

Analyse et modélisation du comportement d'un adhésif dans un assemblage soumis à sollicitations cycliques de cisaillement

Analysis and modelling of the behaviour of an adhesive in an assembly under cyclic shear loadings

R. Créac'hcadec, D. Thévenet et J.Y. Cognard

Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes – EA4325 ENSTA Bretagne/UBO/ENIB
ENSTA Bretagne, 2 rue F. Verny, 29806 Brest Cedex 9 - France
e-mail : Romain.Creac'hcadec@ensta-bretagne.fr, David.Thevenet@ensta-bretagne.fr, Jean-Yves.Cognard@ensta-bretagne.fr

Résumé

Les analyses expérimentales et numériques du comportement mécanique d'un adhésif dans un assemblage sont rendues particulièrement difficiles en raison de l'influence des effets de bords. Ces concentrations de contraintes, présentes aux extrémités du joint de colle et près de l'interface, peuvent être à l'origine de l'amorçage de fissures qui peuvent par la suite se propager dans l'adhésif. L'analyse du comportement sur le long terme d'un adhésif est donc rendue assez délicate. Les principales approches développées dans la littérature, concernent la tenue en fatigue d'assemblages collés et sont principalement basées sur la théorie de la propagation d'une fissure dans l'adhésif.

Ce papier présente une étude expérimentale et une première modélisation du comportement de l'adhésif destinés à analyser le comportement mécanique d'assemblages collés sous sollicitations cycliques. Un dispositif Arcan modifié, développé précédemment, est utilisé pour analyser le comportement mécanique de l'adhésif sous chargements cycliques en limitant l'influence des effets de bords. Ce dispositif permet de solliciter le joint de colle dans un assemblage en traction, cisaillement, traction-cisaillement et compression-cisaillement. Une première modélisation de type Chase-Goldsmith est également présentée pour décrire le comportement pour une sollicitation de cisaillement.

Abstract

Experimental and numerical analyses of the behaviour of an adhesive in an assembly are particularly made difficult by the presence of edge effects. These stress concentrations at each bottom of the adhesive near the interface can initiate cracks and conduce to the failure of the assembly. The analyze of the long term behaviour of an adhesive is then quite complicate. Main of the approaches developed in literature deal with the fatigue of bonded assembly and are mainly based on the propagation of a crack in the adhesive.

This paper presents an experimental study and a first mode of the behaviour of an adhesive in order to analyze the mechanical behaviour of bonded assemblies under cyclic loadings. A modified Arcan developed previously is used to analyze the mechanical behaviour of an adhesive under cyclic loadings reducing the edge effects influence. This device enables to apply traction/compression-shear loads to an adhesive in an assembly. A first Chase Goldsmith model is also presented to describe the behaviour under shear loadings.

Mots Clés : Adhésif, Chargement cyclique, Expérience, Comportement Non-linéaire, Modélisation

Keywords: Adhesive, Cyclic loading, Experiment, Non-linear behaviour, Modelling

1. Introduction

Le dispositif Arcan permet de caractériser le comportement d'un joint de colle pour des sollicitations radiales et permet ainsi d'obtenir une large base de données pour le développement de modèles de comportement des adhésifs dans un assemblage. La procédure expérimentale utilise un dispositif de mesure sans contact en temps réel par stéréo-corrélation d'images 3D. Les données ainsi mesurées sont tracées en fonction de l'effort et du déplacement relatif des extrémités du joint de colle. Ce dispositif a été utilisé lors d'essais monotones ou cycliques réalisés sur une machine hydraulique. Les éprouvettes collées utilisent des géométries spécifiques aux extrémités du joint de colle destinées à limiter les effets de bords. Ces becs réduisent les concentrations de contraintes et ainsi le risque de fissuration au niveau des bords libres du joint de colle [1-2]. L'adhésif étudié est une base époxy : Huntsman™ Araldite® 420 A/B.

Dans un premier temps, cette étude s'est focalisée sur l'analyse du comportement en cisaillement du joint de colle. Des essais de cisaillement cyclique, menés pour différentes amplitudes de chargement, ont été réalisés avec une vitesse de sollicitation de 1kN/s. L'étude présente quelques résultats issus de cette campagne d'essais pour des chargements monotones et cycliques. Un comportement visqueux fortement non linéaire a été observé. La rupture de l'assemblage est observée pour un déplacement moyen relatif des extrémités du joint de colle de l'ordre de 180 μm pour l'ensemble des chargements cycliques et monotones, pour des joints de colle d'une épaisseur d'environ 200 μm .

Dans un deuxième temps, un modèle de comportement a été développé dans le cadre des sollicitations appliquées. Des travaux précédents [4] ont permis de proposer une loi de comportement élasto-viscoplastique, dans le cadre d'un formalisme non associé, pour décrire le comportement pour des chargements monotones radiaux de traction-cisaillement. Le comportement macroscopique en cisaillement cyclique, étudié dans ce travail, peut quant à lui être décrit par l'utilisation d'un modèle de type Chase-Goldsmith avec une viscosité non linéaire. Des comparaisons avec les résultats d'essais obtenus sous amplitude de chargement croissante ont également permis de valider l'utilisation de ce modèle. L'objectif est de poursuivre le travail pour des chargements de traction-cisaillement.

2. Approche expérimentale

2.1 Adhésif étudié et éprouvettes testées

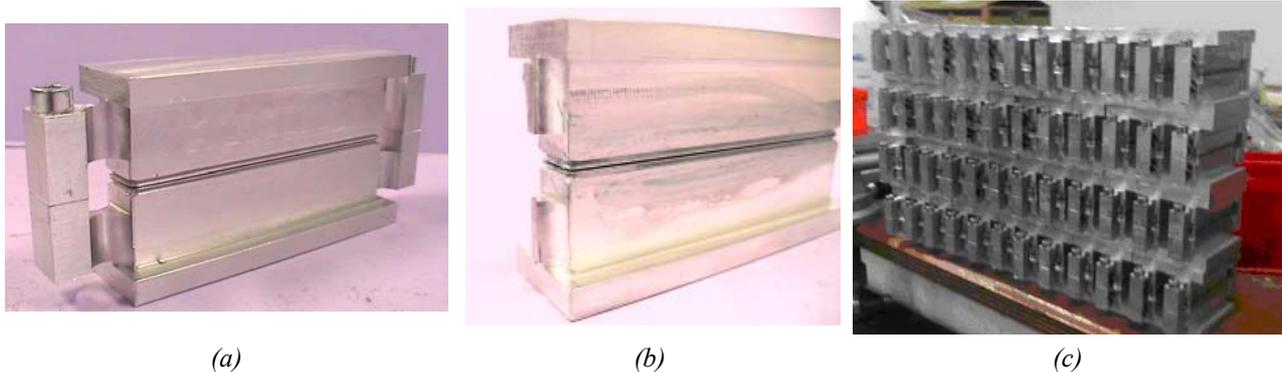


Fig. 1 : Eprouvette destinée à l'essai Arcan : (a) Eprouvette avec dispositif de collage intégré, (b) Eprouvette avant essai, (c) Dispositif de collage dédié aux grandes campagnes d'essais.

Cette étude porte sur le comportement de l'adhésif structural Huntsman™ Araldite® 420 A/B [5]. Il s'agit d'une résine à base époxy avec durcisseur comprenant un ratio en masse de 10 pour la résine et 4 pour le durcisseur. Le dispositif de collage (fig. 1a), permet d'assembler de manière rapide deux substrats métalliques (alliage d'aluminium EN AW-2017 pour l'étude concernée ici). L'assemblage est réalisé par deux vis situées à chacune des extrémités du joint des substrats. L'épaisseur du joint de colle est maîtrisée lors de la fabrication des talons de ces substrats. Dans les résultats présentés, l'épaisseur du joint de colle a été imposée à $200 \pm 10 \mu\text{m}$. La préparation mécanique des surfaces est réalisée par un ponçage au papier de verre au grade de 120 suivi d'un dégraissage à l'acétone pour éliminer les particules d'alumine issues du ponçage. Après un séchage à l'air sec, les deux substrats sont encollés à l'aide d'une spatule. Ces deux substrats sont solidarisés par les liaisons boulonnées ; s'en suit alors une cuisson à 110°C pendant 1 h. Après cuisson, les talons sont coupés (fig. 1b). Cette méthode de collage permet la réalisation de nombreuses éprouvettes pour des campagnes d'essais conséquentes (fig. 1c).

2.2 Géométries locales du joint de colle

Des études en élasticité linéaire [6], pour des structures réalisées en bi-matériaux, montrent que l'utilisation d'un « bec » permet d'éliminer la contribution des singularités dues aux effets de bords. Les simulations par éléments finis considérant un comportement élastique des composants ont permis de déterminer l'évolution des contraintes à travers l'épaisseur de l'adhésif. Comme nous avons à modéliser des structures multi matériaux, il est nécessaire d'utiliser des maillages fins près de l'interface afin d'obtenir de bons résultats numériques, spécialement pour un assemblage aux matériaux fortement hétérogènes (fig. 2b). Les résultats sont présentés pour des substrats en aluminium (Module d'Young $E=80$ GPa, Coefficient de Poisson $\nu=0.3$). Les propriétés matériau de l'adhésif sont $E=2.2$ GPa et $\nu=0.3$. La figure 2.c présente l'évolution de la contrainte de von Mises dans l'adhésif le long de différentes lignes paramétrées par y ; $y=0$ correspond au plan moyen de l'adhésif (segment $[OA]$, fig. 2.a) et $y=e$ correspond à l'interface entre l'adhésif et le substrat. La contrainte de cisaillement est la composante prédominante. La contrainte de von Mises peut donc être utilisée (d'autres types de critères peuvent être appliqués). Les valeurs sont normalisées à "1" au milieu du joint de colle. Ces résultats montrent que le bec peut limiter les effets de bords. Les effets de bords peuvent être diminués par une diminution de l'épaisseur du bec en utilisant un angle plus faible pour définir le bec (fig. 2e) ; mais le bec est alors beaucoup plus fragile et peut donc plus facilement s'endommager.

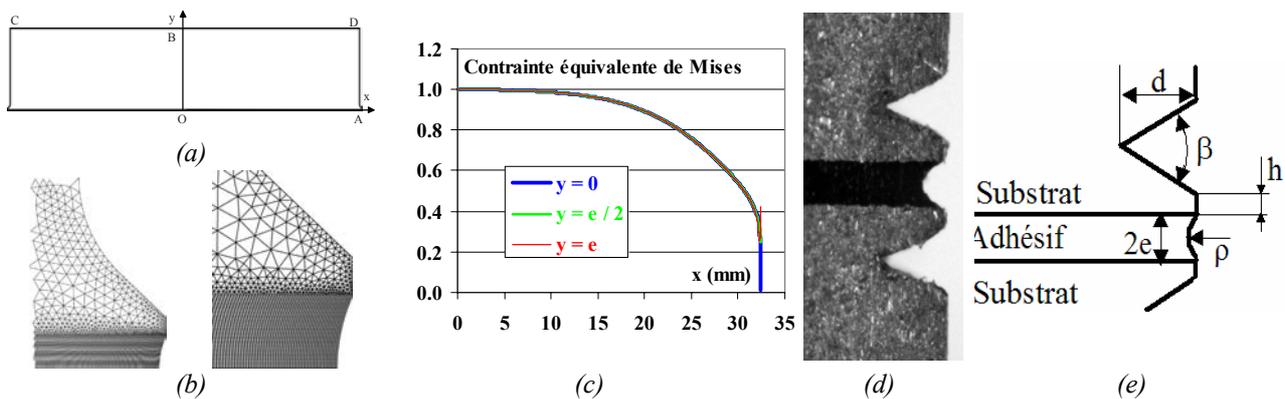


Fig. 2 : Influence des becs sur les effets de bords : (a) Géométrie du substrat, (b) Maillage du substrat et du joint de colle – Zoom Maillage du « bec », (c) Distribution des contraintes de von Mises dans l'épaisseur du joint de colle pour une sollicitation de cisaillement, (d) et (e) Géométries locales du joint de colle : zoom et définition.

2.3 Dispositif de sollicitation

Pour solliciter le joint de colle, dans le plan « contrainte normale - contrainte tangentielle », nous proposons d'utiliser un dispositif de type Arcan modifié [3], permettant de solliciter aussi la colle en compression (fig. 3a). Deux points importants ont été étudiés lors de la conception de ce montage : l'obtention d'un champ de contraintes le plus uniforme possible dans le plan moyen du joint de colle et maximal au centre pour limiter les effets des défauts ainsi que la conception d'un système d'accrochage de l'éprouvette (substrat) sur le support du montage « Arcan » qui ne perturbe pas le champ de contraintes dans la colle. La figure 3a présente le dispositif utilisé dans une configuration de cisaillement. L'éprouvette collée est située dans la partie centrale. L'orientation de la direction de chargement est définie par les différents trous situés en périphérie du système mécanique. Dans le cas de cette étude, la direction de chargement (*i.e.* verticale) est située dans le plan moyen du joint de colle : il s'agit donc d'un essai de cisaillement. La figure 3b présente le dispositif de mesure sans contact en temps réel par stéréo-corrélation d'images. La zone d'analyse est éclairée par deux spots avec lumière polarisée. La figure 3c présente une image acquise par ce dispositif. Deux marqueurs (facettes distantes d'environ 5 mm notées « 0 » et « 1 ») sont placés à proximité du joint de colle. La fréquence d'échantillonnage est de 6 Hz. Le dispositif de mesure permet alors de tracer l'évolution de l'effort en fonction du déplacement relatif dans la direction du joint de colle

(direction tangentielle). La sollicitation mécanique a été appliquée par une machine de fatigue servo-hydraulique d'une capacité de 100 kN.

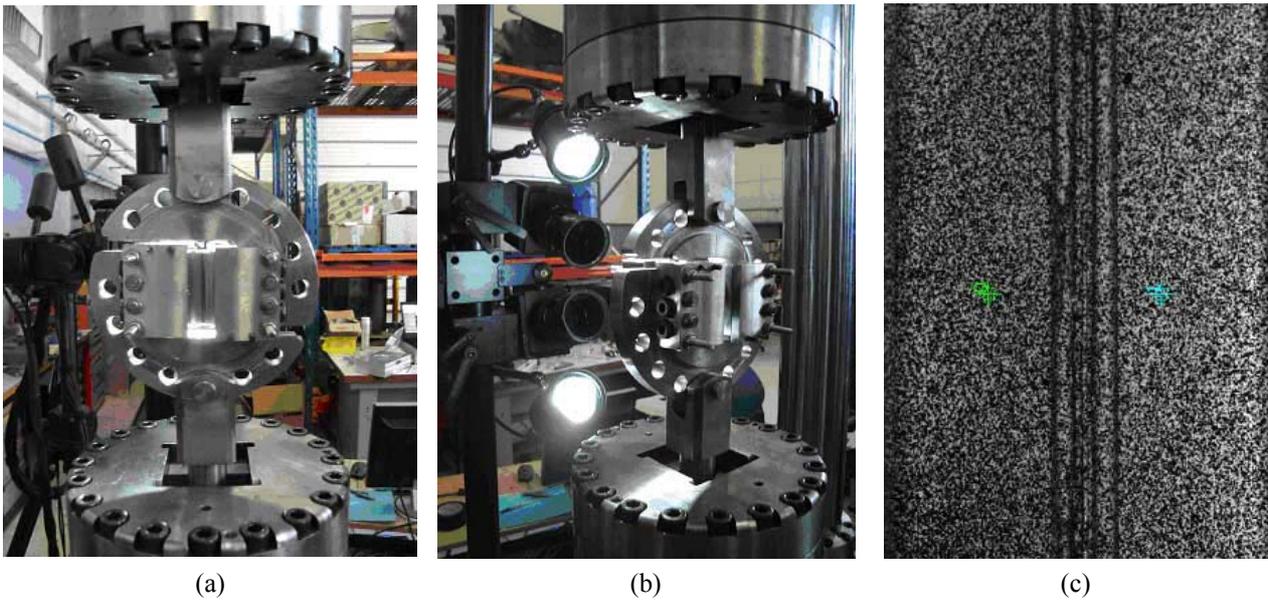


Fig. 3 : Dispositif Arcan modifié : (a) Dispositif Arcan pour un essai de cisaillement, (b) Dispositif de mesure 3D en temps réel sans contact, (c) Suivi par marqueur du déplacement des extrémités du joint de colle.

3. Résultats expérimentaux

3.1 Sollicitation monotone

L'objet de cette analyse est d'étudier l'influence du comportement sous sollicitations cycliques du joint de colle. De précédentes études [3] ont montré l'influence importante de la vitesse de sollicitation sur le comportement mécanique de l'adhésif Huntsman™ Araldite® 420 A/B. Les essais cycliques ont donc été réalisés à une vitesse constante de 1 kN/s. A titre d'information, les fréquences de sollicitation sont de l'ordre de 0,1 Hz et un soin particulier a été apporté lors de l'application de l'effort maximal (1^e quart de cycle) afin de conserver une vitesse constante. La figure 4 présente la réponse de l'adhésif pour deux essais monotones de 1 kN/s. Un comportement linéaire est observé pour une charge inférieure de 12 kN. Le comportement devient fortement non linéaire jusqu'à la rupture obtenue pour un déplacement tangentiel maximal de $170 \pm 5 \mu\text{m}$.

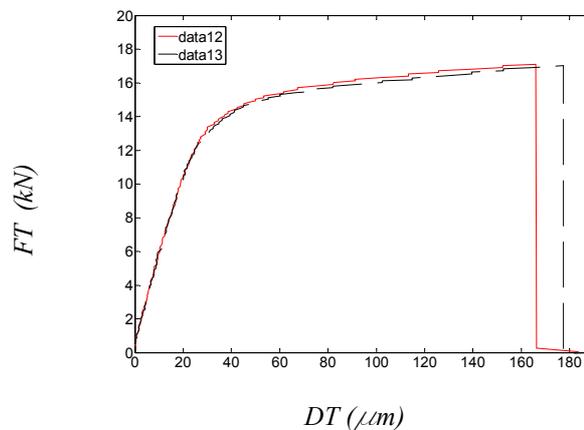


Fig. 4 : Courbes effort-déplacement sous chargement monotone (1 kN/s).

3.2 Sollicitation cyclique et reproductibilité

Une première approche à consister à vérifier la reproductibilité des essais. Pour des sollicitations monotones, de précédentes publications [3] ont montrés une très bonne reproductibilité des résultats

liés à l'utilisation du dispositif Arcan modifié et de la procédure d'essai. Pour des sollicitations cycliques, plusieurs essais ont été réalisés. La figure 5, obtenue pour un effort moyen constant $F_m = 10$ kN, présente les résultats issus de deux sollicitations alternées différentes : $F_a = 2,0$ kN et $F_a = 2,5$ kN. L'ensemble de ces sept essais a permis de s'assurer d'une bonne reproductibilité expérimentale. Le comportement observé met en évidence un phénomène d'hystérésis prononcé et fortement non linéaire. Lorsque le déplacement tangentiel cumulé atteint une valeur critique, la rupture de l'assemblage collé se produit alors brutalement. Le tableau 1 présente les valeurs de ce déplacement à rupture DT_f obtenues pour chacun de ces essais.

Essai	F_m (kN)	F_a (kN)	DT_f (μm)
Data 16	10	2,0	191
Data 17			188
Data 21			186
Data 23			181
Data 20		2,5	179
Data 24			189
Data 25			190

Tab. 1 : Déplacement cumulé à rupture mesuré à l'issue des essais cycliques.

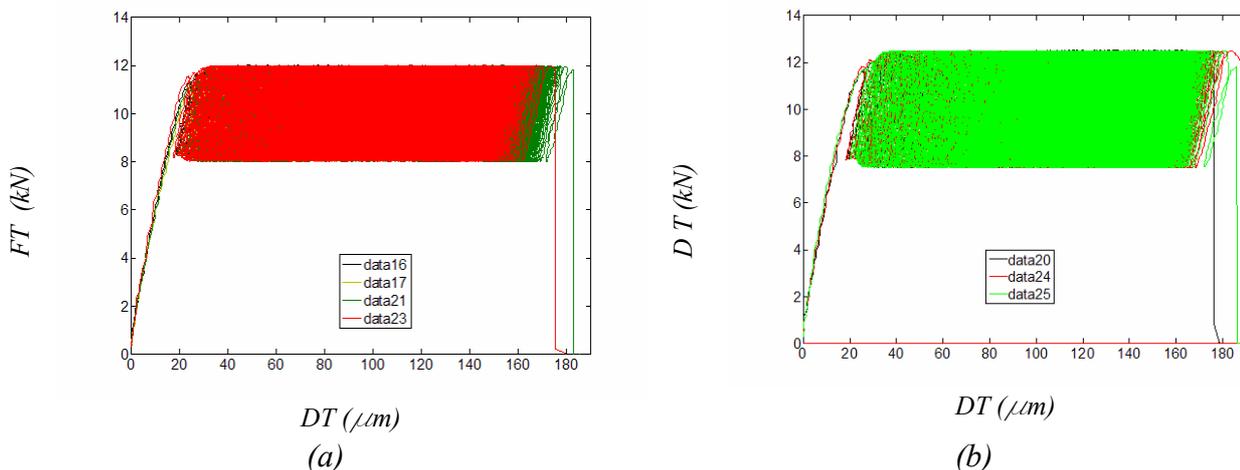


Fig. 5 : Courbes effort-déplacement sous chargement cyclique : (a) $F_m=10$ kN et $F_a=2,0$ kN (1 kN/s), (b) $F_m=10$ kN et $F_a=2,5$ kN (1 kN/s).

3.3 Influence du déplacement relatif à rupture

La figure 6 présente l'évolution du déplacement relatif tangentiel cumulé en fonction du temps pour des sollicitations cycliques $F_m = 10$ kN avec $F_a = 2,0$ kN (fig. 6a) et $F_a = 2,5$ kN (fig. 6b). L'évolution observée est fortement non linéaire. Pour l'ensemble des essais, lorsque ce déplacement cumulé atteint une valeur de $185 \pm 6 \mu m$, la rupture intervient. Il semble qu'un critère pertinent pour analyser la tenue à des sollicitations cycliques d'un joint de colle soit un critère en déplacement total cumulé. Pour des joints d'une épaisseur de $200 \pm 10 \mu m$, la rupture intervient pour une déformation, $DT/\text{épaisseur}$ du joint de colle, de l'ordre de 90%. La reproductibilité des essais se justifie en partie par une bonne maîtrise des conditions de collage à l'aide du dispositif indiqué sur la figure 1.

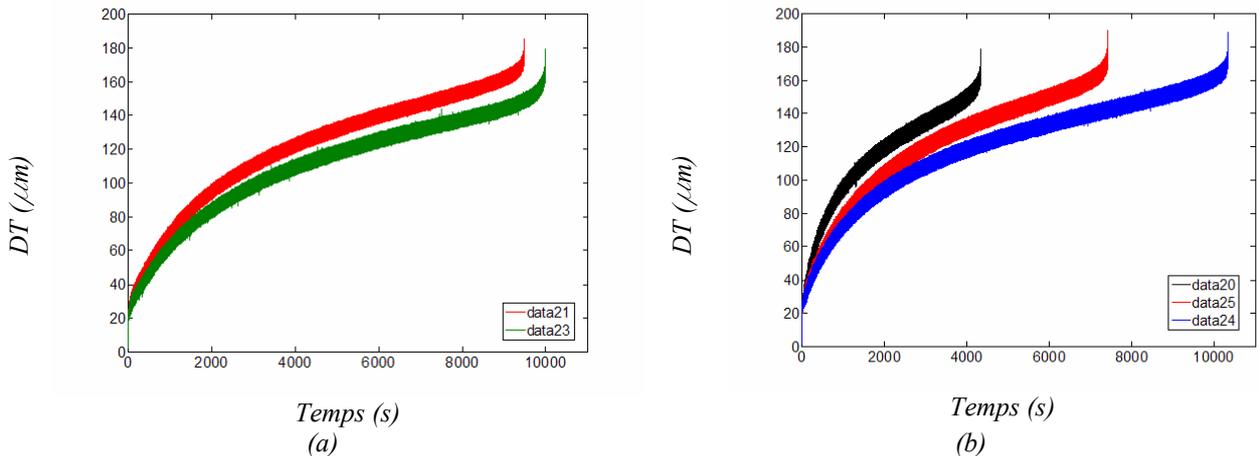


Fig. 6 : Courbes déplacement-temps sous chargement cyclique : (a) $F_m=10$ kN et $F_a=2,0$ kN (1 kN/s), (b) $F_m=10$ kN et $F_a=2,5$ kN (1 kN/s).

3.4 Influence de la charge moyenne et de la charge alternée

La figure 7a présente l'influence de la charge moyenne sur le comportement de l'adhésif pour une charge alternée fixée à $F_a = 2,0$ kN. Trois charges moyennes sont considérées : $F_m = 8,75$ kN, 10 et 11 kN. L'augmentation de la charge moyenne provoque une augmentation de l'amplitude des hystérésis. Ainsi, à chaque cycle, le déplacement tangentiel cumulé augmente, lorsque la charge moyenne augmente. On observe de la même manière un comportement visqueux fortement non linéaire avec des valeurs du déplacement tangentiel à rupture similaire aux études précédentes. En conséquence, le nombre de cycles à rupture diminue de manière importante, lorsque la charge moyenne augmente. L'ensemble des points de mesure relatifs à l'essai mené pour $F_m = 11$ kN n'a pu être tracé dans son intégralité en raison d'un problème d'acquisition. Toutefois, le déplacement tangentiel à rupture demeure similaire (tab. 2).

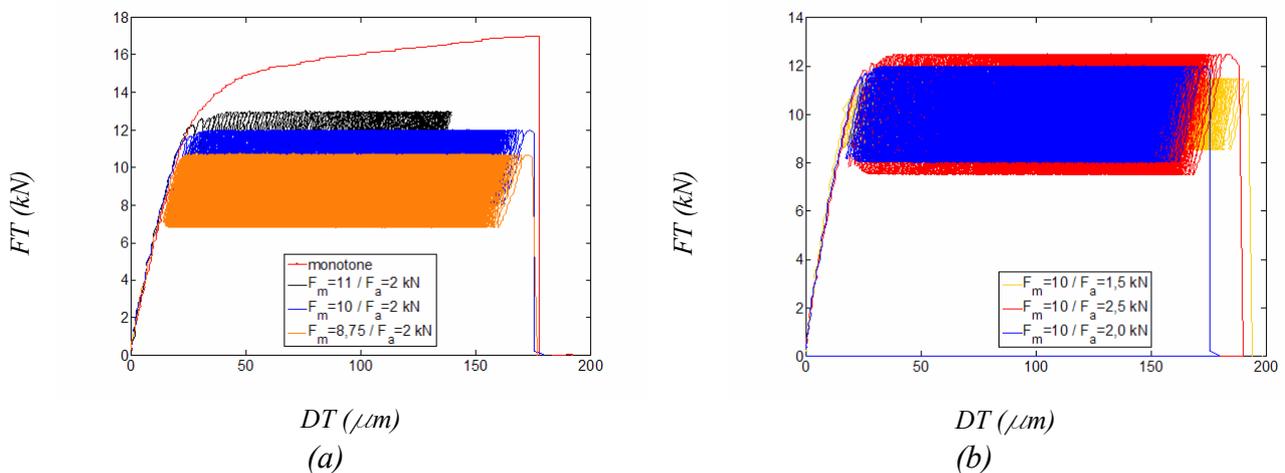


Fig. 7 : Courbes déplacement-temps sous chargement cyclique : (a) Influence de la charge moyenne, (b) Influence de la charge alternée.

De la même manière, la figure 7b présente l'influence de la charge alternée sur le comportement de l'adhésif. Trois essais ont été réalisés pour une charge moyenne $F_m = 10$ kN et des charges alternées $F_a = 1, 2$ et $2,5$ kN. La rupture intervient pour un déplacement relatif cumulé également proche de $180 \mu\text{m}$. Le tableau 2 présente l'ensemble de résultats d'essais. Cette influence est reproduite dans la figure 8 avec une courbe F_a-N pour un effort moyen $F_m = 10$ kN et une courbe F_m-N pour un effort alterné $F_a = 2$ kN. Ces résultats permettent d'afficher une première tendance et mettent en évidence le potentiel de la stratégie expérimentale proposée. On notera la faible dispersion observée

pour la courbe F_a - N . Ces premiers essais devront bien entendu être complétés par des essais supplémentaires afin de confirmer cette tendance.

Essai	F_m (kN)	F_a (kN)	DT _f à rupture (μm)	N_f à rupture (cycles)
1	8,75	2,0	179	12 286
2	10		180	12 48
3	11		180	175
4	10	1,5	199	8 223
5		2,0	180	1 248
6		2,5	190	742

Tab. 2 : Influence de la charge moyenne et de la charge alternée sur le comportement à rupture de l'adhésif.

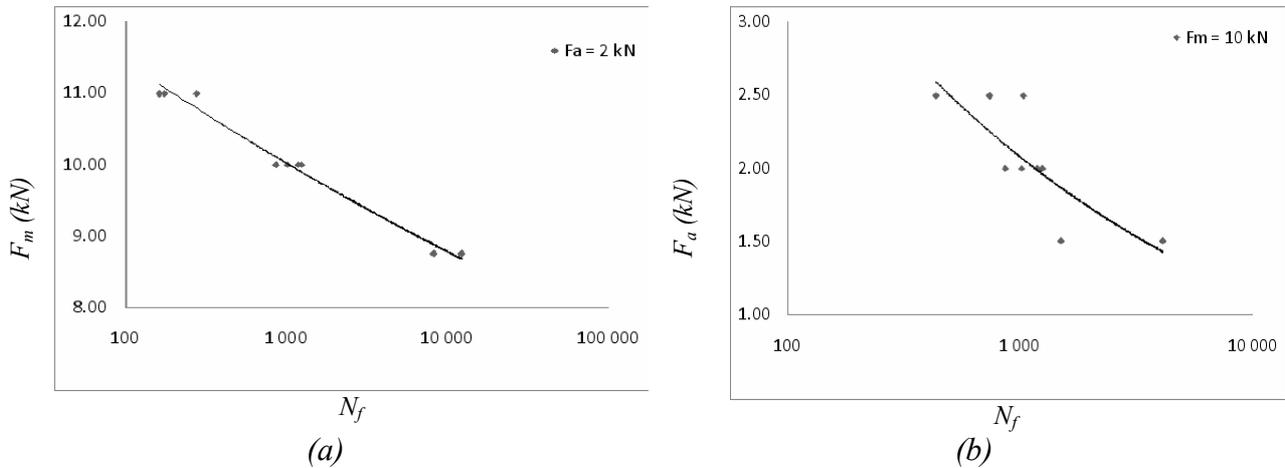


Fig. 8 : Durée de vie en fatigue : (a) Influence de l'effort moyen ($F_a = 2$ kN), (b) Influence de l'effort alterné ($F_m = 10$ kN).

4. Modélisation du comportement visqueux par un modèle de Chase-Goldsmith

4.1. Présentation du modèle

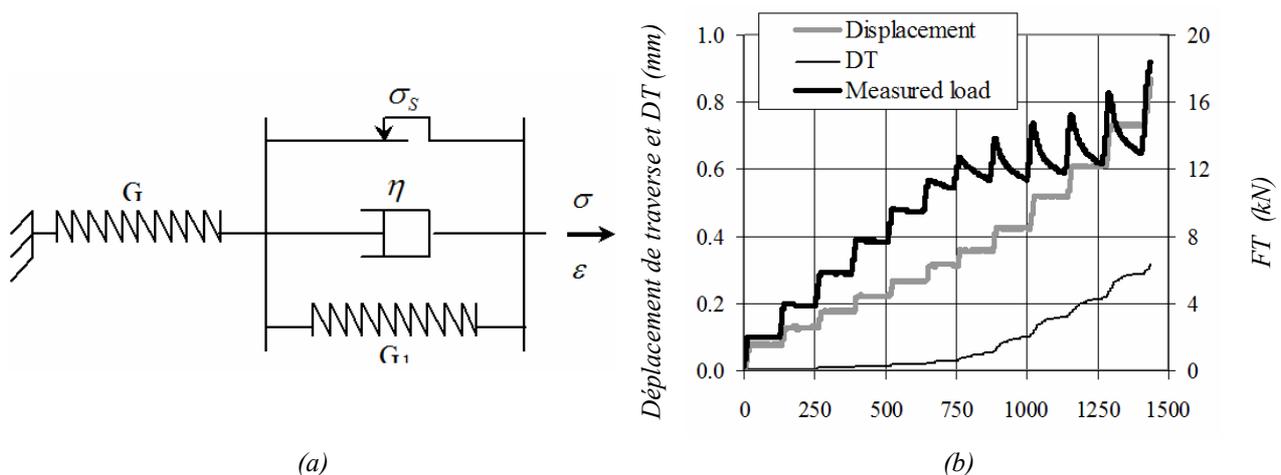


Fig. 9 : Modèle de Chase Goldsmith avec viscosité non-linéaire : (a) Formulation analogique, (b) Réponse expérimentale pour une sollicitation de relaxation-fluage (vitesse de déplacement de la traverse=0,5 mm/min).

Afin de décrire le comportement visqueux non linéaire de l'adhésif observé précédemment, pour des sollicitations de cisaillement, le modèle analogique de Chase-Goldsmith avec viscosité non-linéaire a été choisi (fig. 9a). Le comportement de l'adhésif peut être représenté par une relation

entre le déplacement relatif tangentiel u_s et la composante tangentielle t_s du vecteur contrainte à l'interface. Le comportement peut ainsi être décrit par les équations (1-2) :

$$\text{Si } (|t_s| < t_i) \text{ alors : } t_s = k_{s1} u_s \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{Sinon : } \dot{u}_s = \frac{1}{k_{s1}} \dot{t}_s + \frac{1}{Y} \left(\left(1 + \frac{k_{s2}}{k_{s1}} \right) t_s - t_i - k_{s2} u_s \right)^m \quad (\text{Eq. 2})$$

k_{s1} , k_{s2} représentent les modules de cisaillement, t_i est la limite d'élasticité, Y et m sont les paramètres décrivant la viscosité non linéaire.

4.2. Analyse pour des chargements de relaxation

Afin de caractériser l'évolution non linéaire de la viscosité, des chargements de type relaxation-fluage ont été appliqués (Fig. 9b). Cet essai a été réalisé pour un joint d'épaisseur 0,4 mm. On observe un comportement visqueux fortement non linéaire. A chaque incrément de déplacement de la traverse, l'effort décroît. Cette diminution est de plus en plus importante à mesure que le déplacement de traverse est grand. La rupture est observée pour un taux de déformation à rupture proche de 90%. Cet essai permet de caractériser l'évolution non linéaire de la viscosité. La figure 10 présente une confrontation entre le modèle et l'essai. Les coefficients identifiés sont présentés dans le tableau 3. La distribution des contraintes étant non homogène, une procédure d'identification inverse a été mise en place. Le tableau 3 présente la valeur des coefficients du modèle (Fig. 9a) identifiés.

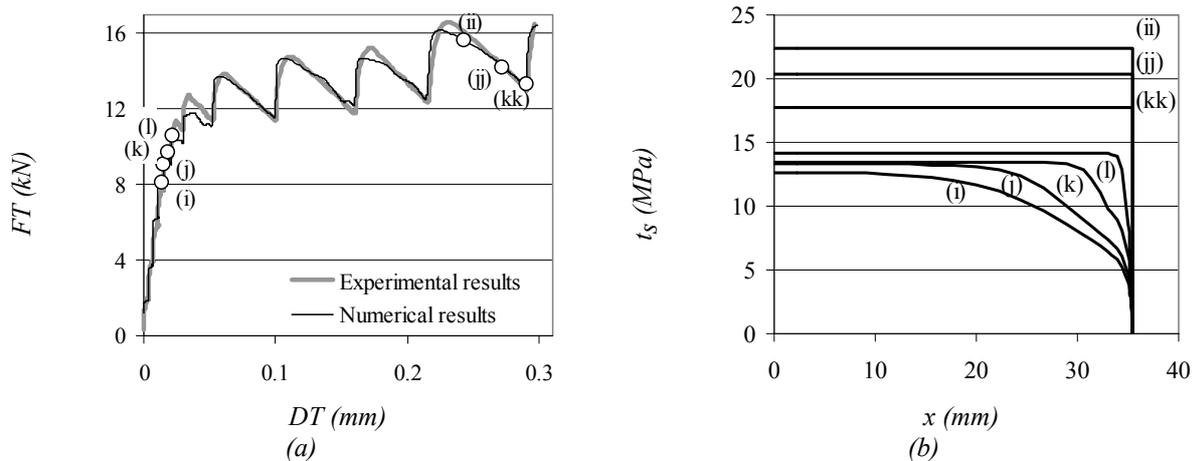


Figure 10: Réponse du modèle de Chase Goldsmith pour un essai de cisaillement de type relaxation-fluage : (a) Diagramme effort déplacement tangentiel, (b) Evolution de la distribution des contraintes dans le plan moyen du joint de colle suivant la demi-longueur de recouvrement.

k_{s1} (N/mm ³)	k_{s2} (N/mm ³)	t_i (MPa)	Y	m
1015	12,5	9,8	40,8	3,8

Tab. 3 : Paramètres matériaux du modèle de Chase-Goldsmith identifiés pour un essai de relaxation-fluage en cisaillement.

4.3. Extension pour des chargements cycliques

Dans un premier temps, afin d'évaluer la pertinence de ce modèle pour décrire les phénomènes visqueux, le modèle a été confronté à des essais cycliques réalisés sur un montage de cisaillement TAST modifié [7]. La figure 11a présente une comparaison entre les prévisions issues du modèle (en rouge) et les résultats expérimentaux (en bleu). Ces deux confrontations mettent clairement en

évidence le potentiel d'un tel modèle rhéologique pour décrire le comportement cyclés d'un adhésif notamment dans le cas d'un nombre de cycles important (fig. 11b).

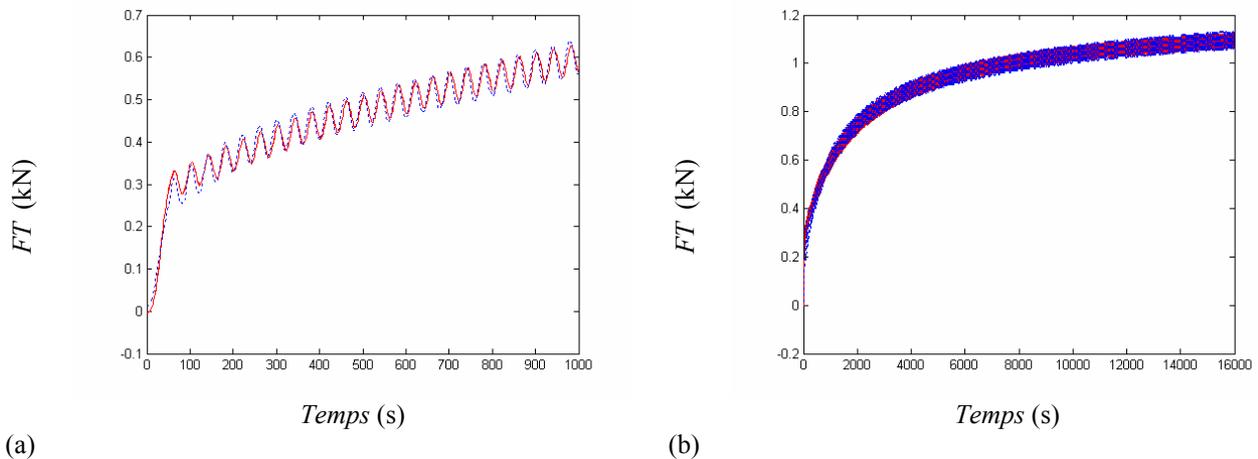


Fig. 11. Courbes effort-déplacement lors d'essais sur éprouvette TAST modifié : (a) 25 cycles, (b) 1 000 cycles.

5. Conclusion

Ce travail présente une approche expérimentale et numérique permettant de décrire le comportement cyclique d'un adhésif dans un joint de colle pour des sollicitations de cisaillement. Des essais de type Arcan modifié avec des géométries visant à limiter les effets de bords ont été réalisés. La mesure du déplacement tangentiel a été réalisée à l'aide d'un dispositif de mesure sans contact en temps réel. Cette stratégie a permis de mettre en évidence l'influence du déplacement total cumulé dans la direction tangentielle comme critère pertinent pour décrire la rupture. L'influence de l'effort moyen ainsi que de l'effort alterné a également été étudié. Ces essais sont à compléter pour caractériser de manière complète la tenue mécanique d'un assemblage collé soumis à des sollicitations cycliques. L'acquisition par le laboratoire d'un moyen plus performant sur la fréquence d'acquisition permettra d'étudier le comportement du joint de colle pour des vitesses de chargement plus grandes et donc des fréquences plus grandes. Par ailleurs le dispositif Arcan modifié permettra aussi de caractériser le comportement d'un joint de colle pour des chargements proportionnels hors plan. L'influence de la contrainte normale pourra donc ainsi être étudiée sur la tenue cyclique d'un assemblage collé. Ces données permettront alors d'alimenter un modèle visqueux de type Chase-Goldsmith afin de décrire correctement le comportement en cisaillement de l'assemblage. Couplé à l'approche développée précédemment au laboratoire et basée sur un modèle élasto-visco-plastique et un formalisme non associé pour prendre en compte la différence de comportement dans la direction normale et tangentielle du joint de colle [4], cette approche numérique devrait permettre de proposer un outil pertinent de dimensionnement des liaisons collées sous sollicitations cycliques.

Références

- [1] A. Graner Solana, A.D. Crocombe and I.A. Aschroft, « Fatigue life and backface strain predictions in adhesively bonded joints ». *Int. J. of Adhesive*, Vol. 30, pp. 36-42, 2010.
- [2] R. D. Adams Adhesive bonding: Science, technology and applications, Woodhead Publishing Limited; 2005.
- [3] J.Y. Cognard, P. Davies, L. Sohier, B. Gineste, « Development of an improved adhesive test method for composite assembly design ». *Comp. Sci. and Technol.*, Vol. 65, pp. 359-368, 2005.
- [4] R. Créac'hcadec, J.Y. Cognard, « 2D modeling of the behavior of an adhesive in an assembly using a non-associated elasto-visco-plastic model ». *J. of Adhesion*, Vol. 85, pp. 239-260, 2009.
- [5] Huntsman™ Structural Adhesives – Araldite® 420 A/B, Publication No A 161, UK 2004.
- [6] D. Leguillon, E. Sanchez-Palancia, *Computation of singular solutions in elliptic problems and elasticity*, Editions Masson, Paris ; 1987.
- [7] J.Y. Cognard, R. Créac'hcadec, « Analysis of the Non Linear Behaviour of an Adhesive in Bonded Assemblies under Shear Loadings. Proposal of an improved TAST test », *J. of Adh. Sci. and Technol.*, Vol. 23, pp. 1333-1355, 2009.