Vieillissement et mise en service des structures collées

A. Gacoin, A. Objois, J. Assih, Y. Delmas et A. Li

Groupe Mécanique, Matériaux, Structure (G.M.M.S.) E.A. 2617, Université de Reims Champagne Ardennes, Moulin de la Housse - BP 1039 51687 Reims cedex 2
alexandre.gacoin@etudiant.univ-reims.fr

RÉSUMÉ. *Ce travail a pour objectif de caractériser et de traduire les effets du vieillissement naturel, associé à des sollicitations répétées, sur le comportement mécanique des structures collées de type sifflet par l'intermédiaire d'une résine époxy. Nous utilisons la grande sensibilité des jauges électriques pour caractériser l'endommagement progressif de nos éprouvettes. Les résultats montrent, que l'endommagement est étroitement lié aux propriétés mécaniques et géométriques des échantillons. L'influence de l'angle de biseautage (33° et 6°) a été étudiée. En effet, le vieillissement a un effet positif sur le seuil d'apparition des premiers endommagements (+25% pour l'angle de 33° et +60% pour l'angle de 6°) des structures collées en sifflet.*

ABSTRACT. *The purpose of this study is to characterize and translate the natural ageing and the repeated requests effects, on mechanical behaviour of bonded structures. Contrary the most part of the experimental studies, which determine the bonded structure resistance in function of the ultimate charge, in this study, the experimental tests uses the great sensitivity of the electric gauges to describe the progressive damage. The results show that damage closely depend on the mechanical and geometrical properties of test specimens. Indeed, ageing has a positive effect on the mechanical strength (+33% for 30% of angle and 60% for 6° of angle of collapse load) and the appearance of the first fissures of bonded damage specimen*

MOTS-CLÉS : *assemblages collés, joints biseautés, expérimentation, extentensométrie, vieillissement des résines époxydes, traction simple, fatigue, endommagement.*

KEYWORDS: *bonded structures, scarf joint, experimentation, extentensometry, adhesive epoxy ageing, simple traction, fatigue, damage.*

1. Introduction

Les assemblages collés sont très présents dans le cadre des réparations et du renforcement des ouvrages d'art du Génie Civil (Delmas, 1985), (Assih, 2001),…,. De nombreuses études ont montré l'influence d'un certain nombre de paramètres tels que l'humidité, la température (Hadavinia *et al*, 2003) sur les performances mécaniques des joints adhésifs. En revanche, l'influence d'un vieillissement naturel sur la résistance des résines époxydes reste mal connue, car elle nécessite de conserver des éprouvettes pendant plusieurs années dans des conditions stables et d'avoir des outils expérimentaux fiables pour obtenir une bonne reproductibilité des essais. Nous nous sommes intéressés à l'étude l'influence du vieillissement naturel sur la résistance mécanique des éprouvettes collées de type sifflet.

2. Corps d'épreuves

Les assemblages collés biseautés présentent de nombreux avantages à savoir une géométrie relativement simple à réaliser ; l'utilisation de faibles épaisseurs de l'ordre de 0,5mm, une bonne tenue en traction car absence de flexion qui empêche la clivage du joint adhésif (Objois, 1999)….

Nous avons utilisé six éprouvettes avec deux angles de biseautage différents (figure1) : 3 éprouvettes avec un angle de biseautage **α=33, et** 3 éprouvettes avec un angle **α=6°**.

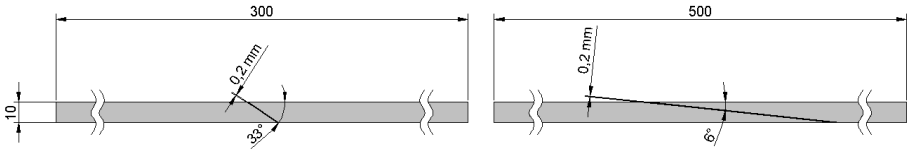

Figure 1. Caractéristiques géométriques des éprouvettes (distance en mm)

Tous les échantillons sont constitués de deux substrats en acier XC18 collés par une résine époxy Eponal 317. Les modules d'élasticité et les coefficients de Poisson des matériaux sont E_{XC18}=210GPa, ν_{XC18}=0,29, E_{EPOXY}=5,8GPa et ν_{EPOXY}=0,3.

L'élaboration des éprouvettes est une phase très importante qui conditionne la résistance de la structure. C'est pourquoi, les substrats biseautés ont été fraisés puis rectifiés. Les surfaces à coller ont été sablées avec le sable dont les grains ont un diamètre moyen est de 7µm, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que les charges contenues dans l'adhésif (Halfaoui *et al.*, 1992), (Gilibert *et al.*, 1982).

3. Procédure expérimentale

3.1. Détermination expérimentale de l'endommagement

L'originalité de ce travail est d'étudier l'évolution de l'endommagement du joint adhésif. Cette technique expérimentale utilise l'extrême sensibilité des jauges électriques afin de mesurer les microdéformations au niveau de la surface externe de l'assemblage collé et les perturbations du champ des déformations induites par les fissures. L'analyse des données s'effectue en trois étapes d'écrites ci-dessous :

Tout d'abord, lorsque le chargement commence à croître les jauges de déformation enregistrent une évolution linéaire F=f(ε). Dans ce cas, aucune perturbation n'est détectée, l'assemblage collé est donc dans son domaine élastique. Ensuite, l'initiation d'une fissure à l'aplomb d'une jauge induit une perturbation locale du champ des déformations qui se caractérise par une perte de linéarité de la courbe F=f(ε). Nous appelons $\mathbf{F_d}$, le seuil d'amorçage des microfissures. Enfin, la propagation des fissures engendre une relaxation des contraintes qui se traduit par un changement de signe de la pente dF/dε. Nous appelons $\mathbf{F_g}$, le seuil où les microfissures commencent à se diffuser. Au-delà du seuil $\mathbf{F_g}$ les fissures se rejoignent pour former des criques qui se propagent rapidement dans la couche adhésive. Le seuil $\mathbf{F_r}$ caractérise la ruine de la structure.

Un diagramme (Figure 3) caractérise l'endommagement progressif dans la portion du joint placée à l'aplomb de la jauge considérée. Parmi tous les seuils $\mathbf{F_d}$ et $\mathbf{F_g}$, les valeurs les plus faibles que nous appelons $\mathbf{F_{dp}}$ et $\mathbf{F_{gp}}$ sont les plus importantes, car elles définissent véritablement la résistance du joint. En effet, la figure4 montre un domaine élastique $\mathbf{0<F<F_{dp}}$, un domaine de croissance des microfissures $\mathbf{F_{dp}<F<F_{gp}}$ et un domaine de propagation des criques $\mathbf{F_{gp}<F<F_r}$.

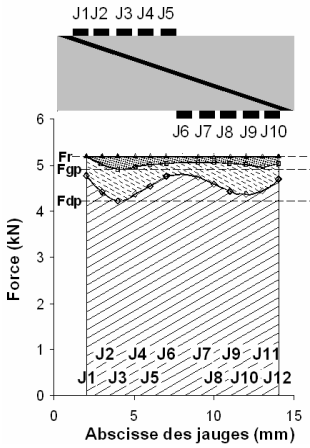

Figure 3. *Diagramme caractéristique de l'évolution de l'endommagement*

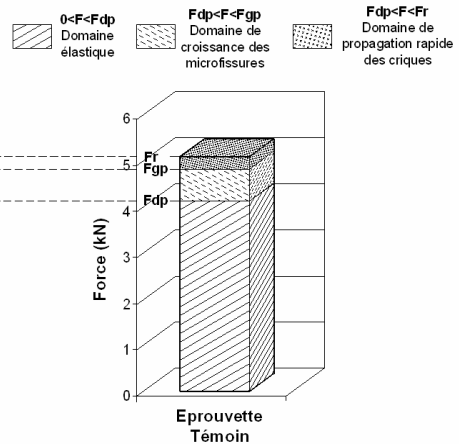

Figure 4. *Histogramme des différents domaines de l'endommagement*

3.2. Position du problème

En 1996, des éprouvettes collées biseautées ont été réalisées dans le cadre d'une étude théorique et expérimentale (Objois, 1998), pour étudier l'influence de l'épaisseur du joint adhésif d'une part et l'influence de l'angle de biseautage d'autre part. La fiabilité des résultats obtenus étant directement liée à la mise en œuvre des échantillons, alors toutes les nouvelles éprouvettes ont été élaborées avec la même procédure de fabrication. Les éprouvettes sont conservées à la température constante de 20°C±2°, avec un taux d'humidité ambiant de 55%±5, à l'abri des chocs et des rayons ultras violets. Nous comparons utilement les résultats des éprouvettes réalisées en 1996 et celles de 2006. Ces éprouvettes sont soumises à un essai de fatigue à une fréquence de 3Hz pendant un million de cycles.

3.3. Résultats des éprouvettes témoins élaborées en 1996 sollicitées en traction

Les résultats reportés dans le tableau 2 représentent les différents seuils caractéristiques de l'endommagement de chaque corps d'épreuve étudié et nous avons représenté les histogrammes correspondants sur la figure 5. Ces essais ont été réalisés sur trois éprouvettes identiques pour les deux séries. La reproductibilité des résultats nous montre que les valeurs obtenues caractérisent de façon fiable l'endommagement de nos éprouvettes.

Seuils d'endommagement		**Eprouvettes témoins (1996)**					
		α=33°			**α=6°**		
Eprouvettes testées		**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
Apparition de la première microfissure	**F_{dp} (kN)**	4,16	4,24	4,3	11,93	11,80	11,72
		4,23±0,07			**11,83±0,11**		
Début de propagation des microfissures	**F_{gp} (kN)**	4,82	5,02	4,86	16,20	16,25	15,75
		4,9±0,1			**16,04±0,25**		
Rupture ultime de l'éprouvette	**F_r (kN)**	5,00	5,34	5,20	17,78	18,51	19,02
		5,18±0,17			**18,77±0,62**		

Tableau 1. *Influence de l'angle biseau α=33° et α=6° sur le comprtement mécanique des éprouvettes témoins élaborées en 1996*

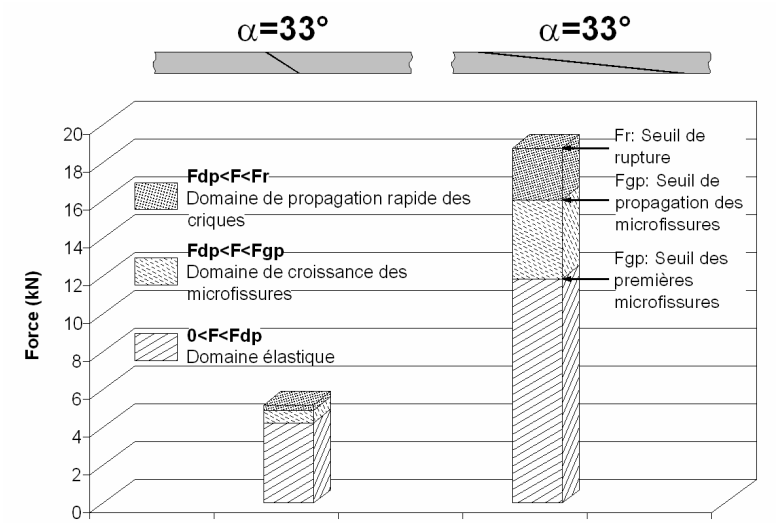

Figure 5. *Histogrammes caractérisant l'évolution de l'endommagement des éprouvettes témoins collées en 1996, testées 30 jours après leur élaboration*

L'endommagement du premier corps d'épreuve **α=33°** montre que les domaines non linéaires (**F_{dp}<F<F_{gp}** et **F_{gp}<F<F_r**) sont très réduits. Probablement, la surface du collage étant faible $S_r=184mm^2$, l'adhésif est fortement sollicitée par de contraintes de décollement. En revanche, la résistance du deuxième corps d'épreuve **α=6°** est clairement supérieure, car la surface de collage est importante $S_r=957mm^2$ et le joint travaille en cisaillement préférentiellement. De plus, la faiblesse de l'angle **α** génère un biseau plus long donc plus souple qui permet à cette éprouvette d'avoir un domaine non linéaire plus étendu. La structure présente ainsi un comportement mécanique global que nous caractérisons comme plus "plastique" (Objois, 2000).

4. Fatigue mécanique après un vieillissement de dix ans

Il s'agit de solliciter les éprouvettes à 80% de la charge du seuil d'amorçage des premières microfissures **F_{dp}**, afin de faire apparaître les premières fissures et de suivre leurs évolutions après un million de cycles. La fréquence est fixée à 3Hz, le rapport entre la force minimale et la force maximale est égale à 0,4. (Mekiri, 1991) a mis en évidence qu'une telle amplitude de charge correspond à la sollicitation maximale que peut supporter la structure pendant un million de cycles. Par conséquence, si le joint adhésif s'est dégradé avec le temps, le million de cycles provoquerait la rupture de celles-ci.

4.1. Observation des premiers résultats

Suite à cet essai de fatigue, aucune rupture précoce n'a été constatée après un million de cycles. Ainsi, avec cette sollicitation non négligeable (80% F_{dp}), la durée de vie de nos assemblage peut-être considérée comme infinie. Cette première constatation, semble montrer que le vieillissement de l'adhésif, dans des conditions stables en température et d'humidité, ne dégrade pas la résine époxy.

5. Confrontation des performances mécaniques

Après un million de cycles, les éprouvettes sont sollicitées de nouveau en traction à une vitesse constance V de 25N.s^{-1}, jusqu'à la rupture. De la même manière que pour les éprouvettes témoins, nous avons relevé les différents seuils d'endommagement de l'adhésif dans le Tableau 5.

Seuils d' endommagement	Eprouvettes α=33°				Eprouvette α=6°			
	Etudiées 2006			Seuils moyens	Etudiée 2006			Seuils moyens
Eprouvettes	1	2	3		1	2	3	
F_{dp} (kN)	5,23	5,34	5,27	**5,3±0,06**	18,73	19,20	19,62	**19,2±0,45**
F_{gp} (kN)	5,36	5,47	5,52	**5,5±0,08**	20,40	22,60	22,30	**21,8±0,95**
F_r (kN)	5,42	5,52	5,65	**5,5±0,11**	22,90	23,30	25,20	**23,8±1,15**

Tableau 5. *Evolution des seuils d'endommagement* F_{dp}, F_{dg} *et* F_r *des éprouvettes avec un biseau* ***α=6°*** *et* ***α=33°*** *en* ***2006****.*

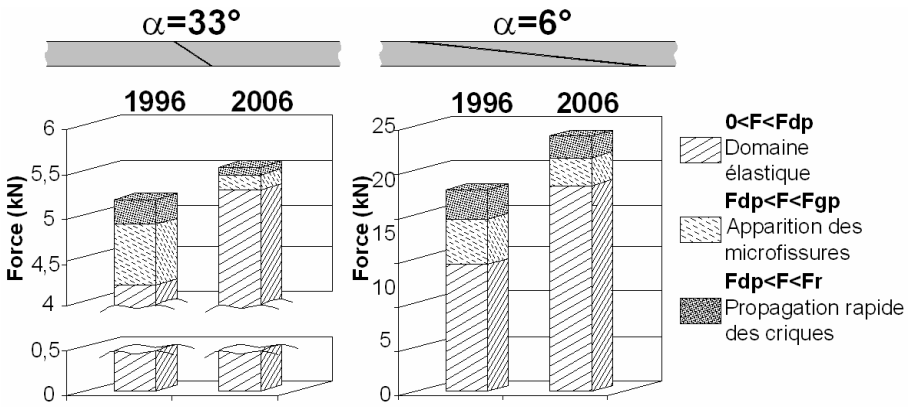

Figure 2. *Histogrammes caractérisant les différents domaines d'endommagement des éprouvettes avec un biseau* ***α=33°*** *et* ***α=6°*** *étudiées en* ***1996*** *et* ***2006***

L'analyse des données extensométriques montre une augmentation des seuils caractéristiques de l'endommagement, après un vieillissement de dix ans. La différence est surtout marquée pour la limite élastique $\mathbf{F_{dp}}$ des éprouvettes qui augmente entre 1996 et 2006 de 25% lorsque **α=33°** et de 60% lorsque **α=6°**.

En revanche, la taille du domaine $\mathbf{F_{dp}<F<F_{gp}}$ qui définit l'amorçage des microfissures dans le joint de colle diminue après le vieillissement de 75% lorsque **α=33°** et de 50% lorsque **α=6°**. Il en est de même pour la taille du domaine $\mathbf{F_{gp}<F<F_r}$ caractérisant la propagation des fissures dans la couche adhésive qui diminue de 72% lorsque **α=33°** et de 40% lorsque **α=6°**.

6. Interprétations

Les éprouvettes étudiées en 2006 ont une résistance à l'endommagement qui augmente significativement. En effet, les données expérimentales montrent que les domaines non linéaires diminuent au profit des domaines élastiques ce qui caractérise un comportement mécanique plus rigide. Cette constatation est vérifiée pour les deux géométries mais elle est moins marquée lorsque l'angle de biseautage est faible **α=6°**. Cela s'explique probablement par la plus grande souplesse du biseau qui permet de ralentir la propagation des microfissures après leurs apparitions.

La fatigue peut-être un élément qui intervient dans l'augmentation de la rigidité des corps d'épreuve. La sollicitation cyclique exercée pendant 10^6 cycles avec un niveau de charge non négligeable $80\%F_{dp}$, peut provoquer certaines modifications microscopiques au sein du joint adhésif, telles que des mouvements entre les macromolécules qui induisent une réorganisation de celles-ci.

Nous pensons que cette réorganisation au sein même de la couche adhésive, associée à une augmentation de la rigidité induite par le vieillissement permettrait une distribution des contraintes plus homogènes dans le joint de colle. Ce degré d'adaptabilité de la couche adhésive semble augmenter ses performances en retardant de ce fait l'amorçage des premières microfissures.

7. Conclusions

Dans ce travail expérimental nous avons étudié des éprouvettes collées biseautées soumises à un vieillissement naturel de dix ans d'une part et à une fatigue mécanique de 3 Hz pendant 10^6 cycles d'autre part. Ces deux sollicitations sont le reflet de ce que peut supporter une structure collée dans un environnement industriel.

La reproductibilité des résultats, permet de déterminer avec une fiabilité très satisfaisante l'évolution de l'endommagement de nos échantillons. Bien qu'il soit admis que les résines époxy conservent une stabilité dimensionnelle avec le temps, l'analyse des histogrammes qui caractérisent l'évolution de l'endommagement en

fonction de l'âge et de la géométrie des éprouvettes, montrent que les performances mécaniques de l'adhésif évoluent.

Nous avons pu mettre en évidence que le vieillissement associé à une fatigue cyclique contrôlée diminue les domaines non linéaires des assemblages et augmentent significativement les seuils caractéristiques de l'endommagement. Le seuil Fdp qui caractérise l'amorçage des premières microfissures représente la véritable limite mécanique des structures collées. L'analyse de ce seuil permet d'évaluer l'augmentation globale des résistances mécaniques à 25% lorsque α=33° et à 60% lorsque α=6°. Ainsi, un vieillissement naturel dans des conditions optimales d'humidité et de température est un facteur favorable qui augmente la résistance d'une structure collée assemblée par une résine époxy.

8. Bibliographie

Assih J., Li A., Delmas Y., Strengthened Concrete beams by gluing carbon fiber composite sheet : application of damage theory,. Composites in Constructions. pp.623-628, 2001.

Delmas Y., Contribution à l'étude théorique et expérimentale du collage de tubes métalliques par l'intermédiaire de résine époxydes, Thèse de Doctorat, Université de Reims, 1985

Gilibert Y., "Influence of surface roughness on mechanical properties of joints", *American Chemical Society, 184th National Meeting, Kansas City, Organic Coatings and Applied Polymer Science Proceedings, American Chemical Society*, 47, PP. 84-86, 12-17 Sept 1982.

Hadavinia H., Kinloch A.J., The prediction of crack growth in bonded joints under cyclic-fatigue loading, International Journal of Adhesion and Adhesives 23 449-4461, 2003.

Halfaoui S, Gilibert Y., "Influence de la rugosité sur la résistance mécanique d'un assemblage collé en sifflet sollicité en traction et en fatigue" *Xème rencontre Universitaire de Génie Civil (AUGC)*, Cachan 1992.

Mekiri L. "Contribution à l'étude du comportement mécanique fin d'assemblage à simple recouvrement du type sifflet, sollicité en traction simple et en fatigue" Thèse de doctorat spécialité : Mécanique. Université de Paris VI, 1991.

Objois A. ; Fargette B. ; Gilibert Y. "The influence of the bevel angle on the micro-mechanical behaviour of bonded scarf joints.", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 14, No. 8, pp. 1057-1070, 2000.

Objois A., Etude théorique et expérimentale du comportement mécanique fin de la structure collée de type sifflet, Thèse de doctorat spécialité : Mécanique. Université de Reims 1998.

Objois A., Gilibert Y., Fargette B., "Theoretical and experimental analysis of the scarf joint bonded structure: influence of the adhesive thickness on the fine mechanical behaviour", *Journal of Adhesion*, vol. 70, pp. 13-32, 1999.