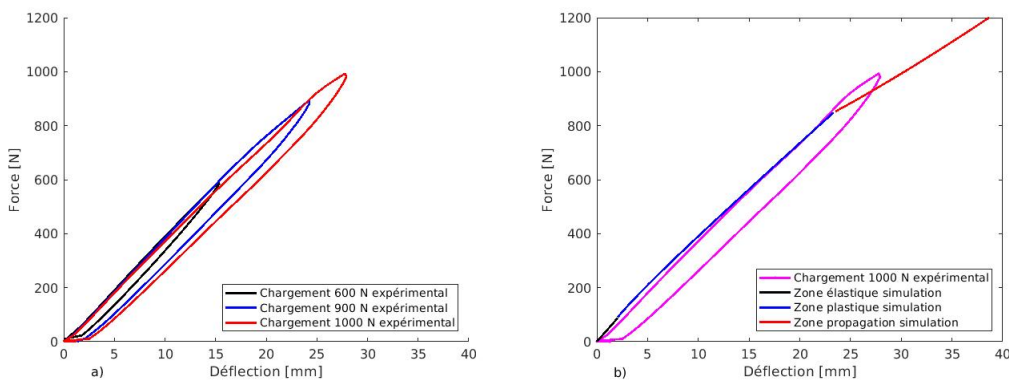


FIGURE 4 – Évolution de la charge appliquée en fonction de la déflexion en bout d'éprouvette - Essai I-ELS

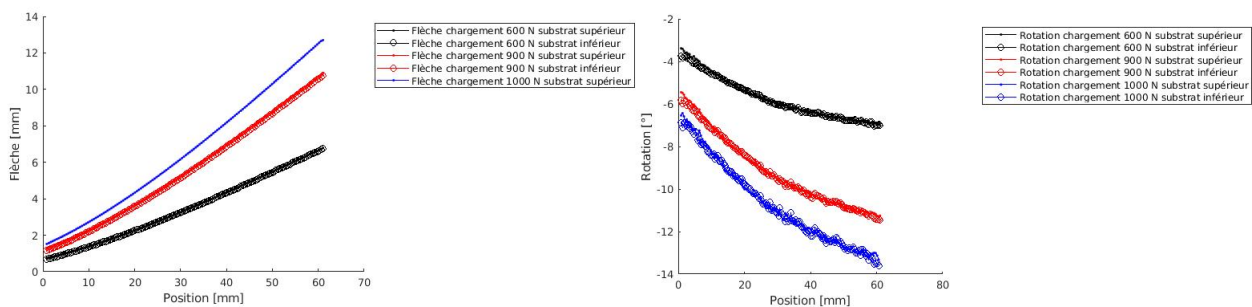


FIGURE 5 – Évolution des flèches et des rotations le long des substrats - Essai I-ELS

### 4 Conclusion

Un essai de fissuration en cisaillement pure a été mis en place et la méthode analytique associée a été développée. Les résultats sous sollicitations quasi-statiques montrent qu'il est possible de provoquer l'amorçage

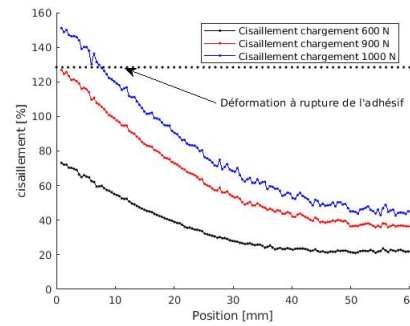


FIGURE 6 – Évolution des flèches et des rotations le long des substrats - Essai I-ELS

de fissure dans un adhésif à base de PMMA et que la simulation analytique correspond à l'expérimental. D'autres essais seront conduits pour observer la propagation de fissure. D'autres adhésifs seront testés ainsi que d'autres sollicitations telles que le fluage et d'autres environnements d'essai. De même, l'analyse est à approfondir : approche énergétique, utiliser d'autres lois de comportement de l'adhésif en prenant en compte le caractère élasto-visco-plastique de l'adhésif.

## Références

- [1] M. Arcan, Z. Hashin, and A. Voloshin. A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials. *Experimental Mechanics*, 18(4) :141–146, April 1978.
- [2] P. Bidaud, R. Créac'hacdec, D. Thévenet, J.-Y. Cognard, and P. Jousset. A prediction method of the behavior of adhesively bonded structures under cyclic shear loading based on a characterization of the viscous aspects of the adhesive in an assembly. *The Journal of Adhesion*, 91(9) :701–724, 2015.
- [3] B. R. K. Blackman, A. J. Kinloch, and M. Paraschi. The determination of the mode II adhesive fracture resistance, GIIC, of structural adhesive joints : an effective crack length approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 72(6) :877–897, April 2005.
- [4] M.K. Budzik, J. Jumel, N. Ben Salem, and M.E.R. Shanahan. Instrumented end notched flexure – crack propagation and process zone monitoring part ii : Data reduction and experimental. *International Journal of Solids and Structures*, 50(2) :310 – 319, 2013.
- [5] L.A. Carlsson, JR J.W. Gillespie, and R.B. Pipes. On the analysis and design of the end notched flexure (enf) specimen for mode ii testing. *Journal of Composite Materials*, 20(6) :594–604, 1986.
- [6] P. Davies, B. R. K. Blackman, and A. J. Brunner. Standard Test Methods for Delamination Resistance of Composite Materials : Current Status. *Applied Composite Materials*, 5(6) :345–364, November 1998.
- [7] M. F. S. F. de Moura, R. D. S. G. Campilho, and J. P. M. Gonçalves. Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. *International Journal of Solids and Structures*, 46(6) :1589–1595, March 2009.
- [8] Kuczmaszewski J. *Fundamentals of Metal-Metal Adhesive Joint Design*. Lublin University of Technology, Polish Academy of Sciences, 2006, 2006.
- [9] J. Jumel and M. K. Budzik. Inverse end-loaded-split test analysis effect of small scale yielding. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 96 :775–789, August 2018.
- [10] M. Pérez-Galmés, J. Renart, C. Sarrado, A. Rodríguez-Bellido, and J. Costa. A data reduction method based on the j-integral to obtain the interlaminar fracture toughness in a mode ii end-loaded split (els) test. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 90 :670 – 677, 2016.