

# Développement d'outils prédictifs de la tenue en fatigue de structures collées

**D. Thévenet<sup>a</sup>, P. Bidaud<sup>a</sup>, R. Créac'hadec<sup>a</sup>, N. Carrere<sup>b</sup>**

a. IRDL, CNRS FRE 3744, ENSTA Bretagne, 29200 Brest, France, [david.thevenet@ensta-bretagne.fr](mailto:david.thevenet@ensta-bretagne.fr)

b. Safran Tech, 91760 Itteville, France, [nicolas.carrere@safrangroup.com](mailto:nicolas.carrere@safrangroup.com)

## Résumé

*La méthodologie proposée pour évaluer les capacités d'une structure collée à endurer des chargements cycliques se base sur deux points clés : la caractérisation « fine » du comportement mécanique du joint de colle dans un assemblage et la définition d'un critère pertinent d'amorçage de fissure de fatigue. Une première étape permettra de caractériser le comportement à long terme du joint polymère, en s'appuyant sur des essais « rapides » effectués avec un montage Arcan modifié. Une seconde étape aura pour but la définition d'une « process zone » basée sur l'utilisation d'un critère couplé (contrainte/énergie). Finalement, la dernière étape consistera à appliquer un critère de ruine par fatigue à cette process zone pour estimer les durées de vie en fatigue de structures collées.*

**Mots clés :** assemblages collés ; fatigue ; prédiction ; expérimental ; caractérisation

## 1. Introduction

L'une des principales exigences pour l'utilisation d'un adhésif est son aptitude à supporter des efforts, appliqués de manière répétée, tout au long de sa vie en service. On dénombre toutefois peu d'études sur le comportement en fatigue des assemblages collés. De plus, elles concernent en majeure partie la propagation de fissures [1] et non leur amorçage. Enfin, le comportement en fatigue d'assemblages collés est généralement caractérisé à l'aide d'essais simple-recouvrement [2] associés à des états de contraintes présentant de fortes concentrations. L'objectif de ce travail est de développer un outil prédictif du comportement en fatigue d'assemblages collés en s'appuyant sur une caractérisation de l'adhésif à partir d'essais de type Arcan modifié.

## 2. Description de la méthode proposée

Une structure collée est un assemblage de matériaux aux propriétés mécaniques différentes. La modélisation du comportement mécanique de tels assemblages fait généralement apparaître des zones à forts gradients de contraintes. Pour proposer une méthode de prévision de la durée de vie en fatigue applicable aux assemblages collés, il est tout d'abord nécessaire de définir les zones « critiques » de l'assemblage où se développent les mécanismes de ruine. La stratégie de calcul de la durée de vie en fatigue, présentée dans ce document, s'appuie alors sur trois éléments clés :

- définition de la zone critique : un critère de rupture est appliqué à la structure afin de définir sa longueur caractéristique. Il est identifié à partir des propriétés en fissuration / rupture de la colle ;
- caractérisation du comportement non-linéaire du joint de colle : celui-ci est identifié à partir d'essais en fluage/recouvrement sur éprouvettes Arcan modifié (limitant les effets de bords) ;
- application d'un critère de ruine en fatigue : celui-ci est identifié à partir d'essais monotones sur éprouvettes Arcan modifié.

L'ensemble de cette méthode a été appliqué à différentes familles d'adhésifs bi-composant : méthacrylate (colle A), polyuréthane (colle B) et époxy (colle C).

### 3. Caractérisation mécanique de l'adhésif

#### 3.1 Dispositif expérimental et caractérisation

Les campagnes expérimentales de caractérisation des adhésifs considérés ont été réalisées en utilisant le montage Arcan modifié (Fig.1) [3]. Les substrats sont constitués d'un alliage d'aluminium 2017, d'une surface collée de 475 mm<sup>2</sup> et d'une épaisseur de joint de colle de 400 μm. L'utilisation de ce montage permet de travailler dans un cadre multi-axial (angle  $\gamma$ ). L'ensemble des essais a été mené sur une machine hydraulique (100 kN). Une mesure en temps réel des déplacements relatifs des deux substrats métalliques est effectuée par stéréo-corrélation d'images (GOM) permettant le suivi en temps réel du déplacement de marqueurs positionnés sur chacun des substrats.

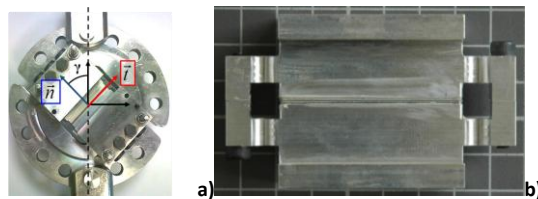


Figure 1. Dispositif Arcan (a) éprouvette Arcan modifiée (b).

#### 3.2 Essais monotones

Des essais monotones ont été réalisés avec un pilotage en effort (0,2 kN/s). Les essais effectués pour des cas de chargement de cisaillement ( $\gamma=90^\circ$ ) et de traction ( $\gamma=0^\circ$ ) sont présentés dans la Fig. 2.

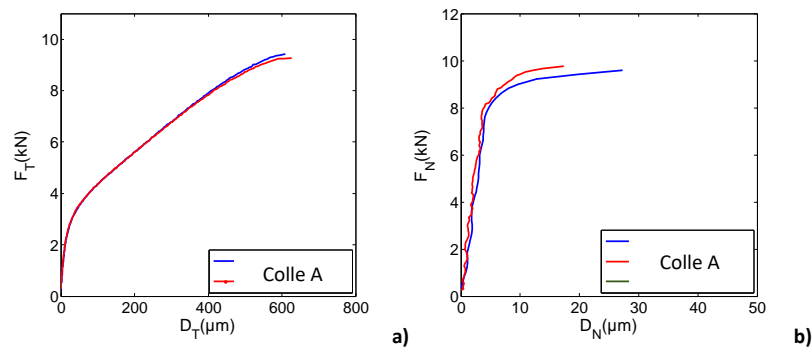


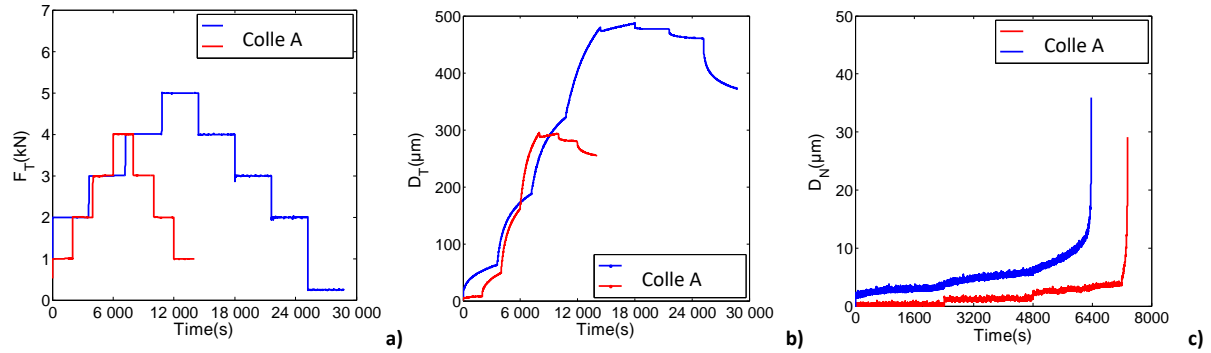
Figure 2. Comportement Arcan sous chargement monotone en cisaillement (a) et en traction (b).

#### 3.3 Essais de fluage/recouvrement

Afin de caractériser les mécanismes visqueux associés au comportement de l'adhésif, des essais de type fluage/recouvrement multi-niveaux ont été effectués (Fig. 3a). Ceux-ci sont caractérisés par une évolution temporelle du déplacement lors de l'application des différents paliers à effort constant. La Fig. 3b représente les déplacements mesurés en cisaillement (DT) et la Fig. 3c, ceux en traction (DN).

#### 3.4 Essais de ténacité

La ténacité représente l'énergie potentielle dissipée pour faire propager une fissure dans un milieu continu sur une unité de surface et dépend de l'état de sollicitation en pointe de fissure. Des essais normalisés de type Tapered Double Cantilever Beam (ISO 25217 [4]) ont alors permis d'établir la ténacité ( $G_C$ ).



**Figure 3.** Comportement Arcan en fluage/recouvrement (a) en cisaillement (b) et en traction (c).

## 4. Comportement mécanique de l'adhésif étudié

### 4.1 Modèle de comportement

Le modèle développé pour décrire le comportement de l'adhésif étudié s'appuie sur la dépendance au temps des déformations réversibles, l'occurrence de déformations non recouvrables pour des valeurs de contraintes élevées (plasticité à seuil) et la dépendance au temps des déformations irréversibles (viscoplasticité). Ce modèle propose une définition de la déformation totale avec une partie viscoélastique ( $ve$ ) et une viscoplasticité ( $vp$ ). Le tenseur des contraintes peut alors s'écrire

$$\underline{\sigma} = \underline{\underline{C}} : (\underline{\varepsilon} - \underline{\varepsilon}_{ve} - \underline{\varepsilon}_{vp}) \quad (1)$$

où  $\underline{\underline{C}}$  est le tenseur de raideur et  $\underline{\varepsilon}$  définit la déformation totale. Afin de décrire les déformations liées au comportement viscoélastique, un modèle spectral développé pour la description du comportement des matériaux composites [5] est appliqué pour décrire le comportement des colles

$$\dot{\underline{\varepsilon}}_{ve} = \sum_{i=1}^{n_t} \dot{\underline{\xi}}_i \quad \text{avec} \quad \dot{\underline{\xi}}_i = \frac{1}{\tau_i} (\mu_i \underline{\underline{\tilde{S}}}_R : \underline{\sigma} - \underline{\xi}_i) \quad (2)$$

$$\tau_i = \exp(n_i) \quad \text{avec} \quad \mu_i = \frac{\bar{\mu}_i}{\sum_{i=1}^{n_t} \bar{\mu}_i} \quad \text{et} \quad \tau_i = \exp(n_i) \quad \bar{\mu}_i = \frac{1}{n_0 \sqrt{\pi}} \exp\left(-\left(\frac{n_i - n_0}{n_c}\right)^2\right) \quad (3)$$

où  $n_t$  définit le nombre total de mécanismes viscoélastiques et  $(n_0, n_c)$  sont les paramètres du spectre définissant les temps caractéristiques  $\tau_i$  et leurs pondérations  $\mu_i$  associés au mécanisme  $i$ . La viscoélasticité est considérée non-linéaire assouplissante. Le tenseur de souplesse  $\underline{\underline{\tilde{S}}}_R$  s'écrit avec une partie déviatorique et une partie hydrostatique

$$\underline{\underline{\tilde{S}}}_R = \frac{1}{a^H (1 - d^H)} \underline{\underline{H}}^H + \frac{1}{a^D (1 - d^D)} \underline{\underline{H}}^D \quad (4)$$

$$d^i = 1 - \exp\left(-\frac{\langle Y^i - Y_0^i \rangle}{Y_0^{Ci}}\right) \quad \text{avec} \quad Y^i = \frac{1}{2a^i} (\underline{\sigma} : \underline{\underline{H}}^i : \underline{\sigma}) \quad (5)$$

$a_i$ ,  $Y_0^i$  et  $Y_0^{Ci}$  sont des constantes matériaux associées à l'assouplissement du tenseur  $\underline{\underline{\tilde{S}}}_R$  où  $i$  prend la valeur  $D$  ou  $H$  pour définir respectivement le comportement déviatorique ou hydrostatique. La définition des mécanismes de viscoplasticité est basée sur les travaux de Mahnen [6].

Les déformations liées aux mécanismes de viscoplasticité sont définies telles que

$$\dot{\underline{\epsilon}}_{vp} = \dot{p} \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \text{ avec } \dot{p} = \left\langle \frac{f}{K} \right\rangle^m \quad (6)$$

Les fonctions  $f$  et  $g$  régissant les mécanismes de plasticité s'expriment par

$$f = \sigma_{VM}^2 - \frac{1}{3}(Y^2 - a_1 Y_0 I_1 - a_2 I_1^2) \text{ et } g = \sigma_{VM}^2 - \frac{1}{3}(Y^2 - a_1^* Y_0 I_1 - a_2^* I_1^2) \quad (7)$$

avec les paramètres matériaux ( $a_1, a_2$ ) et ( $a_1^*, a_2^*$ ) à identifier.  $Y$  définit l'écroissage non-linéaire exprimé en fonction de la variable  $e_v$  [4]

$$Y = Y_0 + q(1 - e^{-be_v}) + He_v \text{ avec } \dot{e}_v Y_0 = \underline{\sigma} : \underline{\dot{\epsilon}}^{vp} \quad (8)$$

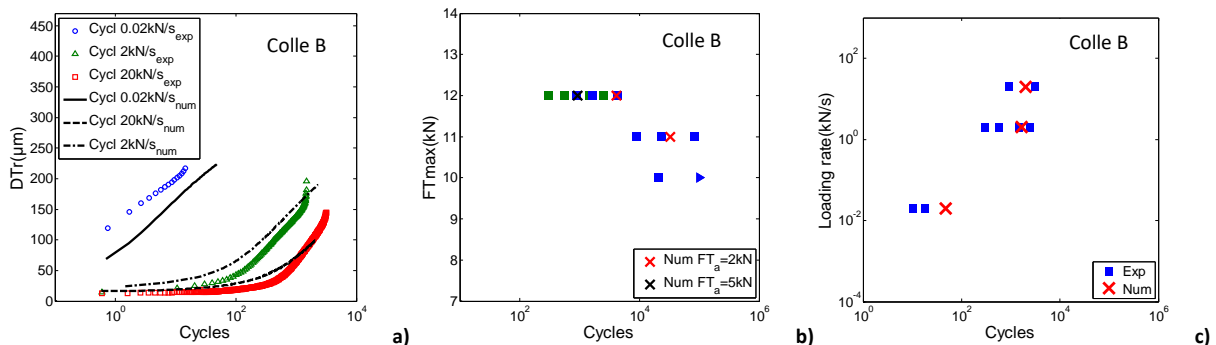
## 4.2 Identification des paramètres matériaux

Le processus d'identification des paramètres matériaux fait appel aux étapes suivantes :

- identification des paramètres d'élasticité linéaire établis à partir de la réponse établie lors de la mise en charge sur les premiers paliers de fluage en cisaillement et en traction ;
- identification des paramètres du spectre définissant les mécanismes visco-élastiques à partir des deux premiers paliers de fluage en cisaillement ;
- identification de la partie *déviatorique* de la raideur viscoélastique. Celle-ci se fait à partir de la valeur des déplacements mesurés sur les trois premiers paliers de fluage en cisaillement ;
- identification de la partie *hydrostatique* de la raideur viscoélastique. Celle-ci se fait à partir de la valeur des déplacements mesurés sur les trois premiers paliers de fluage en traction ;
- identification des paramètres matériaux liés à l'écroissage. La valeur du seuil de plasticité est fixée afin que les mécanismes de plasticité ne soient « activés » qu'au dernier palier de fluage. Les autres paramètres sont identifiés à partir de données de fluage en cisaillement ;
- identification des paramètres matériaux liés aux fonctions  $f$  et  $g$  à partir de l'ensemble des données de fluage en traction.

## 4.3 Critère de ruine en fatigue

Un critère en déformation, basé sur la mesure des déplacements relatifs des substrats (tangentiels et normaux), a été adopté comme critère de ruine. Pour les différents adhésifs structuraux étudiés [7] [8], l'application de ce critère en fatigue a donné des résultats probants. Afin de vérifier le caractère prédictif de la méthode en termes d'évolution des déplacements, des essais Arcan ont été réalisés sous divers chargements cycliques (Fig. 4a) et des durées de vie ont également pu être comparées pour ces différents chargements (Fig. 4b) ainsi que l'influence de la vitesse de chargement (Fig. 4c).



**Figure 4.** Confrontation essais/calculs sous chargement cyclique sur Arcan en cisaillement : évolution du déplacement tangentiel (a), durées de vie (b) et influence de la vitesse (c).

## 5. Définition de la zone d'amorçage

### 5.1 Critère couplé

Pour déterminer la longueur caractéristique  $l_c$  de la zone critique au sein d'une structure collée, un critère couplé basé sur un critère en énergie et un critère en contrainte a été proposé par Leguillon [9]. Le développement d'une fissure est supposé se produire de manière instable sur une distance  $d$  à partir de la singularité. La condition énergétique du critère compare la variation d'énergie potentielle  $\Delta W$  à la ténacité de l'adhésif  $G_c$ .  $\Delta W$  est exprimée comme la variation entre l'état final (fissure de longueur  $d$ ) et l'état initial (sans fissure). Sous l'hypothèse d'élasticité plane, la condition en énergie s'écrit alors

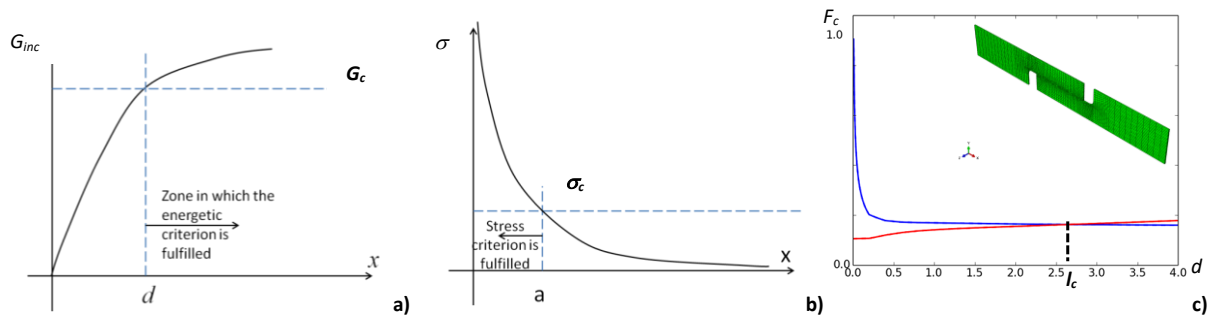
$$G_{inc}(d) = -\frac{\Delta W}{\Delta S} = -\frac{W(d) - W(0)}{\Delta S} \geq G_c \quad (9)$$

où  $G_{inc}(d)$  désigne le taux de restitution d'énergie incrémental et  $\Delta S$  l'aire de la surface fissurée.

La condition en contrainte repose quant à elle sur l'hypothèse que la ruine de la structure est se produit lorsque la contrainte normale  $\sigma_{app}$  atteint la contrainte à rupture  $\sigma_c$

$$\sigma_{app}(x) \geq \sigma_c \quad \text{pour } 0 < x < d \quad (10)$$

Le bilan énergétique exprimé en (Eq. 9) fournit une limite inférieure de l'incrément de fissuration (Fig. 5a) tandis que le critère en contrainte (Eq. 10) en fournit une limite supérieure (Fig. 5b). Le critère couplé est rempli quand les deux conditions, en contrainte et en énergie, donnent une déformation à rupture identique pour une même longueur de fissure  $l_c$  (Fig. 5c). La connaissance de cette longueur critique  $l_c$  permet alors de déterminer la charge à rupture  $F_c$  de la structure étudiée.



**Figure 5.** Représentation du critère en énergie (a) et en contrainte (b) et détermination de la longueur critique et de l'effort à rupture sur une éprouvette technologique [10] (c).

## 6. Application aux cas d'éprouvettes technologiques

La méthode développée doit permettre une prévision rapide de la durée de vie en fatigue. Les propositions destinées au calcul des durées de vie ne peuvent donc s'appuyer sur des calculs éléments finis intégrant l'ensemble du chargement cyclique appliqué, ni sur un maillage raffiné de l'ensemble de l'assemblage collé considéré. La méthode proposée repose sur une modélisation linéaire élastique de l'assemblage pour accéder à une répartition fine des contraintes dans le joint de colle. L'application du critère couplé permet pour sa part de définir la zone critique où se développe la ruine de l'assemblage. Enfin, dans le but d'accélérer les prévisions, les calculs effectués en introduisant le comportement mécanique non-linéaire de la colle sous chargement cyclique sont réduits à une zone représentative du comportement mécanique de cette zone. Les paramètres locaux pilotant le chargement de celle-ci seront alors supposés constants.

L'ensemble de cette démarche a été appliqué au cas d'éprouvettes technologiques [10] munies de joints de colle A de deux épaisseurs distinctes (1 et 5 mm) soumises à un chargement de fatigue en flexion 4 points (2 Hz) pour un rapport de charge  $R = 0,1$ . Les résultats obtenus ont permis d'établir une première comparaison très encourageante avec les prévisions numériques réalisées (Table 1).

Chargement		Durée de vie numérique	Durée de vie expérimentale	
Effort alterné	Effort moyen			
$F_{a1}$	$F_{m1}$	7 000	3 580	75 035
$F_{a2}$	$F_{m2}$	25 000	-	500 000

**Table 1.** Durées de vies numériques/expérimentales sur éprouvettes technologiques [10].

Une seconde campagne d'essais de fatigue, menée cette fois sur des éprouvettes de type simple-recouvrement, pour un joint de colle d'épaisseur 0,4 mm est en cours (colle C). Ces essais, réalisés pour une fréquence de 2 Hz et plusieurs niveaux de chargement distincts, permettront d'établir une courbe de Wöhler de l'assemblage étudié et de conclure sur la pertinence de l'approche proposée.

## 7. Conclusions

Une méthode destinée à estimer la durée de vie en fatigue d'assemblages collés a été proposée. Cette méthode s'appuie d'une part sur une caractérisation du comportement mécanique de l'adhésif (Arcan modifié) et d'autre part, sur différents moyens numériques permettant d'accéder « rapidement » à la prévision du comportement cyclique de l'assemblage et ainsi, à l'estimation de durées de vie de l'assemblage étudié. Pour réduire les temps de calcul, les modélisations du comportement cyclique ont été effectuées sur un unique élément fini. Les paramètres du chargement cyclique appliqué à cet élément ont été déterminés auparavant par l'application du critère couplé [9]. Des comparaisons essais/calculs ont été effectuées afin de vérifier la validité de l'approche proposée.

## Références

- [1] AJ. Kinloch, SO. Osiyemi, Predicting fatigue life of adhesively-bonded joints, *J. of Adh.*, 79-90, 1993
- [2] JA. Harris, RD. Adams, Strength prediction of bonded single lap joints by non linear finite element methods, *Int. J. Adh. Adh.*, 4(2), 65-78, 1984
- [3] JY. Cognard, R. Créac'hcadec, L. Sohier, P. Davies, Analysis of the non linear behavior of adhesive in bonded assemblies, comparison of TAST and Arcan test, *Int. J. Adh. Adh.*, 28, 393-404, 2008
- [4] ISO 2521. Determination of the mode I adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens, 2009
- [5] JF. Maire, Etudes théorique et expérimentale du comportement de matériaux composites en contraintes planes, Thèse de doctorat de l'Université de Franche-comté, 1992
- [6] R. Mahnken and M. Schlimmer, Simulation of strength difference in elasto-plasticity for adhesive materials, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 63, 1461-1477, 2005
- [7] P. Bidaud, R. Creac'hcadec, D. Thévenet, JY. Cognard, 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, *J. of Adh.*, 91(9), 701-724, 2015
- [8] D. Thévenet, R. Créac'hcadec, L. Sohier, JY. Cognard, Experimental analysis of the behavior of adhesively bonded joints under tensile/compr.-shear cyclic loadings, *Int. J. Adh. Adh.*, 44, 15-25, 2013
- [9] D. Leguillon, Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch, *Eur. J. Mech. A/Solids*, 21, 61-72, 2002
- [10] P. Bidaud, D. Thévenet, N. Carrere, An approach for fatigue lifetime predictions of adhesively bonded structures based on the characterisation of the adhesive joint viscoelastic behaviour, 3rd International Conference on Structural Adhesive Bonding, Porto, Portugal, 2015