

#### **UFR Sciences Exactes et Naturelles**

Ecole doctorale Sciences Technologies Santé

## Thèse de DOCTORAT

Spécialité Génie Civil

Présentée par

**Alexandre GACOIN** 

# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT MICROMÉCANIQUE DES LIAISONS COLLÉES DE TYPE SIFFLET ET DOUBLE SIFFLET

Soutenue publiquement à l'Université de Reims Champagne Ardenne

Le 10 juillet 2007

#### Devant le Jury :

Président	Alain	BASCOUL	:	Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse III
Rapporteurs	François	BUYLE-BODIN	:	Professeur à l'Université de Lille I
	Jean-François	DESTREBECQ	:	Professeur à l'Université de Clermont Ferrand II
Directeur	Yves	DELMAS	:	Professeur à l'Université de Reims
Examinateurs	Richard	CABRILLAC	:	Professeur à l'Université de Cergy-Pontoise
	Jules	ASSIH	:	Maître de Conférences à l'Université de Reims Champagne Ardenne
	Anthony	OBJOIS	:	Maître de Conférences à l'Université de Reims Champagne Ardenne

#### REMERCIEMENTS

Au terme de ces trois années passées au GMMS, je suis heureux d'exprimer ma reconnaissance et mes remerciements à tous ceux qui ont contribué au bon déroulement de mes travaux.

Ce travail de thèse a été effectué au sein du laboratoire du Groupe de Mécanique Matériaux et Structures (GMMS) de l'UFR Sciences de Reims, sous la direction de Monsieur Yves DELMAS, Professeur à l'université de Reims Champagne Ardenne et directeur de l'IUT de Reims – Châlons - Charleville.

Qu'il me soit permis d'exprimer ici ma reconnaissance et mes remerciements les plus sincères à Monsieur DELMAS, pour le temps qu'il a bien voulu m'accorder malgré les hautes responsabilités que ses fonctions exigent. Les nombreux conseils et son soutien ont, pour beaucoup, contribué au bon déroulement de mes travaux.

Je souhaite également remercier Messieurs Anthony OBJOIS et Jules ASSIH, Maître de Conférences à l'université de Reims Champagne Ardenne, pour m'avoir encadré durant ces trois dernières années. Dans les différentes étapes de ma thèse ils m'ont fait bénéficier de leurs expériences et connaissances scientifiques. Je les remercie également d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Je remercie les Professeur Ying Qiao GUO, directeur du GMMS et Alex LI directeur du Laboratoire de Génie Civil, de m'avoir accueilli et d'avoir mis à ma disposition tout le matériel nécessaire à la réalisation de mes expériences.

Je suis très reconnaissant envers les membres extérieurs, de mon jury de thèse d'accepter de juger mon travail :

Monsieur Alain BASCOUL, Professeur à l'université Paul Sabatier de Toulouse III qui me fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Monsieur Richard CABRILLAC, Professeur de l'Université Cergy-Pontoise responsable du Laboratoire de mécanique et matériaux du Génie Civil (L2MGC) qui a accepté d'examiner et de juger mes travaux.

Monsieur François BUYLE-BODIN Professeur de l'Université de Lille et Monsieur Jean-François DESTREBEC, Professeur de l'Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand qui ont accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs.

Les parties numériques et thermiques de ce travail n'auraient pu être réalisées sans l'aide précieuse de Philippe LIESTRIEZ, Maître de conférences au laboratoire de Modélisation Numérique du GMMS et Hervé PRON, Maître de conférences au laboratoire de Thermophysique de l'Unité de Thermique et Analyse Physique de Reims. Je les remercie très sincèrement pour leur disponibilité et leurs conseils avisés.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du personnel technique du département Génie Civil, Génie Mécanique et Thermophysique et tout particulièrement à Patrick JUPILLAT, Jean Marc LOINTIER, Pascal VISEE et Didier CARON pour leur aimable et efficace contribution.

Je remercie le Professeur Jean Pierre TROALEN, directeur du département Génie Civil et Christian BRUMBRUCK puis Antony OBJOIS directeur du département Génie Emballage et Conditionnement qui m'ont donné la joie d'enseigner au sein de l'IUT de Reims.

Je terminerai en exprimant ma reconnaissance la plus sincère à mes proches, collègues et amis : ma famille, Henriette, Xavier, Loubna, Hanane, Cheikhna, Ismaël, Todor, Affef, Jie....

# TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	
CHAPITRE I	15
I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	17
I.1. Le collage structural	17
I.2. Pourquoi étudier les assemblages collés en sifflet et double sifflet ?	
I.3. L'assemblage collé de type sifflet	
I 3 1 Influence des paramètres mécaniques	20
I.3.1.1. Rugosité des subjectiles	
I.3.1.2. Nature des substrats	21
I.3.2. Influence des paramètres géométriques	
I.3.2.1. Epaisseur de l'adhésif	
I.3.2.2. Angle de biseautage	
L3.3. Essais mécaniques	
I.3.3.1. Choc mécanique	
I.3.3.2. Fatigue	
I.4. Calculs analytiques des joints adhésifs de type sifflet	
I.4.1. Méthodes analytiques existantes	
I.4.2. Déformation de la surface externe du couvre-joint	
I.4.2.1. Méthode Analytique élaborée par S. HALFAOUI	
I.4.2.2. Notations	
I.4.2.3. Hypothèses	
1.4.2.4. Resolution analytique	
I.4.3. Répartition des contraintes dans le joint adhésif	
I.4.3.1. Méthode Analytique élaborée par A. WASSIAMA	
1.4.3.2. Notations	
I.4.5.5. Hypoineses I A 3 A Résolution analytique	
$I_{A} = S_{a}$ Symthèse des régultats analytiques	24
I.4.4. Synthèse des resultats anarytiques	
- Jana - Tana 200 Jana	
I.5.1.1. Introduction	
I.5.1.2. Principaux résultats numériques du joint collé biseauté	
I.6. Conclusions sur l'étude bibliographique	

CHAPITRE	Е П	
II. PRESEN MESURES.	NTATION DES CORPS D'EPREUVES ETUDIES ET TECH	NIQUES DE 43
II.1. Corp	ps d'épreuves	
II.1.1.	Présentation des assemblages	
II.1.2.	Avantages des résines utilisées	
II.1.3.	Propriétés mécaniques des composants	
II.1.3 II.1.3	3.1.       Substrats         3.2.       Adhésifs	
II.1.4.	Elaboration des éprouvettes	47
II.1.4	4.1. Usinage par électroérosion à fil	
11.1.4 II.1.4	4.2. I raitement de surjace des subjectites 4.3. Assemblage par collage	
II.2. Disp	positifs expérimentaux	51
II.2.1.	Machine de traction et système d'ancrage	
II.2.1	1.1. Machine de traction	
II.2.1	1.2. Mors rotulés	
II.2.2.	Technique de mesure	
II.2.2	2.1. Caractéristiques des chaînettes de jauges	
II.2.2 II.3. Déte	ermination expérimentale de l'endommagement	
II.3.1.	Analyse des données extensométriques	
II.3.2.	Diagramme d'endommagement du joint adhésif	
IL 3.3	Du diagramme à l'histogramme	57
	volucione	50
11.4. Con	(10,510,11,5	······
CHAPITRE	Е III	61
III. ETUD NATUREL	DE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DU VIEILI . SUR L'ENDOMMAGEMENT DES JOINTS ADHESIFS BISE	LISSEMENT AUTES 63
III.1. Intr	roduction	
III.2. Ana	alyse du comportement mécanique du joint adhésif en 1996	65
III.2.1.	. Corps d'épreuve étudiés	65
<i>III.2</i> .	1.1.1. Remarque préliminaire	
III.2.	1.2. Matériaux constituants les éprouvettes	
III.2.2.	Résultats des essais de traction réalisés en 1996	
<i>III.2</i> .	2.2.1. Instrumentation des corps d'épreuves	

<i>III.2.2</i>	.2.	Endommagement des joints adhésifs étudiés en 1996	67
III.2.3.	Inter	prétations	68
III.3. Anal	yse du	ı comportement mécanique du joint adhésif en 2006	68
III.3.1.	Essa	is de fatigue	68
III.3.1	.1.	Paramétrage des essais de fatigue	68
III.3.1	.2.	Interprétation théorique de l'influence de la fatigue	70
III.3.1	.3.	Présentation des cycles de charge décharge à vitesse réduite	71
III.3.1	.4.	Présentation des déformations le long des couvre-joints	71
III.3.1	.5.	Interprétations des résultats	74
III.3.2.	Essa	is de traction : endommagement des joints adhésifs étudiés en 2006 :.	75
III.3.2	2.1.	Eprouvettes biseautées avec un angle $\alpha = 33^{\circ}$	76
III.3.2	.2.	<i>Eprouvettes biseautées avec un angle</i> $\alpha = 6^{\circ}$	78
<i>III.3.2</i>	.3.	Comparaison des résultats entre 1996 et 2006	80
III.3.3.	Inter	prétations	82
III.4. Cond	clusior	18	83

IV.1. Introdu	ction	87
IV.1.1. M	odèle d'endommagement	88
IV.2. Paramè	tres de la modélisation	90
IV.2.1. C	noix de l'éprouvette expérimentale de référence	90
IV.2.2. H	ypothèses	90
IV.2.3. Ro IV.2.3.1. IV.2.3.2. IV.2.3.3.	ecalage du modèle numérique Conditions aux limites Influence du maillage Influence de la vitesse de montée en charge	91 91 92 92
IV.2.3.4. adhésif	Influence de la limite d'élasticité en fonction de l'épaisseur du joint 93	
IV.2.4. C	onclusion sur le recalage du modèle numérique	94
IV.3. Confron	tation des résultats expérimentaux et numériques	95
IV.3.1. In IV.3.1.1. des couvr	fluence de la nature des substrats Résultats expérimentaux et numériques des déformations superficiell e-ioints	95 les 95
IV.3.1.2. des joints	<i>Résultats expérimentaux et numériques de l'endommagement progre adhésifs</i>	ssif 97
IV.3.2. In	fluence de l'épaisseur du joint adhésif	98

IV.3.2.1.	Résultats expérimentaux et numériques des déformation	s superficielles
des couvre	e-joints	
IV.3.2.2.	<i>Etude d'un cas extrême <math>e_i = 5mm</math></i>	
IV.3.2.3.	Résultats expérimentaux et numériques de l'endommage	ement progressif
des joints d	adhésifs	
IV.3.3. Inf	luence de l'angle de biseautage	
IV.3.3.1.	Résultats expérimentaux et numériques des déformation	s superficielles
des couvre	e-joints	
IV.3.3.2.	Résultats expérimentaux et numériques de l'endommage	ement progressif
du joint co	ollé	
IV.4. Conclusi	ons	

CHAPITRE V	107
V. ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DES LIAISONS COLLI TYPE DOUBLE SIFFLET	EES DE 109
V.1. Introduction	109
V.2. Etude expérimentale de l'endommagement des joints adhésifs	110
V.2.1. Corps d'épreuve étudiés	111
V.2.2. Instrumentation des assemblages de type sifflet et double sifflet	112
<ul> <li>V.2.3. Analyse des courbes extensométriques et diagrammes d'endommagem assemblages de type sifflet</li> <li>V.2.3.1. Assemblages biseautés avec un angle de 33°</li> <li>V.2.3.2. Assemblages biseautés avec un angle de 18°</li> <li>V.2.3.3. Assemblages biseautés avec un angle de 6°</li> <li>V.2.4. Analyse des courbes extensométriques et diagrammes d'endommagem</li> </ul>	ent des 113 114 116 118 ent de
l'assemblage de type double sifflet	120
V.2.4.1.Assemblage double sifflet avec un angle de 35V.2.4.2.Assemblage double sifflet avec un angle de 18°V.2.4.3.Assemblage double sifflet avec un angle de 6°	122 122
V.2.5. Influence du Vé interne sur les seuils d'endommagement $Fd_p$ et $Fr$	126
V.2.6. Interprétations des résultats expérimentaux	127
V.3. Confrontation des seuils <i>Fd<sub>p</sub></i> et <i>Fr</i> théoriques et expérimentaux	129
V.3.1. Remarques préliminaires	129
<ul> <li>V.3.2. Paramétrage de la modélisation</li> <li>V.3.2.1. Comparaison des seuils d'endommagement Fd<sub>p</sub> et Fr expérimento les prédictions numériques</li> <li>V.3.2.2. Interprétations</li> </ul>	130 wx avec 130 134
V.4. Approche thermique de l'assemblage collé de type double sifflet	135
V.4.1. Outils expérimentaux et principe des mesures	135

V.5. Conclus	sions	147
<i>V.4.3.3</i> .	Interprétations et discussions des résultats	145
<i>V.4.3.2</i> .	Résultats des amplitudes thermiques	144
<i>V.4.3.1</i> .	Réalisation des essais	141
V.4.3.	Influence d'une traction sinusoïdale : étude thermoélasticimétrique	141
<i>V.4.2.2</i> .	Interprétations et discussion	140
<i>V.4.2.1</i> .	Réalisation des essais	138
V.4.2.	Influence d'une traction simple : essai thermographique	
<i>V.4.1.2</i> .	Principe de la thermographie	
<i>V.4.1.1</i> .	Outils expérimentaux	

# 

BIBLIOGRAPHIE	
References	
Brevet	

NEXES167
----------

# **INTRODUCTION GENERALE**

# **Introduction Générale**

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, les premières colles à base de nitrocellulose apparaissent et permettent l'assemblage de matériaux de construction, sans l'utilisation de moyens mécaniques. En raison de progrès décisifs dans le domaine de la chimie macromoléculaire, les bases des techniques modernes du collage ont été mises en place.

Le collage a tiré partie du développement de l'industrie aéronautique en temps de guerre. En effet, c'est en 1949 que sont introduites les colles sur base de Néoprène. Pour des raisons de manque de matières premières telles que l'acier, les constructeurs américains et anglais ont du utiliser cette technique pour la fabrication d'éléments de structure d'avions en bois, en grandes séries.

Après la seconde guerre mondiale, le collage a pris son essor. Le développement de nouveaux produits chimiques a apporté de nouvelles propriétés d'adhérence et de durcissement nécessaires au contrôle de la prise des colles. Cela a permis d'adapter cette technique d'assemblage à d'autres applications.

Aujourd'hui, le collage connaît un grand développement dans le domaine du Génie Civil. Cette technique est par exemple utilisée pour connecter des matériaux composites sur des structures en béton, dans le but de les réparer ou de les renforcer, elle permet également de concevoir des structures mixtes (dalle en béton sur profilé métallique).

En France, les ouvrages d'art du génie civil sont généralement conçus pour avoir une durée de vie supérieure à 100 ans. Cependant, des erreurs de conception, une sous évaluation des contraintes extérieures ou un vieillissement des matériaux en milieux sévères peuvent endommager de façon précoce ces ouvrages d'art. J.A. CALGARO [7], a réalisé une étude sur l'état des ponts du parc français. Après avoir répertorié les ponts en trois classes, il s'avère que 50% sont en bon état apparent, 35% présentent des défauts mineurs, 15% ont une structure endommagée qui nécessite des réparations ou un renforcement urgent.

C'est pourquoi, depuis de nombreuses années l'équipe Génie Civil du GMMS étudie entre autre, le renforcement des structures en béton, par collage de matériaux composites [8-11]. La liaison de ces deux matériaux, généralement assurée par l'intermédiaire d'une résine époxydique, devient alors une zone particulièrement sensible de la structure. Cette étude contribue à la compréhension des phénomènes mécaniques qui se produisent à l'échelle microscopique dans les joints adhésifs. Les phénomènes locaux qui sont parfois contradictoires et paradoxaux, sont fondamentaux car ils conditionnent ensuite le comportement mécanique global de la liaison colle-substrats et donc celui de toute la structure.

Dans notre étude, des éprouvettes collées de type sifflet et double sifflet ont été élaborées et testées, afin d'étudier le comportement micromécanique des systèmes jointifs. Les corps d'épreuve sont de part leur configuration (taille restreinte, bonne connaissance des caractéristiques mécaniques des composants) des modèles expérimentaux très efficaces pour isoler, mesurer et expliquer les phénomènes physiques, géométriques et mécaniques qui régissent l'endommagement des joints adhésifs. En outre, les singularités angulaires marquées des extrémités des substrats, permettent d'étudier d'un point de vue expérimental et numérique, l'influence de la géométrie sur l'initiation des premières microfissures.

L'objectif de nos travaux est de caractériser les performances mécaniques des liaisons collées en considérant non pas seulement la rupture ultime mais également en considérant toutes les étapes de l'endommagement. Pour cela, nos études expérimentales utilisent la grande sensibilité des jauges électriques afin de mesurer d'une part, les microdéformations au niveau de la surface externe de nos structures et d'autre part, les perturbations du champ de déformations induites par les fissures. L'étude numérique permet quand à elle une bonne complémentarité avec les résultats expérimentaux et pour certaines géométries plus complexes, il est intéressant de savoir si la prédiction est conforme au comportement réel. Enfin, dans le but de vérifier certains résultats relatifs à la liaison collée de type double sifflet, nous serons également amenés à effectuer une étude thermoélasticimétrique.

L'objectif final de ce travail est d'intégrer de nouveaux paramètres expérimentaux pour réaliser une modélisation numérique du comportement mécanique de ces structures, dans le but de transposer les résultats à des cas réels plus élaborés (renforcement des ouvrages d'art, structures mixtes acier/béton...).

Ce mémoire est divisé en 5 parties :

La première partie est une étude bibliographique des principaux résultats expérimentaux, analytiques et numériques obtenus lors d'études réalisées sur les assemblages collés de type sifflet. Nous présentons tout d'abord l'influence des principaux paramètres mécaniques, à savoir la rugosité des subjectiles et la nature des substrats, puis celles des principaux paramètres géométriques tels que l'épaisseur du joint adhésif et l'angle de biseautage. Nous développons ensuite les études analytiques qui nous semblent les plus abouties pour caractériser le comportement mécanique de l'assemblage collé en biseau. Enfin, nous présentons des résultats récents sur l'étude numérique des systèmes jointifs biseautés.

La seconde partie présente les caractéristiques géométriques et mécaniques des corps d'épreuves étudiés, les différents stades de leurs élaborations et les outils expérimentaux mis en oeuvre. Nous y développons également le mode opératoire des essais mécaniques et l'interprétation des résultats extensométriques. Le mode opératoire des essais thermoélasticimétriques n'est pas décrit ici. Pour un meilleur enchaînement des travaux ce dernier point est développé au Chapitre V.

La troisième partie de notre étude a pour objectif de caractériser et d'interpréter les effets d'un vieillissement naturel de 10 ans, sur la résistance d'assemblages collés de types sifflet avec deux angles de biseautage différents ( $\alpha$ =33° et  $\alpha$ =6°) et assemblés par l'intermédiaire d'une résine époxy *EPONAL 317*<sup>®</sup>. Les résultats montrent que le vieillissement des joints adhésifs dans des conditions stables en température et en humidité a un effet positif sur le seuil d'apparition des premiers endommagements et donc sur la rupture ultime de la couche adhésive. Ce travail permet d'étudier la durabilité d'ouvrages collés, destinés à une utilisation où le taux d'humidité en service reste constant.

Le quatrième chapitre, est une étude numérique qui utilise le logiciel de calcul par éléments finis *ABAQUS*<sup>®</sup>. Cette étude nous permet de mieux interpréter des résultats expérimentaux en faisant varier certains paramètres géométriques, tels que l'épaisseur du joint adhésif, ou mécanique, tels que la rigidité des substrats et du joint de colle. Après avoir vérifié la cohérence du modèle numérique avec les résultats expérimentaux issus de notre base de données, nous y présentons certains résultats dans les zones difficilement accessibles expérimentalement.

La cinquième partie de notre travail présente l'influence de la géométrie des subjectiles (sifflet et double sifflet) sur le comportement mécanique fin des éprouvettes étudiées. Les résultats montrent qu'il existe une limite géométrique à partir de laquelle, les performances mécaniques de la structure collée de type sifflet sont meilleures. En effet les angles aigus et obtus présents dans la structure double sifflet induisent des concentrations de contraintes importantes qui provoquent l'initiation précoce des premières microfissures. Un travail expérimental, réalisé en collaboration avec le laboratoire Thermophysique (LPT) appartenant à l'Unité de Thermique et d'Analyse Physique (UTAP) de l'Université de Reims, a été réalisé et comparé aux résultats extensométriques. Dans cette étude nous avons étudié au moyen d'une caméra Infra Rouge le rayonnement thermique émis par une structure collée de type double sifflet soumise à différentes sollicitations (traction simple et fatigue). Ce travail permet de dresser une cartographie thermoélasticimétrique en tous points de la zone observée afin de d'établir la répartition des contraintes et si possible d'enregistrer les effets thermiques induits par l'endommagement du joint adhésif.

# **CHAPITRE I**

# **Etude bibliographique**

# I. Etude bibliographique

L'objet de ce chapitre est de rappeler les principaux résultats expérimentaux, analytiques et numériques de la littérature, relatifs aux assemblages collés de type sifflet.

Après une présentation rapide du collage structural, nous aborderons dans la première partie de ce chapitre tous les points géométriques et mécaniques ainsi que l'influence du mode de sollicitation qui conditionnent la résistance de l'assemblage collé de type sifflet.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons les études analytiques, relatives à l'assemblage de type sifflet. Ces études réalisées par S. HALFAOUI et A. WASSIAMA reposent sur la méthode des développements asymptotiques. Les équations déterminées par ces auteurs permettent de prédire, dans le domaine élastique, l'évolution des déformations sur la surface externe des couvre-joints et le champ des contraintes principales existant dans le plan du joint adhésif.

Enfin la troisième partie présente quelques travaux numériques récents, réalisés sur les assemblages collés biseautés. Nous verrons que les modèles numériques actuels permettent d'obtenir une prédiction fiable de la rupture ultime des joints adhésifs. Mais la rupture ultime est–elle un paramètre suffisant pour caractériser complètement le comportement mécanique complexe des assemblages collés ?...

# I.1. Le collage structural

Le mode d'assemblage par collage est une solution alternative efficace, face aux procédés d'assemblages conventionnels, il possède de nombreux avantages:

 Répartition homogène des contraintes: Les techniques d'assemblage qui font intervenir des connecteurs traditionnels de type rivets, vis,..., modifient, voire détruisent les substrats et induisent des concentrations de contraintes locales qui sont préjudiciables pour la tenue des pièces dans le temps. L'assemblage par collage forme un joint qui assure généralement une bonne continuité des efforts et une meilleure répartition des contraintes.

- *Gain de poids* : La suppression des pièces d'assemblage traditionnelles permet également un abaissement de poids non négligeable. Dans le domaine aéronautique par exemple, les assemblages collés permettent d'alléger de 20% le poids des avions.
- Assemblage de matériaux très minces : Il permet d'assembler des matériaux minces, qui ne pourraient pas être assemblés par rivets ou vis par exemple ou des matériaux de nature trop différentes (impossibles à souder) tels que l'aluminium sur le titane, métaux sur les plastiques,....
- *Atténuation des vibrations :* Cette méthode d'assemblage a des propriétés antivibratoires donc insonorisantes si l'épaisseur du joint est suffisante (par exemple, collage de raidisseurs de capot et de portes en construction automobile).
- *Design* : Du point de vue esthétique, l'assemblage est peu visible et on peut obtenir des pièces à l'aspect lisse, sans sur épaisseurs.

Cependant l'assemblage par collage présente aussi quelques inconvénients qu'il ne faut pas ignorer pour mieux les prévenir. Outre l'indémontabilité de la liaison et sa sensibilité face aux facteurs environnementaux (humidité, température,...) la technique d'assemblage est assez complexe à mettre en œuvre et demande une bonne connaissance de la théorie de l'adhésion (théorie complexe et encore incomplète). De plus, la résistance mécanique des structures collées dépend fortement du mode de chargement. Il est donc nécessaire de bien concevoir la liaison collée dans le but d'éviter certaines sollicitations préjudiciables. Les quatre modes de chargement sont représentés sur la Figure I-1, ci-dessous.



#### Figure I-1 : Différents modes de chargement supportés par les systèmes jointifs

La résistance d'un assemblage collé est maximale, si l'ensemble de la structure travaille de façon homogène. C'est pourquoi, il est nécessaire que les contraintes soient réparties sur toute la surface de collage. Il est important d'éviter (autant que possible), les zones de concentration de contraintes, ainsi, plus que l'arrachement, le pelage doit toujours être évité.

Parmi les principaux types de liaisons collées Figure I-2, les assemblages à simple ou double recouvrement et le type tenon mortaise ont été particulièrement étudiés [1-6]. Le simple recouvrement peut prendre différentes formes : on trouve le recouvrement en escalier simple en sifflet, en bout.



# I.2. Pourquoi étudier les assemblages collés en sifflet et double sifflet ?

Les assemblages qui permettent de minimiser les concentrations de contraintes et qui ne favorisent pas l'apparition du clivage sont peu nombreux. Cependant les études effectuées sur l'assemblage collé de type sifflet montrent que ce type d'éprouvette offre des performances mécaniques tout à fait satisfaisantes notamment en traction et en fatigue.

De plus, la géométrie des subjectiles est simple à usiner et contrairement à certaines géométries (escalier, escalier simple, tenon mortaise) ne conditionne pas la future épaisseur de joint adhésif. Cela nous permet d'étudier ses performances mécaniques pour un nombre quasi illimité de configurations géométriques.

L'assemblage collé de type double sifflet présente de nombreuses similitudes avec la structure collée de type sifflet mais contrairement à cette dernière, l'assemblage collé de type double sifflet reste mal connu car les angles aigus et obtus au voisinage des extrémités et au sommet du Vé, rendent l'étude de son comportement mécanique difficile à appréhender. Pourtant la variation de l'angle de biseautage pour ces deux types d'éprouvettes (sifflet et double sifflet) est un paramètre géométrique qui nous permet d'étudier l'influence d'une singularité géométrique (Vé interne), sur l'apparition des premières microfissures dans le joint adhésif.

# I.3. L'assemblage collé de type sifflet

Les résultats des très nombreux essais réalisés sur cet assemblage ont permis de caractériser les différents paramètres qui influent sur la résistance à l'endommagement des joints adhésifs biseautés. Les données acquises sont développées dans ce paragraphe.

# I.3.1. Influence des paramètres mécaniques

De l'élaboration des éprouvettes aux essais expérimentaux, toutes les étapes conditionnent la résistance de la structure. Dans notre étude, nous nous appuierons principalement sur les résultats issus des travaux de Y. GILIBERT, A. OBJOIS, L. MEKIRI et S. HALFAOUI pour caractériser au mieux nos assemblages.

# I.3.1.1. <u>Rugosité des subjectiles</u>

L'état de surface est un facteur important qui conditionne la bonne adhésion entre l'adhésif et le substrat. C'est pourquoi, son étude a été développée par plusieurs chercheurs [12-15]. S'il est clairement établi que la résistance mécanique des assemblages collés est maximale pour une rugosité bien définie, ce paramètre n'est pas facile à appréhender car il dépend de la nature des matériaux utilisés (substrats et adhésifs). L'étude effectuée par S. HALFAOUI [15] nous intéresse particulièrement car elle met en évidence l'influence de la rugosité des subjectiles, sur la résistance mécanique des assemblages de type sifflet. L'auteur utilise différents types de sables, projetés avec une pression variable pour modifier l'état de surface des subjectiles. Les résultats montrent que tous les seuils caractéristiques de l'endommagement du joint adhésif (les seuils d'amorçage des microfissures en régime stable, le début de formation des criques en régime instable et la limite de rupture), ont les valeurs les plus élevées, lorsque la rugosité des surfaces correspond au diamètre moyen des charges minérales contenues dans la résine époxy.

# I.3.1.2. Nature des substrats

Z.Q. QIANG et A.R. AKISANYA [16] ont étudié le champ des contraintes qui se développent au niveau de l'interface, entre le joint de colle et l'extrémité des biseaux d'un assemblage collé de type sifflet. Les auteurs proposent une expression de la forme  $Hr^{\lambda-1}f(i,j)$ où  $\lambda$ -1 est l'ordre des contraintes dans les zones géométriques singulières, H détermine l'amplitude du champ des contraintes dans la zone singulière et f(i,j) des fonctions non linéaires. Plusieurs combinaisons d'assemblages sont étudiées en faisant varier la nature des matériaux et l'angle de biseautage. Il apparaît que la concentration des contraintes à l'extrémité du biseau est maximale lorsque la différence de rigidité entre l'adhésif et le substrat est importante. Nous verrons que les résultats expérimentaux que nous avons obtenus ne valident pas cette conclusion.

# I.3.2. Influence des paramètres géométriques

L'influence de l'épaisseur du joint de colle  $e_j$  et de l'angle de biseautage  $\alpha$ , sur le comportement mécanique fin de l'assemblage collé de type sifflet a été réalisé dans des travaux antérieurs [17, 60 et 61]. Dans ces travaux, les éprouvettes sont constituées de substrats en acier XC18 assemblés par l'intermédiaire d'une résine époxy *EPONAL 317*<sup>®</sup> et sont sollicitées en traction simple.

Les résultats expérimentaux portent principalement sur l'amorçage des premières microfissures et sur les déformations superficielles des substrats. La fiabilité des résultats expérimentaux, obtenus par extensométrie, est confirmée par émissions acoustiques réalisées en parallèle. Les résultats, développés ci-dessous, montrent l'influence prépondérante de l'épaisseur du joint adhésif et de l'angle biseautage sur le comportement mécanique du joint adhésif.

# I.3.2.1. Epaisseur de l'adhésif

L'influence de l'épaisseur du joint de colle a été étudiée en faisant varier  $e_j$  entre 0,05mm à 1mm par incrément 0,1mm (l'angle de biseautage  $\alpha$  reste fixe  $\alpha$ =33°). Les essais réalisés permettent dans un premier temps de préciser l'influence de l'épaisseur du joint adhésif sur la concentration des contraintes au voisinage des extrémités des couvre-joints.

Celles-ci sont d'autant plus importantes que l'épaisseur du joint augmente. Elles diminuent ensuite rapidement lorsque l'on s'éloigne de la pointe du biseau avant de se stabiliser. Pour une épaisseur de la couche adhésive comprise entre  $0,05mm \le e_j \le 0,2mm$ , la structure peut être alors assimilée à un barreau pratiquement homogène. La prise en compte de l'initiation des microfissures (symbolisé par le seuil *Fd*) et le début de propagation en régime instable (symbolisé par le seuil *Fg*) permet l'obtention du diagramme représenté sur la Figure I-3.

La Figure I-4 permet de visualiser la grandeur *R* (comparable à la rigidité des spécimens). Cette grandeur nommée *R* correspond au rapport entre la contrainte moyenne  $\sigma_0$  appliquée à l'éprouvette sur la déformation superficielle des substrats  $\varepsilon_s$  pour une abscisse donnée (*x*=2mm).



<u>Figure I-3 : Evolution des seuils d'amorçage en régime stable des premières microfissures  $(Fd_p)$ .</u> <u>d'apparition du régime instable  $(Fg_p)$  et de rupture (Fr), enregistrés par une jauge J5, en fonction de l'épaisseur du joint adhésif (0.05mm<  $e_i$ <1mm). L'angle de biseautage est égal à33°</u>





L'analyse de la Figure I-3, met en évidence l'influence de l'épaisseur du joint adhésif sur la résistance à l'amorçage des microfissures. La résistance du joint adhésif diminue lorsque son épaisseur augmente. Sur la Figure I-4, il est visible que la rigidité de l'assemblage collé est très grande lorsque l'épaisseur du joint est faible. Il est aussi remarquable que le calcul donne une rigidité R proche de celle des substrats (acier XC18 R=210GPa) lorsque le joint à une épaisseur minimale ( $e_j=0,05$ mm). Ainsi, l'assemblage peut être assimilé à un barreau presque parfait. Cela favorise une répartition homogène des contraintes et limite l'apparition précoce des premiers endommagements.

Ces résultats montrent qu'il existe donc une valeur optimale de  $e_j$  égale à 0,1mm qui confère à l'assemblage la résistance maximale au cisaillement par traction. Au-delà de cette épaisseur, la résistance mécanique de la structure décroît progressivement. En deçà, la rupture ultime intervient très rapidement après l'initiation de la première microfissure (le domaine non linéaire est très réduit) le joint adhésif devient donc trop fragile.

### I.3.2.2. Angle de biseautage

Le second paramètre géométrique étudié est l'angle de biseautage. Ce paramètre est prépondérant car il conditionne à la fois : la longueur de recouvrement *Lr*, le rapport entre les contraintes normales  $\sigma_{I1}$  et les contraintes de cisaillement  $\sigma_{I2}$  et génère des singularités angulaires plus ou moins marquées. L'angle de biseautage varie de  $\alpha$ =45° à  $\alpha$ =6° et l'épaisseur est fixe et égale à  $e_j$ =0,2mm.

La Figure I-5, montre l'évolution des contraintes critiques moyennes  $\sigma d_p$ ,  $\sigma g_p$  et  $\sigma r$  calculées à partir : du seuil d'amorçage des premières microfissures  $Fd_p$ , du seuil de propagation des fissures  $Fg_p$  et de la charge ultime  $F_r$  pour 6°≤ $\alpha$ ≤45°. Les résultats montrent que la décroissance de l'angle de biseautage  $\alpha$ , et donc l'augmentation de la longueur de recouvrement, accroît significativement la résistance mécanique des corps d'épreuves.

En effet lorsque l'angle de biseautage est inférieur à 33° la rupture ultime intervient rapidement après l'amorçage des premières microfissures. Le joint adhésif présente alors un comportement fragile. En revanche, l'augmentation de l'angle de biseautage induit un délai de plus en plus important entre l'initiation des premières microfissures ( $Fd_p$ ) et la rupture ultime Fr. Ces essais expérimentaux permettent de déterminer une valeur optimale de  $\alpha$ . Ici l'éprouvette obtient des meilleures performances mécaniques lorsque  $\alpha$  est proche de  $\alpha=6^{\circ}$ .



<u>Figure I-5</u> : Influence de l'angle de biseautage  $\alpha$ , sur l'évolution du seuil d'amorçage des premières</u> microfissures  $Fd_p$ , d'apparition du régime instable  $Fg_p$  et de rupture Fr, en fonction de la longueur de recouvrement <u>Lr</u>.

Cette étude souligne une nouvelle fois l'influence significative des singularités sur l'apparition des premières microfissures et sur l'évolution de l'endommagement des joints adhésifs. C'est pourquoi il nous semble intéressant d'approfondir cette étude notamment en étudiant le cas de l'assemblage collé de type double sifflet qui présente la particularité d'avoir une singularité géométrique au cœur du système jointif.

## I.3.3. Essais mécaniques

#### I.3.3.1. Choc mécanique

La plupart des travaux effectués dans notre laboratoire, relatifs aux assemblages collés, ont été réalisés par une même machine de traction (voir Chapitre II). Pour tous les essais de traction simple la vitesse de montée en charge est relativement lente 25N.s<sup>-1</sup> pour ne pas favoriser un comportement mécanique du joint adhésif qui s'apparenterait à un essai de choc.

W. LUHOWIAK [18] a mis en évidence le rôle des principaux paramètres qui gouvernent la résistance au choc d'une structure collée de type double recouvrement en acier XC90 assemblée avec une résine époxy *EPONAL 317*<sup>®</sup>. L'auteur remarque que la fragilité de la résine est encore plus marquée à grande vitesse de déformation et propose une étude théorique qui permet de démontrer l'existence d'un seuil en dessous duquel l'éprouvette ne risque plus d'être fragilisée en effectuant des essais de choc.

### I.3.3.2. <u>Fatigue</u>

Les travaux de L. MEKIRI [19] ont permis d'analyser le comportement mécanique en fatigue d'un assemblage collé de type sifflet assemblé par l'intermédiaire d'une résine époxy *EPONAL 317*<sup>®</sup>. L'épaisseur du joint et l'angle de biseautage sont respectivement égaux à  $e_j=0,2$ mm et  $\alpha=33^{\circ}$ .

Cette étude montre que si la traction ondulée reste inférieure à 80% du seuil d'amorçage des premiers endommagements (nommé  $Fd_p$ ), la résistance de l'éprouvette peut être considérée comme infinie. Dans ce cas les essais de traction simple après  $N=1.10^6$  cycles donnent des résultats identiques à ceux obtenus pour une éprouvette vierge (non fatiguée).

En revanche, lorsque l'essai de fatigue dépasse le seuil  $0.8\% Fd_p$ , la rupture des éprouvettes intervient toujours de façon précoce. Le nombre de cycle avant rupture est variable et dépend d'une part, de l'amplitude de la charge sinusoïdale et d'autre part, du niveau de charge maximale  $F_{max}$ .

Enfin, L. MEKIRI met en évidence qu'une traction ondulée avec un chargement légèrement inférieur au seuil  $0.8\% F_d$ , avec un rapport  $F_{min}/F_{max}=0.4$  et une fréquence de 30Hz correspond à la sollicitation maximale que peut supporter l'assemblage collé pendant 1 million de cycles avant l'initiation des premières microfissures.

La base de données, acquise pendant cette étude, nous est très utile car elle nous permet d'étudier l'évolution du comportement mécanique d'un joint adhésif, sollicité en fatigue (proche de la sollicitation maximale, théoriquement supportée par l'assemblage collé), après un vieillissement naturel de 10 ans.

## I.4. Calculs analytiques des joints adhésifs de type sifflet

#### I.4.1. Méthodes analytiques existantes

De nombreux chercheurs [20-34] ont caractérisé les contraintes existantes dans les systèmes jointifs. Concernant les assemblages collés biseautés, des méthodes analytiques sont proposées par S. HALFAOUI et A. WASSIAMA et [33] et [34]. Celles-ci, reposent sur une méthode asymptotique élaborée par Y. GILIBERT et A. RIGOLOT [32] pour les assemblages collés de type simple recouvrement.

Ces analyses sont pertinentes (dans le domaine élastique) car elles prennent en compte d'une part les principaux paramètres mécaniques des substrats et de l'adhésif (module d'Young *E* et coefficient de Poisson v) et d'autre part, elles intègrent en partie la géométrie de la structure biseautée (section de l'éprouvette, angle de biseautage  $\alpha$  et épaisseur du joint adhésif  $e_i$ ).

Nous présentons dans ce paragraphe les formules issues des travaux : de S. HALFAOUI (détermination des déformations superficielles des substrats) et de A. WASSIAMA (évolution des contraintes dans le joint adhésif) ainsi que les principales étapes des calculs qui permettent de les obtenir.

## I.4.2. Déformation de la surface externe du couvre-joint

#### I.4.2.1. Méthode Analytique élaborée par S. HALFAOUI

Dan le cas d'une épaisseur infiniment mince, l'éprouvette peut être comparée à un barreau homogène dans lequel il est simple de déterminer les contraintes de décollement  $\sigma_d$  et de cisaillement  $\tau_0$  à l'interface colle/substrat, respectivement équation (I.1) et (I.2)



Figure I-6 : Géométrie du corps d'épreuve et système d'axe

$$\tau_0 = \sigma_0 \sin 2\theta . \cos 2\theta \tag{I.1}$$

$$\sigma_d = \sigma_0 \sin^2 2\theta \tag{I.2}$$

Si ces premiers résultats (qui ont valeurs de constantes) sont en adéquation avec les valeurs expérimentales loin des extrémités du joint, il n'en est pas de même près des extrémités des biseaux.

En effet, la réalité expérimentale montre une augmentation des déformations à l'extrémité des biseaux et l'annulation des contraintes de cisaillement près du bord libre. Les véritables contraintes  $\sigma_d$ ,  $\tau_0$  étant des fonctions variables avec les caractéristiques mécaniques et géométriques des matériaux constituant le corps d'épreuve, il n'est pas aisé de trouver une formulation adéquate.

Cependant, S. HALFAOUI propose une méthode analytique intéressante qui s'accorde, dans certaines conditions de chargement et de géométrie du biseau, avec les valeurs expérimentales. Pour y parvenir l'auteur a pris en compte l'épaisseur de la couche adhésive et déterminé une fonction correctrice, issue de la méthode asymptotique, qui satisfait les conditions limites.

# I.4.2.2. <u>Notations</u>

ej	Epaisseur de l'éprouvette	(m)
$l_1$	Largeur de l'éprouvette	(m)
2 <i>θ</i>	Angle de biseautage	(°)
$e_J$	Epaisseur du joint adhésif	(m)
F	Effort appliqué	(N)
$E_J$	Module d'YOUNG de l'adhésif	(Pa)
$V_J$	Coefficient de POISSON de l'adhésif	
$E_T$	Module d'YOUNG des substrats	(Pa)
$V_T$	Coefficient de POISSON des substrats	
x	Abscisse du couvre-joint	(m)
$x_1$	Abscisse dans le plan du joint	
$\sigma_{_0}$	Contrainte moyenne appliquée à l'éprouvette	(Pa)
$\sigma_{_d}$	Contrainte de décollement dans le joint	(Pa)

# I.4.2.3. <u>Hypothèses</u>

- Cette étude est placée dans le cadre de l'élasticité plane et dans l'hypothèse que les matériaux qui constituent le corps d'épreuve sont homogènes et isotropes.
- La force de traction est répartie uniformément sur la section droite des substrats et suffisamment loin du joint de colle pour être en accord avec le principe de Saint-Venant.
- Les matériaux constituant les substrats sont beaucoup plus rigides que la résine époxy et imposent à cette dernière un état de déformation plane dans le sens de la largeur *l<sub>1</sub>*. L'auteur émet l'hypothèse que la structure travaille en contrainte plane pour les substrats et en déformation plane pour le joint adhésif. On corrige alors le module d'YOUNG et le coefficient de POISSON de l'adhésif comme suit [35]:

$$E_{J}' = \frac{E_{J}}{1 - {v_{J}}^{2}}$$
 et  $v_{J}' = \frac{v_{J}}{1 - v_{J}}$ 

I.4.2.4. <u>Résolution analytique</u>

$$\varepsilon_s = \frac{1}{E_T} (\sigma_0 + \sigma_x) \tag{I.3}$$

Où  $\sigma_x$  est une contrainte correctrice appliquée aux déformations longitudinales et appliquée aux extrémités des substrats.

$$\sigma_x = F_L \frac{\cos\theta}{x_1 l_1 (\theta + \frac{1}{2}\sin 2\theta)}$$
(I.4)

 $F_L$  correspond à la composante sur x de la force  $F_{F,x_1}$  orientée dans la direction du joint  $x_1$  $F_L = -\cos\theta \cdot F_{F,x_1}$  (I.5)

Avec: 
$$F_{F,x_1} = \sigma_0 e_J l_1 \left[ \upsilon'_J \left( 1 - \frac{E_J'}{\upsilon_J'} \cdot \frac{\upsilon_T}{E_T} \right) \sin^2 2\theta + \left( \frac{E_J'}{E_T} - 1 \right) \cos^2 2\theta \right]$$
(I.6)

Ainsi, l'équation (I.7) détermine les déformations longitudinales  $\mathcal{E}_L$  du substrat pour une épaisseur de joint finie.

$$\varepsilon_{L} = \frac{F}{el_{1}E_{T}} \left\{ 1 + \frac{e_{j}\cos^{2}\theta}{x_{1}(\theta + \frac{\sin 2\theta}{2})} \left[ \left( 1 - \frac{E_{J}'}{E_{T}} \right) \cos^{2} 2\theta - \upsilon'_{J} \left( 1 - \frac{E_{J}'}{\upsilon_{J}'} \cdot \frac{\upsilon_{T}}{E_{T}} \right) \sin^{2} 2\theta \right] \right\}$$
(I.7)

Nous avons représenté sur la Figure I-8 (a) un exemple de l'évolution des déformations superficielles des substrats lorsque l'assemblage est sollicité par une force de traction.
#### I.4.3. Répartition des contraintes dans le joint adhésif

#### I.4.3.1. Méthode Analytique élaborée par A. WASSIAMA

Les calculs les plus complets, qui tiennent compte des paramètres structuraux et géométriques de l'assemblage en sifflet tels que l'angle de biseautage, l'épaisseur du joint et les caractéristiques mécaniques des constituants sont présentées dans cette partie.

#### I.4.3.2. Notations

A1, A2 :	Substrats	
α:	Angle du biseau	(°)
Lr :	Longueur de recouvrement	(m)
<i>l</i> :	Largeur du substrat	(m)
<i>e</i> :	Epaisseur du substrat	(m)
$e_j$ :	Epaisseur du joint	(m)
F:	Effort axial appliqué à l'éprouvette	(N)
$\sigma_{0}$ :	Contrainte moyenne de traction	(Pa)
$\sigma$ :	Contrainte de décollement dans le joint	(Pa)
au :	Contrainte de cisaillement dans le joint	(Pa)
$\underline{\underline{\Sigma}}$ :	Champ de contrainte	(Pa)
$\underline{U}$ :	Champ des déformations	
$\chi$ :	Fonction d'Airy pour le cas où $\alpha$ est quelconque	
П:	Potentiel de PAPKOVITCH	
$\mathcal{E}_{s}$ :	Déformation superficielle des substrats	
$E_s$ :	Module d'Young des substrats	(Pa)
$E_j$ :	Module d'Young de l'adhésif	(Pa)
$v_s$ :	Coefficient de Poisson des substrats	
$v_1$ :	Coefficient de Poisson de l'adhésif	

#### I.4.3.3. Hypothèses

- La contrainte normale  $\sigma_0$  est supposée uniformément répartie sur la section droite des substrats A1 et A2.
- Les dimensions transversales du corps d'épreuve sont telles que l'hypothèse des déformations planes soit vérifiée.
- Les matériaux qui constituent les substrats métalliques sont supposés homogènes et isotropes, leur comportement mécanique est élastique linéaire.

- Aux interfaces adhésif-substrats, où le champ de déplacement et le vecteur des contraintes d'interface sont supposés continus, l'adhésion entre le joint et les substrats est considérée comme parfaite.
- Les calculs sont réalisés dans le cadre de l'élasticité plane, et dans l'hypothèse d'un joint travaillant en cisaillement et en décollement

#### I.4.3.4. <u>Résolution analytique</u>

Pour réaliser le calcul des contraintes dans le joint, l'auteur utilise une technique approchée similaire à celle utilisée par THEIN WAH [36]. En introduisant la fonction d'Airy  $\chi$  avec les notations correspondant à la Figure I-7, on peut écrire le champ  $\underline{\Sigma}^c$  sous la forme :



Figure I-7 : Géométrie du corps d'épreuve et système d'axe

Le problème portant sur la fonction d'Airy  $\chi$  est résolu par la méthode des fonctions stationnaires avec un potentiel de PAPKOVITCH  $\Pi(y)$  et une décroissance exponentielle loin de l'extrémité x=0.

$$\chi(x, y) = e^{-2px} \Pi(y) \tag{I.8}$$

Avec

$$\Pi(y) = A\cos[p(2y-1)] + B(2-1)\sin[p(2y-1)]$$
(I.9)

La variable p est la solution à plus petite partie réelle positive de l'équation du champ complexe :

$$p - (3 + 4v_J)\sin p = 0 \tag{I.10}$$

Il existe entre les constantes A et B, la relation suivante :

$$A = B \frac{2(1 - v_J) - (3 + 4v_J)\sin^2\frac{p}{2}}{p}$$
(I.11)

Par la suite, en tenant compte de la solution à plus petite partie réelle positive, on peut exprimer la fonction d'Airy  $\chi$  sous la forme :

$$\chi(x, y) = 2Be^{-2px} \left[ K \cos[p(2y-1)] + (2y-1)\sin[p(2y-1)] \right]$$
(I.12)

Avec

$$K = \frac{2(1 - v_J) - (3 + 4v_J)\sin^2\frac{p}{2}}{p}$$
(I.13)

Les contraintes correctrices  $\Sigma_{11}^c$ ,  $\Sigma_{12}^c$  et  $\Sigma_{22}^c$  s'écrivent sous la forme :

$$\Sigma_{11}^{c} = \frac{\partial^{2} \chi(x, y)}{\partial y^{2}} = 8Bpe^{-2px} \left[ (2 - Kp) \cos[p(2y - 1)] - (2y - 1) \sin[p(2y - 1)] \right]$$
(I.14)

$$\Sigma_{12}^{c} = -\frac{\partial^{2} \chi(x, y)}{\partial x \partial y} = -8Bpe^{-2px} [(1 - Kp)\sin[p(2y - 1)] - (2y - 1)\cos[p(2y - 1)]]$$
(I.15)

$$\Sigma_{22}^{c} = -\frac{\partial^{2} \chi(x, y)}{\partial x^{2}} = 8Bp^{2}e^{-2px} \left[ K \cos[p(2y-1)] + (2y-1)\sin[p(2y-1)] \right]$$
(I.16)

Les conditions limites aux extrémités imposent pour le champ $\underline{\Sigma}^c$ , les égalités suivantes :

$$-\Sigma_{11}^{c}\sin\alpha + \Sigma_{12}^{c}\cos\alpha = \phi_{1} = \frac{\nu_{J}}{1 - \nu_{J}}\sigma_{0}\sin^{3}\alpha - \sigma_{0}\sin\alpha\cos^{2}\alpha$$
(I.17)

$$-\Sigma_{12}^{c}\sin\alpha + \Sigma_{22}^{c}\cos\alpha = \phi_{2} = \sigma_{0}\sin^{2}\alpha\cos\alpha - \sigma_{0}\sin^{2}\alpha\cos\alpha \qquad (I.18)$$

Ces expressions permettent de déterminer la constante *B*. l'auteur utilise une technique de "collation" au point M(y=1/2), représentée sur la Figure I-7. Ce cas particulier nous permet d'écrire l'égalité suivante :

$$\Sigma_{11}^{c}(M) = 8Bp(2 - Kp) = -\left[\frac{\upsilon_J}{1 - \upsilon_J}\sin^2\alpha - \cos^2\alpha\right]\sigma_0$$
(I.19)

d'où

$$B = \frac{\left[-\frac{v_J}{1 - v_J}\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha\right]\sigma_0}{8p(2 - Kp)}$$
(I.20)

Ainsi, les contraintes dans le joint sont données par les expressions (I.21) et (1.22). Nous avons représenté sur la Figure I-8 (b) un exemple de la répartition des contraintes de cisaillement  $\Sigma_{12}^{J}$  et décollement  $\Sigma_{22}^{J}$  dans le joint adhésif.

$\Sigma_{12}^J = \sigma_0 \sin \alpha \cos \alpha + \Sigma_{12}^c(x, y)$	(I.21)
$\Sigma_{22}^J = \sigma_0 \sin \alpha^2 + \Sigma_{22}^c(x, y)$	(I.22)

#### I.4.4. Synthèse des résultats analytiques

La Figure I-8 (a) illustre, selon le modèle analytique élaboré S. HALFAOUI, l'évolution des déformations ( $\varepsilon_s$ ) de la surface externe du substrat. Le calcul prévoit une répartition uniforme des microdéformations sur une grande partie du couvre-joint, suivie d'une croissance très rapide de celle-ci au voisinage immédiat des extrémités du biseau.

La Figure I-8 (b) montre, selon le modèle analytique élaboré A WASSIAMA, la répartition des contraintes de décollement et de cisaillement dans le plan médian du joint adhésif. Le calcul prévoit, au voisinage des extrémités, la croissance des contraintes de décollement  $\sigma$ 22 et la décroissance des contraintes de cisaillement  $\sigma$ 12 ( $\sigma$ 12 sont réellement nulle à l'extrémité du joint adhésif).



(b)

 $\begin{array}{l} \hline Figure I-8: (a) \ Déformation \ des \ substrats \ \epsilon_{s} \ le \ long \ du \ recouvrement, (b) \ répartition \ des \ contraintes \ de \\ \hline cisaillement \ \sigma_{12} \ et \ de \ décollement \ \sigma_{22} \ a \ l'interface \ colle \ substrats \ au \ milieu \ du \ joint \ adhésif, \ pour \ une \\ \hline contrainte \ moyenne \ appliquée \ de \ \sigma_{0}=20 MPa \ (F=2kN). \ L'épaisseur \ de \ joint \ est \ égale \ a \ 0,5mm \ et \\ \hline l'angle \ de \ biseautage \ vaut \ 33^{\circ} \end{array}$ 

#### I.5. Analyses numériques des joints collés de type sifflet

#### I.5.1.1. Introduction

La méthode des éléments finis a été utilisée par de nombreux chercheurs pour prédire la rupture ultime des joints adhésifs dans les assemblages collés. Dans la littérature plusieurs critères de rupture sont proposés et peuvent être regroupés en différentes catégories (non exhaustives):

- Critère des contraintes ou déformations maximales [37-40]
- Critère d'état limite [41]
- Critère de la mécanique de la rupture [42-43]
- Critère de la mécanique de l'endommagement [44, 45]

#### I.5.1.2. Principaux résultats numériques du joint collé biseauté

En ce qui concerne les assemblages collés biseautés, S.B. KUMAR *et al* [46] ont étudié le cas où les adhérents sont en composite (CFRP) et où l'angle de biseautage est inférieur à 5°. Un critère de rupture développé par Z. HASHING [47] et J.D. LEE [48] pour les composites lamellés est implémenté dans le logiciel *ABAQUS*<sup>®</sup>. Les résultats présentés sur la Figure I-9, montrent la confrontation, en traction et en compression de la résistance à la <u>rupture</u> théorique et expérimentale du joint adhésif. En traction, les résultats sont en adéquations satisfaisantes mais il apparaît que la prédiction du modèle numérique reste insuffisante pour prédire les résultats issus de la compression

A. RANDOLPH [49] propose une nouvelle approche en 2D basée sur la méthode des contraintes planes traditionnelle utilisée par plusieurs auteurs tel que M.P. SIENER [50]. Ce modèle permet d'obtenir plus d'informations que les modèles conventionnels (Figure I-10). En effet avec cette nouvelle méthode les contraintes de cisaillement semblent mieux détaillées qu'une méthode traditionnelle.



Figure I-9 : Comparaison des mesures expérimentales et numériques sur la résistance à la rupture pour différentes valeurs d'angle biseautage. L'effet de l'épaisseur du joint adhésif est inclus.



Figure I-10 : Comparaison entre le nouveau modèle et le modèle traditionnel en 2D (l'angle de biseautage est égal à 3°).

#### I.6. Conclusions sur l'étude bibliographique

Dans ce chapitre, nous avons analysé les résultats issus de la bibliographie relative à l'assemblage collé de type sifflet. L'ensemble de ces résultats permet de constater qu'il existe une multitude de paramètres qui influent significativement sur les performances mécaniques du joint adhésif. Un récapitulatif de l'ensemble des corps d'épreuves et des essais réalisés est représenté dans le Tableau I-1 ci-dessous.

Assemblage collé de type sifflet					
Paramètres Mécaniques	Rugosité	Epaisseur du joint	Angle de biseautage		
	Bon ancrage mécanique colle/substrat : → Rugosité = diamètre des charges minérales de l'adhésif.	La plus fine possible (0,2< <i>e<sub>j</sub></i> <0,5mm): → Éviter le glissement des substrats.	Le plus faible possible : $(\alpha < 6^{\circ})$ : $\rightarrow$ Recouvrement important (attention aux surcontraintes d'extrémité).		
Essais Mécaniques	Traction	chocs	Fatigue		
	Vitesse de chargement faible (25N.s <sup>-1</sup> ) + Assurer l'alignement des substrats + Fixation de l'éprouvette dans les mors rotulés.	Augmentation de la fragilité de la résine à grande vitesse de déformation.	(f=30Hz, F <sub>min</sub> /F <sub>max</sub> =0,4 F <sub>max</sub> <0,80Fd <sub>p</sub> ) →Sollicitation dynamique maximale avant apparition des premiers endommagements.		
Etudes Analytiques	Equations caractérisent avec précision (dans le domaine linéaire) les contraintes et déformations sur la surface externe des substrats et dans le joint adhésif.				
Etudes Numériques	udes       Les critères de rupture actuels permettent une prédiction satisfaisante à la rupture en tracti         ériques       légère non correspondance en compression.				

#### Tableau I-1 : Récapitulatif des résultats bibliographiques, relatifs à l'assemblage collé de type sifflet

Les études menées sur les assemblages collés de type sifflet montrent que l'apparition des premières microfissures dépend très significativement de la rugosité des subjectiles, de l'épaisseur du joint et de l'angle de biseautage. Il est établi que la rugosité des subjectiles doit être du même ordre de grandeur que le diamètre moyen des charges présentes dans l'adhésif, l'épaisseur du joint adhésif doit rester la plus fine possible  $e_j = 0,2mm$  pour éviter le glissement du joint dans le plan des subjectiles et l'angle de biseautage doit être faible pour assurer une longueur de recouvrement importante. Cependant cela entraîne des singularités angulaires plus marquées génératrices de surcontraintes locales.

Les essais de fatigue montrent qu'il existe une sollicitation limite du point de vue de la résistance des éprouvettes biseautées  $e_j = 0,2$ mm et  $\alpha = 33^\circ$ . Une sollicitation mécanique de (f=30Hz,  $F_{min}/F_{max}=0,4$ ) correspond aux chargements dynamiques limites, que peut supporter une structure collée en biseau avant l'amorçage des premières microfissures.

Les principaux résultats expérimentaux, analytiques et numériques rappelés dans l'étude bibliographique permettent de mieux appréhender les mécanismes complexes qui caractérisent la résistance à la rupture des joints adhésifs. Toutefois certains résultats étonnants voire paradoxaux restent sans réponse.

En effet nous avons constaté que la résistance des joints adhésifs en résine époxy (*EPONAL 317*<sup>®</sup>), conservés pendant dix ans dans des conditions stables en humidité et en température, évolue avec le temps. Ceux-ci semblent acquérir une meilleure résistance à la rupture. Nous avons cherché à poursuivre ces premières constatations dans le Chapitre III, dans le but d'étudier plus en détail l'effet bénéfique du temps sur les joints adhésifs.

Il est clair que, du point de vue numérique la seule notion de rupture ne suffit pas pour prédire complètement le comportement global des assemblages collés. En effet nous verrons au Chapitre IV que l'évolution de l'endommagement peut être étudiée expérimentalement et que celle-ci est étroitement liée aux paramètres mécaniques et géométriques de l'assemblage. Ainsi, nous présenterons des résultats numériques déterminés par éléments finis avec un critère de rupture implémenté dans *ABAQUS*<sup>®</sup>. Cette étude est menée en utilisant notre base

de données expérimentale dans le but de valider le modèle numérique pour prédire l'évolution de l'endommagement du joint adhésif. Les résultats sont encourageants car ils permettent de prédire avec une bonne précision la rupture du joint adhésif, mais également l'initiation de la première microfissure qui détermine véritablement la résistance mécanique des assemblages collés.

Enfin, un assemblage de type double sifflet (autrement appelé assemblage en Vé) présente de nombreuses similitudes avec la liaison de type sifflet, mais son comportement mécanique reste mal connu tant les angles internes et externes rendent l'interprétation de son endommagement difficile. Nous avons montré que les singularités géométriques ont un rôle prépondérant sur les performances mécaniques des joints adhésifs car elles sont généralement responsables de l'initiation précoce des premières microfissures. Nous pensons que cet assemblage, bien qu'assez difficile à usiner et délicat à assembler, possède des performances mécaniques supérieures à l'assemblage collé de type sifflet (pour une même longueur de recouvrement). Mais paradoxalement, la concentration des contraintes à l'extrémité du Vé, doit probablement être responsable de l'initiation précoce des premières microfissures, lorsque l'angle du Vé devient très faible. C'est pourquoi, il est intéressant de mieux comprendre l'influence du Vé sur l'amorçage des premières microfissures. Pour cela, deux outils d'analyse (logiciel numérique de calcul par éléments finis et analyse thermographique avec une caméra infrarouge) sont utilisés.

## **CHAPITRE II**

# Présentation des corps d'épreuves étudiés et techniques de mesures

# II. Présentation des corps d'épreuves étudiés et techniques de mesures

#### II.1. Corps d'épreuves

#### II.1.1. Présentation des assemblages

Les premiers modèles expérimentaux étudiés sont des assemblages collés de type **sifflet** Figure II-1. Comme nous avons vu dans le chapitre précédent, ce type d'éprouvette a déjà fait l'objet d'études détaillées, mais certains paramètres restent à approfondir.

Les seconds modèles expérimentaux sont des assemblages collés de type **double sifflet** Figure II-2. Ces éprouvettes présentent de nombreux points communs avec l'assemblage de type sifflet mais la présence du Vé intérieur peut, selon nous, jouer un rôle sur l'amorçage des microfissures.

Les substrats A1 et A2 sont de section carrée 10x10mm de côté. Ils sont constitués d'un acier ferritique XC18 équivalent à la nouvelle norme (S275) ou d'un alliage d'aluminium AU4G. Les parties en sifflet ou double sifflet sont réalisées par électroérosion et l'autre extrémité du substrat est filetée au pas ISO M12x150 sur une longueur de 30mm.

Dans la suite de notre travail nous appellerons :

- $e_j$ : épaisseur du joint adhésif
- $\alpha$  : angle de biseautage





Figure II-2 : Eprouvette collée de type double sifflet

#### II.1.2. Avantages des résines utilisées

Le comportement mécanique des structures collées dépend fortement de la nature de l'adhésif utilisé. Lorsque les corps d'épreuves sont assemblés par l'intermédiaire d'un adhésif souple du type *SIKAFORCE 7750*<sup>®</sup>, il n'existe pas de rupture fragile de la structure. En revanche, le comportement viscoélastique de l'adhésif induit un glissement important du joint de colle. Les défauts d'alignement entre les parties assemblées finissent par induire des ruptures par clivage pour des niveaux de chargement inférieurs à ceux obtenus avec un assemblage collé, par l'intermédiaire d'un adhésif rigide de type *SIKADUR 30 COLLE*<sup>®</sup>. Ce phénomène a été observé et analysé dans les travaux menés par L. BOUAZAOUI [51], dans le cadre de ses recherches sur les structures mixtes acier/béton.

Pour ces raisons, nous avons retenu dans notre étude deux types de résine époxy, au comportement mécanique fragile à température ambiante. Cela confère à nos assemblages un comportement du type connexion parfaite avec de faibles déformations et minimise ainsi les déplacements entre les substrats. De plus, le comportement fragile des adhésifs est pour nous un atout, car cela permet une meilleure caractérisation indirecte de l'endommagement du joint adhésif par l'interprétation des microdéformations, mesurées par les jauges de déformation.

Les deux adhésifs étudiés sont d'une part une résine époxy *EPONAL 317<sup>®</sup> de la société C.E.C.A e*t d'autre part une résine époxy *SIKADUR 30 COLLE<sup>®</sup>* de la société SIKA. L'avantage de la première résine est qu'elle a été largement utilisée pour la confection de nombreuses éprouvettes. Nous disposons ainsi d'une base de données importante issue de travaux antérieurs, qu'il sera intéressant de compléter ou de comparer avec nos expériences. La deuxième résine époxy est très utilisée dans l'industrie, notamment dans le cadre de renforcement des ouvrages d'art du Génie civil. La caractérisation de son endommagement, en fonction de la géométrie de la couche adhésive et du mode de sollicitation devrait permettre d'optimiser la conception d'assemblages plus complexes du type structures mixtes acier/béton.

#### II.1.3. Propriétés mécaniques des composants

Les matériaux choisis pour la confection de nos éprouvettes sont des produits industriels couramment utilisés. Cependant, l'interprétation précise de nos assemblages nécessite de connaître parfaitement les caractéristiques mécaniques des substrats métalliques et des adhésifs. Pour cela, des essais de traction ont été réalisés sur des barreaux en acier et en alliage d'aluminium, puis sur des éprouvettes en colle massique [17]. Les vitesses de chargement ont été fixées à 20 N.s<sup>-1</sup> pour substrats métalliques et à 10 N.s<sup>-1</sup>pour les éprouvettes en résine époxy. L'utilisation de deux jauges électriques, l'une collée dans le sens longitudinal et l'autre collée dans le sens transversal de l'échantillon permettent de déterminer le module d'YOUNG *E* et le coefficient de POISSON  $\nu$  des matériaux utilisés dans cette étude.

#### II.1.3.1. Substrats

Les lois de comportement des substrats XC18 et AU4G déterminées expérimentalement sont représentées sur la Figure II-3. Les résultats de ces expériences sont reportés dans le Tableau II-1.



Figure II-3 : Loi de comportement des substrats utilisés : Aciers XC18 et alliage d'aluminium AU4G [17 et 18]

 Tableau II-1.Caractéristiques mécaniques des substrats étudiés : Alliage d'aluminium AU4G et acier

 XC18)

	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Limite élastique (MPa)	Contrainte à la rupture (MPa)
Acier XC18	210	0,29	278	434
Alu AU4G	72	0,31	300	400

#### II.1.3.2. Adhésifs

De même que pour les substrats, les lois d'évolution des résines époxy *EPONAL 317*<sup>®</sup> et *SIKADUR 30 COLLE*<sup>®</sup> sont représentées sur Figure II-4 et les caractéristiques mécaniques sont reportées dans le Tableau II-2, ci-dessous.



Figure II-4 : Loi de comportement des adhésifs utilisés : EPONAL 317<sup>®</sup> [17] et SIKADUR 30 COLLE<sup>®</sup>

<u>Tableau II-2 : Caractéristiques mécaniques résines époxy étudiées : EPONAL 317<sup>®</sup> et SIKADUR 30</u> <u>COLLE<sup>®</sup></u>

	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Limite élastique (MPa)	Contrainte à la rupture (MPa)
EPONAL 317 <sup>®</sup>	5,8	0,33	27	28,5
SIKADUR 30 <sup>®</sup>	12,3	0,34	24	24,7

#### II.1.4. Elaboration des éprouvettes

L'étude bibliographique du Chapitre I, montre que nous disposons d'une base de donnée importante sur les principaux paramètres qui conditionnent la résistance des assemblages collés de type sifflet [12-19]. Ces résultats permettent de réaliser nos éprouvettes de telle sorte que celles-ci aient une résistance maximale. Les différentes étapes d'élaboration de nos corps d'épreuves sont développées dans ce paragraphe.

#### II.1.4.1. Usinage par électroérosion à fil

L'électroérosion est une méthode d'usinage de tout type de matériaux électriquement conducteur, indépendamment de leur dureté. Contrairement à un usinage conventionnel tel qu'un fraisage suivi d'une rectification, cette technique flexible et très précise préserve nos éprouvettes de la plastification locale de la pointe des biseaux. Ce point est particulièrement intéressant car comme nous le verrons plus loin, la plastification de la pointe du biseau joue un rôle prépondérant dans la résistance à l'endommagement du joint adhésif.

#### II.1.4.2. Traitement de surface des subjectiles

F. BOUNYAVONG [13] a analysé l'influence de l'état micro-géométrique des subjectiles sur le comportement mécanique des structures collées. Son étude a porté sur l'assemblage de type simple recouvrement en escalier, sollicité à la traction simple. Il apparaît que l'adhésion optimale entre l'adhésif et les substrats est obtenue, lorsque la rugosité des subjectiles est du même ordre de grandeur que les particules existantes dans l'adhésif. Ainsi, avec la résine *EPONAL 317*<sup>®</sup> la rugosité des subjectiles doit être voisine de 7µm et avec la résine *SIKADUR 30 COLLE*<sup>®</sup> la rugosité optimale doit être égale à 40µm. Cette rugosité est obtenue en employant un oxyde d'Aluminium brun standard le *CORINDON BRUN CORINITE* de la société *RÖLER France*, projeté sur les subjectiles avec une pression de sablage de 4bars.

#### II.1.4.3. Assemblage par collage

Une étude expérimentale n'a un intérêt que si l'élaboration des corps d'épreuves assure une bonne reproductibilité des résultats. C'est pourquoi un dispositif mécanique {breveté} simple et précis a été mis au point par Yvon GILIBERT { 1}.

Ce dispositif (Figure II-5) est un bloc d'acier taillé en Vé qui assure, grâce à un dispositif de bridages coulissantes, un alignement des deux substrats et une pression d'accostage constante durant le processus de collage des éprouvettes. L'épaisseur du joint adhésif ainsi obtenu est donc parfaitement uniforme. Compte tenue de l'importance du paramètre épaisseur dans les performances mécaniques du joint adhésif, cet aspect "pratique" est très important.







Perspective

éprouvettes collées

Figure II-5 : Dispositif de montage en Vé





#### II.2. Dispositifs expérimentaux

#### II.2.1. Machine de traction et système d'ancrage

#### II.2.1.1. Machine de traction

Dans notre étude nous utiliserons principalement une machine de traction de type MST 810. Cette machine à pilotage hydraulique dispose de deux cartes de pilotage en force lui permettant de travailler dans une gamme d'effort modéré de 0 à 25kN ou d'atteindre des niveaux de chargement importants jusqu'à 250kN. Cette machine permet également la réalisation d'essais de fatigue avec une plage de fréquence variable de 0 à 100Hz et dont le signal peut être cyclique sinusoïdal ou en créneau. Le pilotage est réalisé en force grâce à une console de type MST 458.20 qui permet de réaliser des programmes très diversifiés.

#### II.2.1.2. Mors rotulés

Après avoir programmé l'expérience via la console MTS 458.20 (vitesse de montée en charge, seuil limite, fréquence des cycles de fatigue,....) et réglé la machine de traction (hauteur de la traverse, pression de serrage des mors hydrauliques...), il reste à installer l'éprouvette préalablement instrumentée dans un système d'ancrage. Le système d'ancrage breveté { 2} (Figure II-7) que nous utilisons consiste en une pièce taraudée (M12x150) ellemême montée sur rotule. Ce dispositif permet de solliciter l'éprouvette dans une direction unique et préserve la structure de la rupture précoce par clivage et des flexions parasites des substrats qui pénaliseraient la résistance du joint adhésif.



Figure II-7 : Schématisation du système d'ancrage rotulé

#### II.2.2. Technique de mesure

La technique de mesure expérimentale utilise la grande sensibilité des jauges électriques afin de mesurer les microdéformations au niveau de la surface externe de la structure et les perturbations du champ de déformation induites par les fissures. Les premières applications de cette méthode expérimentale (aussi appelée la "back face technique") ont permis de caractériser l'initiation des fissures dans les structures soudées [52] et par la suite la "back face technique" a été utilisée pour caractériser le comportement micromécanique des assemblages collés [53-63]

#### II.2.2.1. Caractéristiques des chaînettes de jauges

Pour la mesure des déformations superficielles des substrats, nous utilisons des chaînettes de jauges de type TYP 1/120 KY 13. Ces chaînettes regroupent sur une trame pelliculaire, plusieurs petites jauges indépendantes placées les unes à côté des autres avec un pas bien défini. Les chaînettes de jauges représentées sur la Figure II-8, sont placées sur les deux faces externes des couvre-joints, au plus près des angles aigus des substrats (Figure II-9). En effet, lorsque cet assemblage est sollicité par une force statique ou dynamique, les singularités angulaires induisent localement des surcontraintes très élevées responsables de l'apparition des premières microfissures. Il est donc indispensable de localiser nos capteurs dans cette zone.



Figure II-8 : Chaînettes de jauges de type TYP <u>1/120 KY 13</u>

Figure II-9 : Disposition des jauges sur les surfaces externes des couvre-joints

7

7

9

1

1

**TYP 1/120KY13** 

	pour les e	études expérimentale	<u>es</u>				
Type de chaînette	Facteur de jauge K	Résistance en $\Omega$ .	Dimension en mm				
			a	b	c	d	e

120 Ω±1,5%

<u>Tableau II-3 : Caractéristiques numériques des chaînes de jauges électriques de déformation utilisées</u> pour les études expérimentales

Cette configuration est intéressante, notamment pour les jauges de très petite dimension. Elles permettent d'installer en une seule fois un ensemble de onze grilles, dont la position respective sur le corps d'épreuve pourra être déterminée avec une très grande précision (de l'ordre du dixième de millimètre). Durant l'essai, les jauges fournissent des données sous forme de tension analogique à notre système d'acquisition. Ce dernier, traite le signal et stocke les informations sur un disque dur.

#### II.2.2.2. Chaîne d'acquisition

 $1,69 \pm 1,5\%$ 

Le système d'acquisition des données est de type VISHAY MICROMESURE 4000. Ce système est piloté par ordinateur et dispose de cinq consoles pouvant recevoir chacune 20 voies. Le temps d'acquisition pour un cycle de mesure est de 0,04 seconde par voie ce qui est suffisant compte tenue de la vitesse de montée en charge de la machine de traction voisine de 25 N.s<sup>-1</sup>.

La chaîne d'acquisition convertit le signal analogique émis par les jauges de déformation en signal digital avant de stocker toutes les informations sur un disque dur. Les microdéformations déterminées pour chacune des jauges en fonction de la valeur de la charge de traction peuvent enfin être exploitées.

#### II.3. Détermination expérimentale de l'endommagement

#### II.3.1. Analyse des données extensométriques

La seule connaissance de la charge ultime admissible des éprouvettes n'est pas suffisante pour caractériser le comportement mécanique fin des assemblages collés. Le dispositif mis en place permet de déterminer pour chacune des jauges qui composent nos chaînettes, l'évolution des courbes  $F=f(\varepsilon)$ . Celles-ci, mettent en évidence les phénomènes représentés sur les Figure II-10.(a, b et c).

- Tout d'abord, lorsque le chargement commence à croître (Figure II-10.a), 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 (Figure II-10.b) induit une perturbation locale du champ de déformation qui se caractérise par une perte de linéarité de la courbe F=f(ε). Nous appelons Fd, le seuil d'amorçage des microfissures.
- Enfin, la propagation des fissures engendre une relaxation des contraintes (Figure II-10.c) qui se traduit par un changement de signe de la pente  $dF/d\varepsilon$ . Nous appelons Fg, le seuil où les microfissures commencent à se diffuser. Au-delà du seuil Fg les fissures se rejoignent pour former des criques qui se propagent rapidement dans la couche adhésive. Le seuil  $F_r$  caractérise la ruine de la structure.

L'extensométrie permet donc de localiser de manière indirecte, les zones où s'amorcent les premières microfissures et le seuil à partir duquel elles se propagent. La très grande différence entre les deux matériaux (acier XC18 et résine époxy) constituant notre échantillon, permet de formuler l'hypothèse que les perturbations repérées sur les courbes  $F=f(\varepsilon)$ proviennent exclusivement du joint adhésif.



Figure II-10 : Détermination des seuils d'endommagement du joint adhésif.

#### II.3.2. Diagramme d'endommagement du joint adhésif

Un diagramme (Figure II-11) permet de définir les différents domaines qui caractérisent l'endommagement progressif de l'ensemble du joint de colle.

- Le domaine élastique, défini par l'intervalle *0≤F≤Fdn*, où l'assemblage présente une élasticité linéaire. Ce domaine est constitué par :
  - le domaine élastique global, dans lequel aucune zone du joint n'est encore fissurée, sa limite supérieure correspond à la valeur *Fdp*, seuil d'amorçage des premières microfissures.
  - le domaine élastique complexe défini par l'intervalle  $Fd_p ≤ F ≤ Fdn$ , dans lequel coexistent la zone élastique non endommagée et la zone plastique microfissurée.
- Le domaine de croissance des microfissures, délimité par l'intervalle *Fdn≤F≤Fgn*, dans lequel coexistent la zone élastique non endommagée et la zone plastique microfissurée.
- Le domaine de propagation rapide des criques, défini par l'intervalle Fgn≤F≤Fr, dans lequel les fissures progressent rapidement en régime instable et se rejoignent pour aboutir à la formation des criques responsables de la ruine du joint et donc de la rupture ultime de l'assemblage qui se produit à F=Fr.

Quelque soit la géométrie de la structure collée de type sifflet (variation de l'épaisseur de joint adhésif  $e_j$  et de l'angle de biseautage  $\alpha$ ), le profil de l'endommagement reste sensiblement le même. Celui-ci montre que l'amorçage des premières microfissures se produit dans les zones situées près des extrémités des biseaux, avant de se propager vers le centre du joint.



Figure II-11 : Diagramme caractéristique de l'endommagement progressif d'un assemblage collé biseauté sollicité en traction

#### II.3.3. Du diagramme à l'histogramme

Parmi tous les seuils Fd et Fg, les valeurs les plus faibles que nous appelons  $Fd_p$  et  $Fg_p$ sont les plus importantes, car elles définissent véritablement l'endommagement du joint adhésif du joint.

Dans la suite de notre étude nous représenterons un histogramme (Figure II-12) qui facilite la perception visuelle de l'étendue du domaine élastique  $0 < F < Fd_p$ , le domaine de croissance des microfissures  $Fd_p < F < Fg_p$  et le domaine de propagation des criques  $Fg_p < F < Fr$ .



#### **II.4. Conclusions**

Les assemblages de type sifflet et double sifflet utilisés dans cette étude sont de part leurs géométries (simples et reproductibles) et par la nature des matériaux utilisés (connus et couramment utilisés) des corps d'épreuves bien adaptés pour étudier en détail l'endommagement des joints adhésifs.

Leurs élaborations utilisent un dispositif d'assemblage qui permet de maîtriser avec précision l'alignement des substrats et l'épaisseur du joint adhésif qui les caractérisent. Leur fixation s'effectue à l'aide de deux ensembles intermédiaires montés sur rotules qui limitent tous les efforts parasites indésirables (flexion, torsion...).

La technique de mesure expérimentale montre que la seule notion de rupture ultime Frn'est pas suffisante pour caractériser complètement la résistance d'un joint adhésif. En effet l'initiation de la première microfissure (seuil  $Fd_p$ ) peut apparaître dans certaines configurations géométriques à un niveau de chargement bien inférieur à celui qui correspond à la rupture finale. C'est pourquoi, dans nos travaux nous considérons le seuil  $Fd_p$  comme le seuil principal de résistance des joints adhésifs.

Dans le chapitre suivant, cette technique expérimentale très sensible, est utilisée pour caractériser l'influence d'un vieillissement naturel de dix ans, sur l'évolution progressive de l'endommagement de deux joints adhésifs biseautés.

## **CHAPITRE III**

# Etude expérimentale de l'influence du vieillissement naturel sur l'endommagement des joints adhésifs biseautés

# III. Etude expérimentale de l'influence du vieillissement naturel sur l'endommagement des joints adhésifs biseautés

#### **III.1. Introduction**

Le point de départ de cette étude (en 2006), était de connaître la résistance à l'endommagement d'un joint adhésif, préalablement microfissuré par un essai de fatigue. L'objectif étant, grâce à nos modèles expérimentaux simples et très bien définis, de contribuer à identifier et à comprendre les phénomènes complexes de vieillissement en service qu'il est difficile de mesurer et de caractériser sur des structures réelles.

Nous pensons qu'il ne faut pas assimiler les caractéristiques du joint uniquement à celles de l'adhésif à l'état massif, mais plutôt de considérer la zone du joint comme un complexe métal-colle-métal constituant un « matériau » à part entière avec ses caractéristiques mécaniques spécifiques. En effet, la cohésion d'ensemble est générée par des mécanismes complexes d'adhésion de nature mécanique et physico-chimique dont l'importance respective n'est pas encore connue avec précision. Ces dernières varient en fonction des paramètres mécaniques et géométriques tels que la nature des substrats, l'épaisseur de la couche adhésive ou encore avec l'environnement extérieur.

Plusieurs études ont montré en effet, l'influence de paramètres tels que l'humidité ou la température [64-67] sur les performances mécaniques des joints adhésifs. L'étude de I.WILSON [68] porte sur la durabilité des assemblages de type simple recouvrement, collés avec résine époxy. Après de nombreux essais effectués en laboratoire, WILSON compare ses résultats avec le comportement d'assemblages collés similaires installés sur un camion durant 5 années. Il constate que les essais de vieillissement accélérés réalisés en laboratoire, qui sont théoriquement proches des sollicitations réellement soumises sur les assemblages collés du camion (atmosphère humide , charge constante de 50N/mm), sont très différents de la réalité. En effet sous ces conditions, un joint collé qui cède en laboratoire au bout de 15 jours, résiste en réalité 2 ans. Il en déduit deux hypothèses : soit les essais de vieillissement accéléré, effectués en laboratoire introduisent un facteur d'amplification de 50, soit l'alternance périodique humide chaude et humide sèche pendant le vieillissement naturel permet une évolution des performances mécaniques du joint adhésif.

L'influence d'un vieillissement naturel sur la résistance des résines époxy reste mal connue, car elle nécessite de préserver des éprouvettes pendant plusieurs années dans des conditions stables. Dans notre étude, plusieurs corps d'épreuve ont été préservés pendant dix ans (entre 1996 et 2006) dans une pièce où la température moyenne est constante  $20^{\circ}C\pm 2^{\circ}C$ , avec une humidité relative de  $55\%\pm 5\%$  et à l'abri des chocs. Ainsi, seul le temps différencie les éprouvettes élaborées en 1996 et les éprouvettes étudiées 2006.

Pour tenter de quantifier et de caractériser l'influence du vieillissement sur le comportement micromécanique des joints adhésifs, nous avons, dans ce chapitre respecté le plan suivant :

Tout d'abord nous présentons le comportement mécanique général des assemblages collés de type sifflet  $\alpha$ =33° et  $\alpha$ =6°. Ces résultats, qui nous servent de référence, sont issus de travaux antérieurs réalisés sur les mêmes éprouvettes que celles utilisées dans cette étude.

Dans la deuxième partie, nous avons simulé une utilisation en service avec une des éprouvettes constituants les deux lots ( $\alpha$ =33° et  $\alpha$ =6°). Les tests développés dans notre laboratoire sont proches des conditions extrêmes que peuvent tolérer les assemblages avant rupture. L'interprétation de ces premiers résultats est intéressante et nous pousse à poursuivre nos recherches.

C'est pourquoi, dans la troisième partie, des essais de tractions jusqu'à la rupture des assemblages collées sont réalisés. Ces essais ont pour but de déterminer les nouvelles propriétés mécaniques des joints adhésifs après un vieillissement naturel de 10ans.

### III.2. Analyse du comportement mécanique du joint adhésif en 1996

#### III.2.1. Corps d'épreuve étudiés

#### III.2.1.1. <u>Remarque préliminaire</u>

En 1996, des éprouvettes collées biseautées ont été réalisées dans le cadre d'une étude théorique et expérimentale A. OBJOIS [17], dans le but d'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, toutes les éprouvettes ont été élaborées avec la même procédure de fabrication et avec des matériaux strictement identiques.

#### III.2.1.2. Matériaux constituants les éprouvettes

Les échantillons sont constitués de deux substrats A1 et A2 en acier XC18, biseautés avec un angle  $\alpha$  et collés par l'intermédiaire d'une résine époxy *EPONAL 317*<sup>®</sup>. Nous avons sélectionné 3 éprouvettes avec un angle de biseautage  $\alpha=33^{\circ}$  et 3 éprouvettes avec un angle de biseautage  $\alpha=6^{\circ}$ . Leurs caractéristiques géométriques et leurs instrumentations sont représentées respectivement sur la Figure III-1 (page suivante).

Nous avons choisi les assemblages biseautés ci-contre car les angles constituent des valeurs très proches des limites du biseautage pour une utilisation structurelle. En effet, audelà de 33° la surface de collage est trop faible et le joint ne travaille plus au cisaillement préférentiel et en deçà de 6° la forme très effilée des substrats rend leur usinage et leur collage extrêmement délicat.

#### III.2.2. Résultats des essais de traction réalisés en 1996

#### III.2.2.1. Instrumentation des corps d'épreuves

Des essais de traction simple ont été réalisés en 1996, sur de nombreuses éprouvettes collées de type sifflet. Chaque éprouvette est instrumentée avec des chaînettes de jauges de type TYP 1/120 KY 13. Celles-ci sont placées au plus près des extrémités biseautées dans le but de localiser l'amorçage des premières microfissures et le seuil à partir duquel elles se propagent




#### III.2.2.2. Endommagement des joints adhésifs étudiés en 1996

Nous avons reporté dans le Tableau III-1, les valeurs des différents seuils caractéristiques de l'endommagement  $Fd_p$ ,  $Fg_p$  et Fr, relatives aux éprouvettes dont l'angle de biseautage est  $\alpha = 33^\circ$  et  $\alpha = 6^\circ$ .

<u>Tableau III-1 : Valeurs des seuils d'endommagement :  $Fd_p$  initiation de la première microfissure,  $Fg_p$  début de propagation de la fissure et Fr rupture ultime de l'éprouvette, en 1996. Angles des biseaux valent  $\alpha$ =33° et  $\alpha$ =6°</u>

	<u> </u>								
Seuils d'endommagent	<i>α</i> =33°			<i>α=</i> 6°					
Nombre d'éprouvettes	1	2	3	1	2	3			
$Fd_p$ (kN): initiation de la première microfissure	4,16	4,24	4,30	11,93	11,80	11,72			
Valeur moyenne Fdp (kN)	<i>4,23±0,07</i>				11,83±0,11				
$Fg_p$ (kN): début de propagation de la fissure	4,82	5,02	4.86	16,20	16,25	15,75			
Valeur moyenne Fgp (kN):	4,90±0	,1		16,04±	0,25				
Fr (kN) : rupture ultime	5,00	5,34	5,20	17,78	18,51	19,02			
Valeur moyenne Fr (kN)	5,18±0,17			18,77±0,62					



Fr: Rutpure du joint adhésif

Fgp: Propagation de la première mirofissure

 $F_{g_p}$ : Initiation de la première microfissure



#### **III.2.3.Interprétations**

La résistance de ces assemblages collés augmente lorsque la longueur de recouvrement croît, c'est-à-dire lorsque  $\alpha$  diminue. Dans le cas ou  $\alpha=33^\circ$ , l'initiation de la première microfissure, définie par le seuil  $Fd_p$ , apparaît pour  $Fd_p=4,23$ kN. A partir de ce seuil, les fissures se propagent rapidement dans le joint adhésif et la rupture se produit pour Fr=5,18kN. Dans ce cas, la rupture de l'assemblage est de type fragile.

En comparaison, lorsque  $\alpha = 6^{\circ}$ , les premières microfissures apparaissent pour  $Fd_p=11,82$ kN, mais la rupture ultime intervient pour un niveau de chargement très supérieur à Fr=18,77kN. En effet une grande longueur de recouvrement permet une distribution des contraintes plus uniforme à l'intérieur du joint adhésif. Cela retarde la propagation des fissures et donne à l'assemblage un comportement plus "plastique".

#### III.3. Analyse du comportement mécanique du joint adhésif en 2006

En 2006, c'est-à-dire dix ans après leur élaboration nous nous sommes intéressés à l'influence du vieillissement naturel, sur le comportement mécanique des joints adhésifs. Trois éprouvettes collées avec un angle  $\alpha=33^{\circ}$  et trois éprouvettes collées avec un angle  $\alpha=6^{\circ}$ , ayant chacune des joints adhésifs d'épaisseur  $e_j=0,2mm$  ont été sélectionnées et instrumentées avec des chaînette de jauge de type TYP 1/120 KY 13.

#### III.3.1.Essais de fatigue

#### III.3.1.1. Paramétrage des essais de fatigue

Dans le but de réaliser un essai de fatigue qui soit comparable pour les deux éprouvettes, nous avons choisi de paramétrer l'essai de la façon suivante : la fréquence est fixée à f=3Hz, la charge maximale correspond à 80% du seuil d'amorçage des premières microfissures (*Fmax*=0,8%*Fd*) et le rapport entre la force minimale et la force maximale est égale à 0,4. L'amplitude de la charge en fonction de la valeur de l'angle du biseau est représentée dans le

Tableau III-2.

Selon des travaux antérieurs [19], ce protocole de fatigue correspond à la sollicitation maximale que peut supporter l'assemblage collé pendant 1 million de cycles avant l'initiation des premières microfissures.

Tous les  $N=250.10^6$  cycles, un chargement à vitesse réduite (f=0,05Hz) que nous appelons "cycle lent" est réalisé (Figure III-3). Ces essais ont pour but d'enregistrer l'évolution des déformations à la surface externe des substrats en fonction de la force.

Tableau III-2 : Réglages des essais de fatigue en fonction de la géométrie des éprouvettes

	<i>α</i> =33	$\alpha = 6^{\circ}$	
$F_{min} = 0.32.F_{d_p} (kN)$	1,4	3,8	
$F_{max}=0,80.F_{d_p}(kN)$	3,4	9,5	





#### III.3.1.2. Interprétation théorique de l'influence de la fatigue

L'influence de la fatigue mécanique sur l'endommagement du joint adhésif, peut être caractérisée par l'observation d'un glissement des cycles lents (Figure III-4). Ces cycles lents représentent, pendant l'essai de fatigue, l'évolution des microdéformations enregistrées par l'une des jauges électriques en fonction d'un cycle de charge/décharge à vitesse réduite [19].

Ce glissement est attribué à la redistribution des macromolécules du polymère au fur et à mesure que le nombre de cycles croît. Ce phénomène finit par provoquer l'endommagement du joint adhésif et la relaxation locale des contraintes, induit par l'endommagement, peut être enregistrée par une jauge située à l'aplomb du défaut. Cet enregistrement correspond à une diminution significative des microdéformations (Figure III-5) [54].



Figure III-4

Figure III-5

Figure III-4 : Illustration des cycles lents enregistrés par une jauge Jn. Glissement des courbes  $F=f(\varepsilon)$ pendant un essai de fatigue

Figure III-5 : Illustration de la détection de l'endommagement du joint adhésif par une jauge Jn pendant l'essai de fatigue.

Des études réalisées dans notre laboratoire ont montré qu'un essai quasi similaire correspond à la fatigue limite que peut supporter un assemblage collé biseauté. On peut alors penser que si le joint adhésif s'est dégradé avec le temps, la rupture des éprouvettes aura lieu avant  $N=10^6$  cycles. Lorsque le nombre de cycles atteint  $N=10^6$  cycles, sans rupture des assemblages, la résistance en fatigue est considérée comme infinie.

La recherche des endommagements se fait grâce à l'analyse des courbes obtenues lors des cycles lents, représentées sur les Figures III-4 à III-11.

#### III.3.1.3. <u>Présentation des cycles de charge décharge à vitesse réduite.</u>

Les Figures III-6 à III-11 (page suivante) montrent les microdéformations mesurées par les jauges J1, J2 et J5 pour l'éprouvette biseautée avec un angle  $\alpha=33^{\circ}$  et J1, J2 et J8 pour l'éprouvette biseautée avec un angle  $\alpha=6^{\circ}$  pendant les chargements cycliques lents. Une attention particulière est portée sur les jauges J1 et J2 parce que ces jauges sont les plus susceptibles de détecter les premières microfissures.

#### III.3.1.4. Présentation des déformations le long des couvre-joints

Les Figures III-12 à III-13.représentent l'évolution des microdéformations de la surface externe des substrats avec l'augmentation du nombre de cycles. Les microdéformations sont enregistrées par les mesures J1, J2 et J5 pour l'échantillon  $\alpha$ =33° et J1, J2 et J8 pour l'échantillon  $\alpha$ =6°.



Chapitre III





Figure III-12: Evolution des déformations enregistrées par les jauges J1, J2 et J5 lorsque  $\alpha = 33^{\circ}$  etF=3kN.Figure III-13: Evolution des déformations enregistrées par les jauges J1, J2 et J8 lorsque  $\alpha = 6^{\circ}$  etF=9kN.

#### III.3.1.5. Interprétations des résultats

L'analyse des chargements cycliques à vitesse réduite (Figure III-6 à Figure III-11) enregistrés par les jauges *J1*, *J2* et *J5* pour l'échantillon avec  $\alpha$ =33° et *J1*, *J2* et *J8* pour l'échantillon avec  $\alpha$ =6° montrent une linéarité presque parfaite des déformations en fonction de la force. En outre, aucun glissement significatif de ces cycles n'est enregistré, lorsque le nombre de cycles *N* augmente. Cela signifie que la traction ondulée ne modifie pas d'un point de vue microscopique l'arrangement des macromolécules du polymère.

Les Figures III-10 et III-11 confirment l'observation précédente. La répartition des déformations sur la surface externe des substrats enregistrés par les jauges *J1*, *J2* et *J5* pour l'échantillon avec  $\alpha$ =33° et *J1*, *J2* et *J8* avec  $\alpha$ =6° demeure homogène pendant l'essai de fatigue. Aucune chute des microdéformations n'est détectée par les jauges, cela traduit le fait que le joint adhésif n'a subi aucun dommage même miscrocopique.

Par conséquent, avec cet essai de fatigue, qui caractérise la limite mécanique des éprouvettes vierges (sans vieillissement), nous n'avons enregistrées : ni microfissures, ni modifications du comportement mécanique des joints adhésifs. Ces résultats sont vérifiés jusqu' à la fin de l'essai, lorsque  $N=10^6$  cycles.

Cette première observation semble montrer que le vieillissement, dans des états stables de température et d'humidité, ne dégrade pas les caractéristiques intrinsèques la résine époxy.

#### III.3.2. Essais de traction : endommagement des joints adhésifs étudiés en 2006 :

Pour étudier comment le temps modifie le comportement mécanique du joint adhésif, nous avons sollicité en traction simple jusqu'à rupture, des éprouvettes élaborés en 1996 et conservées dans les mêmes conditions que celles sollicitées en fatigue.

Pour plus de clarté, nous avons représenté, dans la suite de ce paragraphe l'évolution des microdéformations superficielles enregistrées par les jauges extensométriques, des échantillons N°1 ainsi que les seuils d'initiation de la première microfissure ( $Fd_p$ ) et le début de propagation de la fissure (Fr) correspondant à la Jauge J2 ou J9 (placées symétriquement à 1,38 mm du bord), car ces jauges sont les plus aptes à détecter les changements d'états relatifs à l'endommagement du joint adhésif. La dispersion de ces seuils est obtenue en analysant les résultats des échantillons N°2 et 3 dont les résultats sont reportés en annexe I. de ce mémoire.

La vitesse de montée en charge est la même que pour les essais réalisés en 1996 ( $25N.s^{-1}$ ). Les Tableaux III-3 et Tableaux III-4 présentent les valeurs moyennes *Fd*, *Fg* et *Fr* des trois essais de chaque type d'éprouvettes étudiées.



III.3.2.1. <u>Eprouvettes biseautées avec un angle  $\alpha = 33^{\circ}$ .</u>

Figure III-14 : Evolution des microdéformations superficielles des substrats  $F=f(\varepsilon)$  de **l'éprouvette** <u>N°1 déterminées à gauche, à partir des jauges J1 (0,38mm) à J5 (4,38mm) et à droite, à partir J6</u> (10,13mm) à J10 (14,13mm) de l'assemblage collé de type sifflet biseauté avec un angle  $\alpha=33^{\circ}$ 

Remarque : Les détails d'interprétation de essais réalisés sur les échantillons N°2 et N°3 figurent dans l'annexe I.1.

Les seuils moyens Fd, Fg, Fr et le diagramme d'endommagement des éprouvettes biseautées avec un angle de 33° sont répertoriés respectivement dans le Tableaux III-3 et la Figure III-15, ci contre.

microfissure, F	'g début	de pro	pagati	ion de	la fis	sure et	Fr rup	oture u	ltime o	le l'ép	rouvette bis	eaut	ée avec
	<u>un angle de <math>\alpha</math>=33° étudiées en 2006</u>												
α=33° (moy)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	_		
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,23	4,38	10,13	11,13	12,13	13,13	14,13	_		
Fd (kN)	5,51	5,26	5,26	5,40	5,44	5,44	5,40	5,30	5,31	5,51	$Fd_p = 5,26$	kN	±0,04kN
Fg(kN)	5,51	5,46	5,43	5,45	5,50	5,47	5,49	5,45	5,48	5,51	$Fg_p = 5,43$	kN	±0,13kN
Fr (kN)	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	Fr = 5.51	kN	±0.14kN

Tableaux III-3 : Valeurs des seuils d'endommagement moyens: Fd initiation de la première



 $\alpha = 33^{\circ}$ 



#### Figure III-15: Histogrammes caractérisant les différents domaines d'endommagement du joint adhésif de l'éprouvette de type sifflet avec angle de biseautage $\alpha = 33^{\circ}$ collée en 1996 testée en 2006



III.3.2.2. <u>Eprouvettes biseautées avec un angle  $\alpha = 6^{\circ}$ </u>

Figure III-16 : Evolution des microdéformations superficielles des substrats  $F=f(\varepsilon)$  de **l'éprouvette** <u>N°1 déterminées à gauche, à partir des jauges J1 (0,38mm) à J11 (14,38mm) et à droite, à partir J12</u> (10,13mm) à J22 (94,76mm) de l'assemblage collé de type sifflet biseauté avec un angle  $\alpha=6^{\circ}$ 

Remarque : Les détails d'interprétation de essais réalisés sur les échantillons N°2 et N°3 figurent dans l'annexe I.2.

Les seuils moyens Fd, Fg, Fr et le diagramme d'endommagement des éprouvettes biseautées avec un angle de 33° sont répertoriés respectivement dans le Tableaux III-4 et la Figure III-17, ci contre.

Tableaux III-4 : Valeurs des seuils d'endommagement moyens : Fd initiation de la premièremicrofissure, Fg début de propagation de la fissure et Fr rupture ultime de l'éprouvettes biseautéeavec un angle de  $\alpha = 6^{\circ}$  étudiées en 2006.

					in ang		-0 $0$	luuice	5 CH 20	<u>,000</u>								
$\alpha = 6^{\circ} \text{(moy)}$	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11							
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	5,38	6,38	<i>7,3</i> 8	<i>8,38</i>	<i>9,3</i> 8	14,38							
Fd(kN)	23,80	20,96	21,41	21,86	22,21	22,35	22,56	23,05	23,42	23,55	23,72							
Fg (kN)	23,80	21,87	22,36	22,59	22,92	23,13	23,38	23,53	23,63	23,64	23,77							
Fr (kN)	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80							
	J12	J13	J14	J15	J16	J17	J18	J19	J20	J21	J22							
Abscisse (mm)	81,76	85,76	86,76	87,76	88,76	89,76	90,76	91,76	92,76	93,76	94,76							
<i>Fd</i> (kN)	23,72	23,55	23,28	23,06	22,78	22,62	22,24	21,84	21,15	22,66	23,80	$Fg_p$	=	20,96	kN	±	1,47	kl
Fg (kN)	23,75	23,67	23,56	23,53	23,40	23,21	22,95	22,58	22,15	23,24	23,80	$Fd_p$	=	21,87	kN	±	1,98	kl
Er(kN)	23.80	23.80	23.80	23.80	23.80	23.80	23.80	23.80	23.80	23.80	23.80	Fr	_	23.80	kN	+	1 16	kI
	25,80	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	23,00	25,00	25,00	25,00	25,00	17		25,00	101 1	÷-	1,10	m



**α=6**°





#### III.3.2.3. Comparaison des résultats entre 1996 et 2006

A partir des résultats des microdéformations enregistrées par jauges extensométriques placées sur les surfaces externes des substrats, nous avons déterminé les seuils d'endommagement Fd, Fg et Fr des joints adhésifs (Tableaux III-3 et Tableaux III-4). La faible dispersion des valeurs montre la bonne reproductibilité des essais.

Les plus faibles valeurs notées  $Fd_p$ ,  $Fg_p$  et Fr permettent de représenter ci-contre les histogrammes caractéristiques des différents domaines d'endommagement et de comparer l'influence du vieillissement sur l'évolution du comportement mécanique entre 1996 et 2006.

L'analyse des données extensométriques Figure III-18 et Figure III-19 montre qu'après un vieillissement de dix ans toutes les valeurs seuils d'endommagement (Fdp, Fgp et Fr) des joints adhésifs augmentent significativement.

En effet :

- Pour α=33°: Fd<sub>p</sub>=4,23±0.07kN en 1996 et Fd<sub>p</sub>=5,27±0,04kN en 2006, soit une augmentation de 25%.
- Pour α=6°: Fd<sub>p</sub>=11,83±0,11kN en 1996 et Fd<sub>p</sub>=20,96±1,7kN en 2006, soit une augmentation de plus de 70%.

De plus, nous constatons que les domaines non-linéaires : domaine élastique complexe  $Fp_d < F < Fg_p$  et domaine de propagation des microfissures  $Fg_p < F < Fr$  diminuent au profit du domaine élastique  $0 < F < Fd_p$  entre 1996 et 2006.

- Pour  $\alpha = 33^{\circ}$ : la taille du domaine non-linéaire  $Fp_d < F < Fg_p$  diminue de 75% et la taille du domaine non linéaire  $Fg_p < F < Fr$  diminue de 72%.
- Pour  $\alpha = 6^{\circ}$ : la taille du domaine non- linéaire  $Fp_d < F < Fg_p$  diminue de 50% et la taille du domaine non linéaire  $Fg_p < F < Fr$  diminue de 40%.





#### **III.3.3.Interprétations**

Toutes les éprouvettes étudiées en 2006 ont montré une résistance à l'endommagement supérieure à celles étudiées en 1996. Les données expérimentales montrent une augmentation du seuil  $Fd_p$  d'initiation des premières microfissures ainsi qu'une diminution des domaines non-linéaires  $Fd_p < F < Fg_p$  et  $Fg_p < F < Fr$  au profit du domaine élastique  $0 < F < Fd_p$ . Cette observation est confirmée pour les deux géométries mais elle est moins marquée quand l'angle de biseautage est faible  $\alpha = 6^{\circ}$ . Nous pouvons l'expliquer par la plus grande flexibilité des substrats effilés qui, comme nous avons déjà noté, permet de réduire la propagation des fissures dans le joint adhésif.

Une recherche précédente [69] sur les structures collées avec un adhésif cyanoacrylic et une résine époxyde semble montrer qu'il n'y a pas variation de la résistance au cisaillement avec le vieillissement. En fait, les résultats expérimentaux décrits dans cette étude montrent que le processus de vieillissement tend à retarder le déclenchement des premières microfissures. C'est particulièrement remarquable pour les grandes longueurs de recouvrement i.e. dans notre cas lorsque  $\alpha = 6^{\circ}$ .

La fatigue mécanique ne peut pas être un élément qui joue un rôle dans l'augmentation de la résistance des échantillons, sur l'initiation des premières microfissures. En effet, contrairement à ce que l'on pourrait prédire, la fatigue exercée pendant les N=10<sup>6</sup> cycles avec un niveau important de charge ( $F_{max}$ =0,8% $Fd_p$ ) ne provoque pas de microfissure dans le joint adhésif.

Certains travaux [70] ont montré que le degré de réticulation d'un adhésif de type époxy, au niveau de l'interface colle/substrat pouvait différer en fonction de la nature et de l'évolution des oxydes en contact. Nous attribuons cette élévation de la rigidité au fait que la réaction de polymérisation n'arrive pas à son terme au bout de quelques jours, comme il est couramment admis. Nous suggérons que, lorsque l'assemblage collé est préservé de toutes agressions extérieures (environnementales ou mécaniques), le nombre de réticulations du réseau polymère continue à croître lentement. Bien sûr cette hypothèse demande à être vérifiée par l'utilisation d'outils spécifiques (microscope électronique à balayage) mais il semble au vu des résultats expérimentaux que l'augmentation de la rigidité du joint adhésif après un vieillissement de dix ans, peut expliquer ce phénomène.

#### **III.4. Conclusions**

Ce travail expérimental a été réalisé pour mettre en lumière le processus de vieillissement naturel de deux joints adhésifs biseautés ( $\alpha$ =33° et  $\alpha$ =6°), entre 1996 et 2006. Les nombreux essais montrent que la méthode expérimentale est capable de déterminer l'endommagement de nos échantillons avec une fiabilité très satisfaisante (la dispersion est généralement comprise entre ±5%).

Un essai de fatigue pendant un million de cycles a été effectué. Cette sollicitation dont la charge maximale correspond à 80% du seuil d'initiation des premières microfissures  $F_{max}$ =80% $Fd_p$  est théoriquement suffisant pour endommager le joint adhésif d'une éprouvette vierge (non vieillie). Cependant, les résultats enregistrés après le vieillissement des éprouvettes, montrent que la fatigue n'affecte plus le comportement mécanique de nos joints adhésifs. Aucune modification du profil des microdéformations à la surface externe des substrats n'est enregistrée lorsque le nombre de charge-décharge croît jusqu'à N=10<sup>6</sup> cycles. Ces premiers résultats sont intéressants car ils laissent supposer que le vieillissement en conditions stables ne dégrade pas la résine époxy.

Des essais de traction ont été réalisés jusqu'à la rupture des échantillons, afin d'étudier l'évolution de l'endommagement des joints collés de type sifflet. Bien qu'il soit admis que les résines époxy préservent une stabilité dimensionnelle avec le temps, l'analyse des différents domaines d'endommagement montre une élévation significative de la résistance à l'amorçage des premières microfissures après un vieillissement naturel de dix ans.

Nous avons mis en évidence qu'un vieillissement de dix ans du joint adhésif permet d'augmenter tous les seuils d'endommagement à savoir : le seuil d'initiation des premières microfissures  $Fd_p$ , le seuil du début de propagation des fissures  $Fg_p$  et la rupture Fr. En outre, les domaines non-linéaires, c'est à dire, le domaine de croissance des microfissures  $Fd_p < F < Fg_p$  et le domaine  $Fg_p < F < Fr$  de propagation des fissures diminuent. Nous attribuons cette évolution du comportement mécanique au fait que la réaction de polymérisation continue de se poursuivre lentement au fur et à mesure des années, multipliant le nombre de réticulations du réseau polymère et donc la rigidité bénéfique du joint adhésif. Le seuil de  $Fp_d$  qui caractérise le premier déclenchement des microfissures représente selon nous la véritable limite mécanique des structures collées. L'analyse de ce seuil permet d'évaluer l'augmentation de la résistance mécanique entre 1996 et 2006, à 25% quand  $\alpha$ =33° et à 60% quand  $\alpha$ =6°.

# **CHAPITRE IV**

# Analyse numérique de l'endommagement des joints adhésifs biseautés

# IV. Analyse numérique de l'endommagement des joints adhésifs biseautés

### **IV.1. Introduction**

Dans ce chapitre, un critère de rupture [71] implémenté dans  $ABAQUS^{\text{(B)}}$  [72] est utilisé pour prédire l'évolution de l'endommagement progressif des joints adhésifs biseautés, lorsque plusieurs paramètres évoluent. Ainsi, la nature des substrats (alliage d'aluminium AU4G et acier XC18), l'épaisseur du joint adhésif ( $e_j$ ) et la valeur de l'angle de biseautage ( $\alpha$ ) sont étudiés. La fiabilité de nos calculs est vérifiée en confrontant les résultats numériques aux résultats expérimentaux issus des travaux antérieurs.

Nos travaux de recherche ont montré que lors d'une sollicitation en traction, l'endommagement du joint de colle est progressif et peut être caractérisé, avant la rupture ultime, par trois seuils biens définis. Le premier seuil, que nous symbolisons Fd, correspond à l'apparition, en régime stable, des premières microfissures dans l'adhésif, le second seuil, symbolisé Fg, marque le début de propagation rapide des fissures au voisinage de la rupture symbolisée Fr. La détermination des niveaux de chargement correspondant à ces seuils permet ainsi de caractériser les performances mécaniques de la liaison collée. Les recherches montrent clairement que les performances de la structure collée dépendent fortement de plusieurs paramètres tels que la nature des substrats, l'épaisseur du joint adhésif, et la valeur de l'angle de biseautage. Les mesures réalisées sur les corps d'épreuve nous ont permis d'obtenir des résultats concrets et d'expliquer les phénomènes observés.

Néanmoins, lors de la formulation de nos interprétations nous nous sommes parfois heurtés aux limites imposées par les conditions pratiques d'obtention des mesures expérimentales. Ainsi, la sensibilité à la rupture par clivage du joint nous a imposé une liaison éprouvette-machine de type « rotulée » alors qu'une liaison de type encastrement serait selon nous plus proche des conditions pratiques d'utilisation de la structure. De même, la fluidité importante de l'adhésif avant sa polymérisation ne nous a pas permis de réaliser des épaisseurs de joint supérieures à 1 mm et les grandes longueurs de recouvrement engendrent des substrats délicats à usiner, à assembler et à instrumenter. C'est pourquoi, il nous a semblé intéressant d'utiliser la modélisation numérique pour étudier le comportement mécanique des joints biseautés. Les résultats expérimentaux ont permis tout d'abord d'orienter la modélisation, notamment en concentrant les calculs dans les zones précises du joint adhésif où nous avons observé l'amorçage des premiers endommagements. Ensuite, ils permettent de vérifier, par comparaison, la pertinence du modèle et sa capacité à prévoir le comportement mécanique réel de la structure. En retour, la modélisation nous permet de lever certaines barrières expérimentales évoquées précédemment. Notamment en étudiant des configurations géométriques (du joint et des substrats) difficilement réalisables en pratique et en caractérisant le comportement micromécanique de zones inaccessibles à la mesure directe.

#### IV.1.1. Modèle d'endommagement

Les principaux aspects du modèle sont brièvement rappelés aussi bien d'un point de vue théorique que numérique. Les équations mécaniques ne sont autres que les équations d'équilibre qui dérivent du principe des puissances virtuelles. Grâce à ces équations, en utilisant la méthode des éléments finis en déplacement (GALERKIN), on obtient après assemblage le système algébrique non linéaire suivant:

$$\{[M]\{\ddot{u}\} - \{F(u)\} = 0$$
 (IV.1)

• avec [M] la matrice masse :

$$[M] = \sum_{j} \int_{V^{j}} \rho \left[ N^{k} \right]^{T} \left[ N^{i} \right] dV$$
(IV.2)

• {F} est le vecteur des sollicitations mécaniques donné par :

$$\left\{F(u,T)\right\} = \sum_{j} \left\{-\int_{V^{j}} \left[B^{k}\right]^{T} \left\{\underline{\sigma}\right\} dV + \int_{V^{j}} \left[N^{k}\right]^{T} \left\{f_{d}\right\} dV + \int_{S_{F}^{j}} \left[N^{k}\right]^{T} \left\{t\right\} dS + \int_{S_{c}^{j}} \left[N^{k}\right]^{T} \left[t_{c}\right] dS\right\}$$
(IV.3)

Dans ces équations  $\{\ddot{u}\}$  est le vecteur d'accélération nodal,  $\{u\}$  le vecteur déplacement. Le vecteur  $\{f_d\}$  représente les forces de volume, le vecteur  $\{t\}$ , les forces surfaciques et le vecteur  $\{t_c\}$ , les forces de contact. La matrice [N] définit respectivement les fonctions d'interpolation du déplacement, [B] leurs dérivés spatiales et  $\rho$  est la densité du matériau. Les différentes variables sont :

- $(\underline{\sigma}, \underline{D}^p)$  la contrainte de Cauchy et le tenseur du taux de déformation plastique assumant  $\underline{D} = \underline{\dot{\varepsilon}}_j^e + \underline{D}^p$  où  $\underline{D}$  est le taux de déformation totale et  $\underline{\dot{\varepsilon}}_j^e$  est le taux de déformation élastique selon JAUMANN.
- $(Y, \dot{D})$  les variables scalaires représentant l'endommagement.

Pour résoudre le système (IV.1) en ce qui concerne le déplacement (u, v, w), des schémas explicites de résolution sont employés en utilisant le logiciel  $ABAQUS^{\textcircled{B}}$ . La résolution se fait séquentiellement sur l'intervalle de temps  $[t_n, t_{n+1} = t_n + \Delta t]$  selon le système (IV.1), la démarche suivante est utilisée:

• Résolution du problème mécanique :

$$\{\ddot{u}_n\} = [M]^{-1} \{F(u_n)\}$$
 (IV.4)

$$\left\{ \dot{u}_{n+\frac{1}{2}} \right\} = \left\{ \dot{u}_{n-\frac{1}{2}} \right\} + \frac{\Delta t_{n+1} + \Delta t_n}{2} \left\{ \ddot{u}_n \right\}$$
(IV.5)

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \Delta t_{n+1} \left\{ \dot{u}_{n+\frac{1}{2}} \right\}$$
(IV.6)

Cette stratégie explicite de résolution a besoin d'une routine utilisateur *VUMAT*<sup>®</sup> (voir le manuel utilisateurs *ABAQUS*<sup>®</sup>/explicit [74]) pour calculer  $\sigma_{n+1}$  et  $t_{c_{n+1}}$  afin d'évaluer {F(u)} (voir l'équation (IV.3))

Pour le problème mécanique, le calcul des forces de contact  $\{t_c\}$  est effectué en employant le modèle de frottement de type Coulomb disponible dans  $ABAQUS^{(0)}$  et défini par le coefficient de frottement  $\eta$  (voir les hypothèses pages 88-89). Le calcul des différents champs mécaniques est réalisé en intégrant numériquement les équations différentielles ordinaires suivantes (modèle de comportement):

• Pour le champ plastique

$$\begin{cases} \underline{\sigma} = (1-D) \left[ \lambda_e \left( \underline{\varepsilon}^e : \underline{1} \right) \underline{1} + 2\mu \underline{\varepsilon}^e \right] \\ \underline{D}^p = \dot{\lambda} \frac{3}{2} \frac{1}{\sqrt{1-D}} \frac{S}{J_2 \cdot \underline{\sigma}} = \dot{\lambda} \underline{n} \end{cases}$$
(IV.7)

Pour l'endommagementt :

$$\begin{cases} \dot{D} = \frac{\dot{\lambda}}{(1-D)^{\beta}} \left[ \frac{Y-Y_0}{S} \right]^s \\ Y = \frac{1}{2} \lambda_e \left( \underline{\varepsilon}^e : \underline{1} \right)^2 + \mu \underline{\varepsilon}^e : \underline{\varepsilon}^e \end{cases}$$
(IV.8)

Avec :  $\lambda$  le multiplicateur de la LAGRANGE,  $\lambda_e$  et  $\mu$  sont les coefficients de LAMÉ  $\lambda_e = E v/[(1+v)(1-2v)]$  et  $\mu = E/[2(1+v)]$  et *s*, *S*, *Y*<sub>0</sub> et  $\beta$  sont les paramètres matériau caractérisant l'évolution de l'endommagement. Ces différents paramètres sont déterminés expérimentalement.

L'intégration numérique de ce système est exécutée par une résolution implicite après avoir réalisé une réduction du nombre d'équation [72-73]. L'implémentation de ce modèle dans  $ABAQUS^{\text{®}}$  via la routine  $VUMAT^{\text{®}}$  a été faite de telle sorte que le calcul se fait avec couplage comportement – endommagement.

#### IV.2. Paramètres de la modélisation

#### IV.2.1. Choix de l'éprouvette expérimentale de référence

Nous avons recalé le modèle numérique avec une géométrie simple d'assemblage collé en biseau. Le corps d'épreuve sélectionné est une éprouvette constituée de deux substrats en Acier XC18 biseauté avec un angle  $\alpha$ =33° et assemblé par l'intermédiaire d'une résine époxy *EPONAL 317*<sup>®</sup>. Cette structure présente l'avantage d'avoir une longueur de recouvrement assez faible ce qui limite le nombre d'éléments utilisés (et donc le temps de calcul) pour mailler le joint adhésif et la valeur élevée de l'angle de biseautage n'entraîne pas d'importantes perturbations dues aux effets de bord.

#### IV.2.2. Hypothèses

Les calculs par éléments finis sont effectués avec le logiciel *ABAQUS*<sup>®</sup>, sur diverses configurations géométriques du joint adhésif. Les structures collées biseautées sont modélisées comme un problème en deux dimensions (2D) en déformations planes, avec une échelle géométrique similaire aux éprouvettes expérimentales.

Les calculs sont réalisés avec les lois de comportement réel des adhérents et adhésifs (acier XC18, aluminium AU4G et Adhésif *EPONAL 317*<sup>®</sup>). Les matériaux sont considérés comme homogènes et isotropes.

Lorsque l'état de surface est optimal, la résistance au cisaillement de l'interface colle/substrat est supérieure à la résistance du cisaillement de la colle. Dans ces conditions, la rupture a lieu dans la couche adhésive (rupture cohésive), pour un niveau de chargement maximal. C'est pourquoi, dans notre analyse numérique le contact entre le joint adhésif et les substrats est considéré comme parfait.

#### IV.2.3. Recalage du modèle numérique

Plusieurs paramètres numériques doivent être ajustés afin d'optimiser la précision des résultats et limiter le temps de résolutions du problème qui peut devenir rapidement un facteur handicapant pour l'enchaînement des calculs. Tous nos calculs sont effectués sur une station de travail dotée d'une très forte puissance de calcul. Il s'agit d'une station *DELL PRECISION 670 MiniTower*. Cette station est équipée d'un processeur qui intègre deux coeurs *Xeon* (2,8GHz) et dispose de 4Go de mémoire vive.

#### IV.2.3.1. Conditions aux limites

La résistance d'un assemblage collé est maximale, si l'ensemble de la structure travaille de façon homogène. Il est donc important d'éviter (autant que possible), les zones de concentration de contraintes. Pour éviter une flexion parasite du joint adhésif, induit par un mauvais alignement de l'éprouvette, nous utilisons pour nos études expérimentales des mors rotulés qui permettent de maintenir un bon alignement entre la direction de chargement et l'assemblage collé. C'est pourquoi chaque modèle en 2D, illustré par la Figure V-1, respecte les conditions limites expérimentales représentées. Seuls les déplacements sont bloqués et les rotations (R1, R2) sont laissées libres.





#### IV.2.3.2. Influence du maillage

Le type d'élément et la densité du maillage influent sur la prédiction des résultats. La géométrie d'une éprouvette biseautée nous amène naturellement à utiliser un élément triangulaire CPE3, Figure IV-5. Le maillage est grossier, loin des zones d'études car les valeurs des contraintes et des déformations sont relativement basses et uniformes. En revanche la couche adhésive doit faire l'objet d'un recalage afin de trouver la bonne adéquation entre le temps de calcul et la précision des résultats. Les résultats obtenus pour différentes finesses de maillage du joint adhésif (taille des éléments (*h*) de type CPE3 0,025 < h < 0,2) montrent une valeur optimale égale 0,1 qui permet d'obtenir de bons résultats sur la rupture ultime, pour une durée de calcul raisonnable.





#### IV.2.3.3. Influence de la vitesse de montée en charge

Le choix de la vitesse de montée en charge est un facteur important qui influe beaucoup, sur le temps de calcul, mais aussi sur la prédiction de la rupture des éprouvettes modélisées. Les calculs illustrés dans la Figure IV-4, montrent l'influence de ce paramètre. Lorsque la vitesse de charge est importante, la ruine de l'assemblage intervient de façon précoce. Il est intéressant de noter que la prédiction du modèle est satisfaisante lorsque la vitesse de chargement est proche de la vitesse de traction expérimentale à savoir 25N.s<sup>-1</sup>. Dans cette

configuration la durée de calcul est proche de 5h00 ce que nous considérons comme acceptable. Ainsi cette vitesse de chargement est conservée pour toutes les éprouvettes modélisées.



Figure IV-3 : (a) Recalage de la vitesse de chargement en fonction de la rupture ultime expérimentale de l'éprouvette témoin (b) durée du calcul jusqu'à la rupture du joint adhésif en fonction de la vitesse de chargement

# IV.2.3.4. Influence de la limite d'élasticité en fonction de l'épaisseur du joint adhésif

La limite d'élasticité expérimentale  $\sigma_{e exp}$  est voisine de la contrainte à la rupture  $\sigma_{r exp}$  de la résine époxy, lorsque celle-ci se présente sous la forme d'une éprouvette normalisée à l'état massive, diffère lorsque l'épaisseur de la résine est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre [75].

D'un point de vue numérique il convient donc d'ajuster la limite d'élasticité de l'adhésif étudié, en fonction de la géométrie utilisée lors de la fabrication de l'assemblage. Après plusieurs calculs Figure IV-4, où la limite d'élasticité numérique  $\sigma_{e num}$  varie de 30MPa à 50MPa, nous constatons qu'il est nécessaire d'apporter une correction +50% sur  $\sigma_{e exp}$ . La limite d'élasticité numérique du joint adhésif qui est la mieux adaptée pour notre modèle est donc égale à  $\sigma_{e num}$ =46MPa.

	6.0		
	5.6	+	
	5.2	Rupture <u>0 46 M</u> Pa	
î	4.8		
ne (k	4.4		
ultir	4.0		
oture	3.6	30 MPa	$\sigma_{e num} = 1.5 \sigma_{e exp}$
Rup	3.2		
	2.8	╋╺┥╼╠╸┽╺╬╾╞╸╃╼╠╸╪╼╎╸╄╺┥╸┡╸┽╼╠╸┽╼╎╸┽╺╎╸┽	
	2.4	Rupture Num	
	2.0		
	2	25 28 31 34 37 40 43 46 49 52 55	
		Limite d'élasticité (MPa)	

 Figure IV-4 : Recalage de la limite d'élasticité : augmentation de la résistance de la couche adhésive

 pour une épaisseur  $e_j = 0,2mm$ .

#### IV.2.4. Conclusion sur le recalage du modèle numérique

Les différents paramètres numériques retenus, après l'étude de leurs influences sont décrits ci-dessous :



Figure IV-5 : Illustration de l'assemblage collé de type sifflet (angle de biseautage  $\alpha = 33^{\circ}$  et épaisseur du joint adhésif  $e_i = 0,2mm$ )

- Les conditions limites caractérisent les degrés de liberté de l'ancrage mécanique expérimental (mors rotulés).
- Le maillage utilise des éléments tétraédriques de type CPE3. le nombre de nœud dans le joint adhésif correspond au dixième de l'unité de longueur.
- La vitesse de chargement appliquée correspond à la vitesse de chargement expérimentale 25N.s<sup>-1</sup>.
- La correction sur la limite d'élasticité  $\sigma$ e est de +50% soit  $\sigma_{e num}$ =46MPa.

# IV.3. Confrontation des résultats expérimentaux et numériques

#### IV.3.1. Influence de la nature des substrats

L'objet de ce paragraphe est de vérifier la capacité du modèle numérique à prédire l'influence de la nature des substrats sur l'évolution de l'endommagement des joints adhésifs. Pour réaliser cette étude, nous avons modélisé deux éprouvettes identiques (angle de biseautage  $\alpha$ =33° et épaisseur joint adhésif  $e_j$ =0,2mm) mais la nature des substrats sera d'une part en acier (E=210GPa, v=0,3) et d'autre part un alliage d'aluminium (E=72GPa, n=0,3).

### IV.3.1.1. <u>Résultats expérimentaux et numériques des déformations superficielles</u> <u>des couvre-joints</u>

L'analyse des résultats expérimentaux obtenus lors de nos essais précédents, montre que, quelque soit la nature des substrats, la rupture du joint de colle est cohésive. Cela tend à montrer que la résistance de la structure collée est limitée par la résistance intrinsèque de la couche adhésive qui est théoriquement constante. Or nos résultats montrent que les valeurs des seuils d'endommagements (Fd, et Fr) sont supérieurs avec les substrats les plus rigides.

Dans les deux configurations étudiées (substrats en acier et en alliage d'aluminium) les mesures des jauges (Figure IV-6) montrent que les valeurs des microdéformations expérimentales, de la surface externe des substrats, sont uniformes sur une grande partie de la longueur du recouvrement (3mm<x<14mm) et croissent de manière significative aux extrémités (1mm<x<3mm). Le fait intéressant est que cette croissance des microdéformations est plus importante avec les substrats en alliage d'aluminium. La confrontation entre les valeurs théoriques et expérimentales est satisfaisante le long du couvre joint. Les microdéformations sont uniformément distribuées sur la surface externe des substrats, excepté à l'extrême pointe du coin du substrat où le gradient des microdéformations est très intense. Il est intéressant d'étudier l'influence de ces déformations sur l'évolution de l'endommagement et plus particulièrement sur l'initiation des premières microfissures.

Numériquement, l'initiation de la première microfissure  $(Fd_{p num})$  correspondant au premier élément endommagé D=1. L'endommagement numérique total  $(Fr_{num})$  est déterminé lorsque tous les éléments du joint adhésif sont endommagés.



<u>Figure IV-6:</u> Influence de la nature des substrats (acier XC18 ou alliage d'aluminium AU4G) sur l'évolution des microdéformations de la surface externe des substrats : l'épaisseur de la couche adhésive est  $e_j$ =0,2mm, l'angle de biseautage est  $\alpha$ =33°et le chargement est F=3kN.

 Tableau IV-1 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et numériques des seuil Fd<sub>p</sub> d'amorçage

 des premières microfissures et Fr rupture ultime du joint adhésif de type sifflet

	AU4G	XC18
Fd <sub>p exp</sub>	4,35	4,94
$Fd_{p num}$	4,78	5,44
Fr <sub>exp</sub>	4,55	4,92
Fr num	5,15	5,38



Figure IV-7 : Confrontation expérimentale et numérique du domaine linéaire et non linéaire des joints adhésifs, en fonction de la nature des substrats (alliage d'aluminium AU4G ou acier XC18).

# IV.3.1.2. <u>Résultats expérimentaux et numériques de l'endommagement progressif</u> <u>des joints adhésifs</u>

La Figure IV-7 montre la variation de la valeur des seuils expérimentaux et numériques  $Fd_p$  et Fr. Ces seuils correspondent aux différents domaines qui caractérisent l'endommagement progressif du joint collé en fonction de la nature des substrats.

Les résultats obtenus expérimentalement montrent que l'initiation des premiers endommagements du joint adhésif diffère en fonction de la nature des substrats. En effet :

- Lorsque les substrats sont en alliage d'aluminium AU4G, l'initiation de la première microfissure se produit pour une force de  $Fd_p$ =4,35kN.
- Lorsque les substrats en acier XC18 la première microfissure est initiée pour une force de *Fd<sub>p</sub>*=4,94kN.

L'endommagement de la liaison collée est donc plus précoce dans le cas ou les substrats sont en alliage d'aluminium et nous constatons que la rupture ultime est près de 20% supérieure avec des substrats en acier XC18.

La prédiction de l'endommagement par le modèle numérique est aussi satisfaisante. Elle montre avec une bonne adéquation que l'endommagement commence plutôt lorsque la rigidité du substrat diminue. Par conséquent, nous pensons que c'est la rigidité élevée de la liaison collée (métal-colle-métal) qui accroît les performances de la structure en faisant tendre son comportement mécanique vers les caractéristiques idéales d'un barreau homogène.

En confinant de manière rigide la fine couche de colle, les substrats s'opposent aux microdéformations du polymère et les répartissent de manière plus homogène dans toute la masse de l'adhésif, et confèrent ainsi à l'ensemble du joint la rigidité supérieure.

#### IV.3.2. Influence de l'épaisseur du joint adhésif

Dans ce paragraphe nous vérifions la capacité du modèle numérique à prédire l'influence de l'épaisseur du joint adhésif sur l'évolution de l'endommagement. Pour réaliser cette étude, nous faisons varier l'épaisseur du joint adhésif de 0,2mm à 1mm par incrément de 0,2mm, l'épaisseur de l'angle de biseautage est fixe  $\alpha$ =33° et les substrats sont en acier.

## IV.3.2.1. <u>Résultats expérimentaux et numériques des déformations superficielles</u> <u>des couvre-joints</u>

Nous avons représenté (Figure IV-8) les résultats expérimentaux et numériques des microdéformations de la surface externe du substrat pour différentes épaisseurs du joint adhésif  $0,2 \le e_j \le 1$ mm. Ces microdéformations sont mesurées pour un niveau de chargement identique F=3kN (F=3kN correspond au seuil expérimental avant lequel la première microfissure apparaît pour l'éprouvette la plus fragile ( $e_j=1$ mm)). Sur cet ensemble de courbes, il est remarquable que les microdéformations de la surface externe du substrat augmentent significativement près de l'extrémité biseautée de l'angle avec l'augmentation de l'épaisseur du joint adhésif (0,2mm, 0,4mm, 0,6mm, 0,8mm et 1mm).

Certaines observations expérimentales, montrent que la rupture du joint est exclusivement cohésive (rupture au centre du joint) pour les épaisseurs inférieures à 0,3 mm, puis mixtes entre 0,4 et 0,6 mm et enfin principalement adhésive (rupture à l'interface) au delà de 0,8 mm, ce qui nous fait penser que d'autres phénomènes micromécaniques, préjudiciables aux performances de la liaison collée, apparaissent lorsque l'épaisseur du joint augmente.

Notre hypothèse est que l'action « rigidifiante » des substrats, favorable à la structure décroît avec la croissance de l'épaisseur de l'adhésif. La déformation de la couche de colle lors de la sollicitation, entraîne un glissement relatif des substrats dans le plan du biseau qui tend à désaxer progressivement les deux substrats. Les efforts ne sont plus, par conséquent, rigoureusement alignés avec la direction de la sollicitation. Il en résulte alors un léger effet de flexion parasite qui favorise la concentration des contraintes aux extrémités du joint et à l'interface colle-métal.





Les résultats numériques montrent une évolution similaire, avec une adéquation satisfaisante sur une grande partie de la zone étudiée. Cependant une légère inadéquation apparaît à l'extrémité du biseau lorsque  $e_j$  augmente. Nous pensons que cette évolution des déformations est due à l'existence d'un glissement des substrats dans le plan du biseau, d'autant plus grand que l'épaisseur est importante.

#### *IV.3.2.2.* <u>Etude d'un cas extrême e<sub>j</sub>=5mm</u>

La réalisation d'un joint d'épaisseur supérieure à 1 mm est quasi impossible en pratique du fait de la grande fluidité de l'adhésif non polymérisé lors du collage. Nous avons donc utilisé la modélisation pour étudier le cas d'un joint exagérément épais ( $e_j=5$  mm) afin de constater, en les amplifiant artificiellement, les phénomènes mécaniques décrits précédemment (Figure IV-9).

Pour ce calcul le modèle de rupture est ignoré et le joint adhésif est considéré comme purement élastique. Cette modélisation, irréalisable expérimentalement, nous permet de visualiser un déplacement théorique du joint adhésif suivant la direction *11*. Il semble ainsi que l'effet pénalisant de la flexion s'ajoute à la concentration naturelle des contraintes dans les zones du joint voisine des singularités angulaires.



Figure IV-9 : Visualisation du glissement du joint lorsque *e<sub>i</sub>*=5mm

# IV.3.2.3. <u>Résultats expérimentaux et numériques de l'endommagement progressif</u> <u>des joints adhésifs</u>

La Figure IV-10 semble confirmer l'effet néfaste d'un joint épais sur l'évolution de l'endommagement du joint adhésif. La résistance maximale est en effet obtenue pour une épaisseur de joint adhésif  $e_j$ =0,2mm. Puis, lorsque  $e_j$  augmente jusque 1mm, les performances des joints adhésifs définies par les seuils  $Fd_p$  et Fr diminuent progressivement.

La précision du modèle numérique pour prédire l'initiation et la rupture ultime est satisfaisante pour la plupart des éprouvettes. Notons cependant, que la précision diminue légèrement lorsque l'épaisseur du joint devient importante ( $e_i$ >0,8mm).

L'hypothèse du glissement du joint adhésif, mis en évidence par l'étude numérique précédente, et l'accentuation des effets de bord qui en découle, explique selon nous cette légère inadéquation lorsque l'épaisseur du joint augmente.



<u>Figure IV-10: Confrontation des résultats expérimentaux et numériques : (a) de l'initiation de la première microfissures et (b) de la rupture ultime des joints adhésifs en fonction de leur épaisseur.</u>

#### IV.3.3. Influence de l'angle de biseautage

Le dernier point à vérifier est la capacité du modèle numérique à prédire l'influence de l'angle de biseautage sur l'évolution de l'endommagement des joints adhésifs. Pour réaliser cette étude, nous avons modélisé cinq éprouvettes présentant des angles  $\alpha$  variables : 45°, 33°, 18°, 10° et 6° l'épaisseur du joint adhésif est fixe  $e_i=0,2mm$  et les substrats sont en acier.

## IV.3.3.1. <u>Résultats expérimentaux et numériques des déformations superficielles</u> <u>des couvre-joints</u>

Les résultats expérimentaux de la Figure IV-11 montrent les microdéformations expérimentales et numériques de la surface externe des substrats en fonction de la valeur de l'angle de biseautage lorsque F=2kN (F=2kN correspond au seuil expérimental avant lequel la première microfissure apparaît pour l'éprouvette la plus fragile ( $\alpha=45^\circ$ )). Il est remarquable que ces déformations augmentent significativement près des extrémités de l'angle avec la diminution de l'angle de biseautage ( $45^\circ$ ,  $33^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $6^\circ$ ).

La comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux est satisfaisante quand l'angle de biseautage est important ( $\alpha$ =45° ou  $\alpha$ =33°), mais elles diminuent quand l'angle de biseautage devient très faible ( $\alpha$ <18°). Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette légère inadéquation. D'un point de vue expérimental, l'influence du sablage mécanique des subjectiles, est un paramètre difficile à contrôler avec précision lorsque les biseaux sont très effilés (angle de biseautage faible). Le sablage peut plastifier localement la pointe du biseau des substrats et modifier ainsi le profil des contraintes donc des déformations. D'un point de vue numérique, l'élément utilisé (CPE3) ne prend en compte la pression hydrostatique. Or ce paramètre est probablement non négligeable lorsque les effets de bord sont, dans le cas d'un angle de biseautage faible, très importants. Ces deux paramètres (ou le cumul des deux) peuvent selon nous expliquer l'inéquation observée.

La répartition hétérogène des déformations lorsque  $\alpha$  diminue, est selon nous préjudiciable car elle favoriserait l'apparition des premières microfissures, même si parallèlement, la surface de collage augmente. Il convient de vérifier l'influence de cette répartition des déformations sur l'évolution de l'endommagement des joints adhésifs en fonction de la valeur de l'angle de biseautage.


Figure IV-11 : Influence l'angle de biseautage sur l'évolution des microdéformations expérimentaleset numériques de la surface externe des substrats. Les substrats sont en acier XC18, l'épaisseur du<br/>joint adhésif est fixée  $e_j=0,2mm$  et la force de traction est de F=2kN.

#### IV.3.3.2. <u>Résultats expérimentaux et numériques de l'endommagement progressif</u> <u>du joint collé</u>

La Figure IV-12 montre que ce paramètre a un effet très important sur l'évolution des seuils d'endommagement  $Fd_p$ , et Fr. En effet l'initiation des premières microfissures augmente en fonction de la diminution de l'angle de biseautage mais se stabilise après  $\alpha$ =18°. Cependant, la rupture ultime continue d'augmenter.

Ainsi, il est remarquable que pour un angle de biseautage important ( $45^{\circ}$  et  $33^{\circ}$ ), le comportement mécanique du joint adhésif est plutôt fragile. Puis, quand la valeur de l'angle diminue, la différence entre l'apparition des premières microfissures et la rupture ultime est de plus en plus importante, le joint adhésif acquiert un comportement mécanique plus plastique.

Le modèle numérique prédit avec une bonne précision, pour la plupart des éprouvettes  $(18^{\circ} < \alpha < 45^{\circ})$ , l'évolution de l'endommagement quand l'angle de biseautage évolue. Mais une inadéquation apparaît quand l'angle de biseautage devient très faible ( $\alpha < 18^{\circ}$ ). Les hypothèses qui expliquent cette inadéquation (influence du sablage mécanique et/ou pression hydrostatique ignorée) induisent une sous-estimation de l'intensité des perturbations dues aux effets de bord qui favorisent l'apparition précoce des premières microfissures.





#### **IV.4. Conclusions**

Ce travail montre tout l'intérêt d'utiliser un modèle numérique associé à des résultats expérimentaux pour comprendre et expliquer beaucoup de mécanismes souvent complexes et parfois paradoxaux qui gouvernent le comportement mécanique et l'évolution de l'endommagement des assemblages collés.

Les données expérimentales ont orienté nos travaux et ont permis la comparaison avec des prédictions théoriques, utilisant un modèle de rupture. La confrontation théorieexpérience est effectivement encourageante car elle montre la capacité du modèle numérique à prendre en compte l'influence les différents paramètres étudiés (mécaniques et géométriques) et pour prédire avec une bonne précision la rupture mais aussi l'initiation des premières microfissures dans la couche adhésive. La performance optimale d'un joint adhésif biseauté est en étroite relation avec le retard du déclenchement des premières microfissures. Il apparaît que cette condition est obtenue dans notre étude lorsque: le substrat est rigide (acier XC18), la couche adhésive est fine ( $e_j$ =0,2mm) et l'angle de biseautage est faible mais pas inférieur à  $\alpha$ =18°.

La comparaison montre également les limites de la modélisation à prévoir efficacement le comportement micromécanique local du joint adhésif lorsque l'influence de certains phénomènes est plus grande : singularités géométriques, glissement de substrats dans le plan du biseau... Une légère inadéquation est alors observée, principalement pour prédire l'initiation des premières microfissures dans le joint adhésif. En effet, le modèle numérique semble être limité par le comportement non linéaire complexe des zones qui jouxtent et interagissent avec les zones élastiques non endommagées.

Pour la plupart des assemblages collés, notre modèle est capable de prédire avec une bonne précision, l'évolution de l'endommagement des joints adhésifs. Dans le chapitre suivant nous utiliserons la modélisation numérique des assemblages avec le modèle d'endommagement [71] pour appuyer certains résultats expérimentaux relatifs à l'assemblage collé de type double sifflet. Cet assemblage particulier a une géométrie qui présente plusieurs angles aigus et obtus qui rendent difficile l'interprétation expérimentale de son endommagement.

## **CHAPITRE V**

# Etude expérimentale et numérique des liaisons collées de type double sifflet

## V. Etude expérimentale et numérique des liaisons collées de type double sifflet

#### V.1. Introduction

Passer de l'assemblage de type sifflet à l'assemblage de type double sifflet (Figure V-1) est cohérent car ces deux assemblages ont en commun de nombreuses similitudes (même angle de biseautage, pas de flexion,...). Cependant, la géométrie du double sifflet présente en plus des angles aigus et obtus aux extrémités des substrats et au sommet du Vé interne dont l'influence sur la résistance des joints adhésifs est un facteur qui nous semble intéressant d'étudier.

Lorsque ce type d'éprouvette est sollicité en traction, une concentration des contraintes se développe au niveau de la singularité géométrie centrale. Nous pensons que la présence du Vé peut engendrer (lorsque celui-ci est très effilé) l'initiation de microfissures pour des niveaux de chargement relativement faibles. A notre connaissance seul Y. GILIBERT [62] a étudié l'évolution de l'endommagement dans une éprouvette de type double sifflet pour une géométrie bien définie ( $\alpha$ =6°  $e_j$ =0,4mm).

Dans ce chapitre, nous avons cherché à déterminer l'influence du Vé interne sur l'évolution de l'endommagement, pour trois angles de biseautage différents ( $\alpha$ =33°,  $\alpha$ =18°,  $\alpha$ =6°). L'influence du Vé interne est étudiée en confrontant les valeurs des seuils d'endommagement de trois éprouvettes biseautées ayant respectivement la même valeur de biseautage (même longueur de recouvrement du joint adhésif).

La première partie de cette étude est expérimentale. Les mesures sont réalisées en utilisant la technique expérimentale de l'extensométrie utilisée dans le Chapitre III. Cette technique permet de déterminer avec une bonne précision les différents domaines d'endommagement sur une grande partie du joint et permet de mettre en avant l'influence significative de la singularité centrale, sur la résistance mécanique des assemblages. Cependant, l'épaisseur du substrat entre l'extrémité du Vé et la partie externe du couvre joint (5mm) peut masquer ou diminuer les changements d'états du joint adhésif lorsque les microfissures apparaissent. C'est pourquoi, il nous a semblé utile dans la deuxième partie de cette étude de poursuivre nos analyses en utilisant le modèle numérique d'endommagement utilisé au Chapitre IV et qui a montré une bonne adéquation pour l'assemblage de type sifflet.

Enfin, une analyse thermographique par élasticimétrie a été réalisée pour confirmer les résultats précédents et pour tenter de voir la zone d'amorçage des premières microfissures et leurs propagations dans le joint adhésif.

#### V.2. Etude expérimentale de l'endommagement des joints adhésifs

Pour cette étude nous avons réalisé trois essais sur : des éprouvettes de type sifflet et trois éprouvettes de type double sifflet pour chaque angle de biseautage étudié ( $\alpha$ =33°,  $\alpha$ =18° et  $\alpha$ =6°). Les matériaux constituants les substrats sont en acier XC18 (module d'Young E=210GPa et coefficient de Poisson 0,3).

L'adhésif et du type *SIKADUR 30 COLLE*<sup>®</sup> (module d'Young E=12,3GPa et coefficient de poisson 0,3). La technique de pré collage (usinage et traitement mécanique des subjectiles) puis d'assemblage, respecte la procédure développée au Chapitre II.



#### V.2.1. Corps d'épreuve étudiés



#### V.2.2. Instrumentation des assemblages de type sifflet et double sifflet

Dans cette étude nous avons instrumenté nos corps d'épreuves avec des chaînettes de jauges de types 1/120 KY11. Ces jauges sont d'une grande finesse (la distance entre les jauges est 0,75mm) et sont selon nous les plus aptes à localiser les premiers endommagements à l'aplomb du Vé interne. Les premiers endommagements apparaissent, pour les assemblages collés de type sifflet à l'extrémité des substrats, là où les contraintes se concentrent. Nous avons donc également concentré nos jauges électriques à ce niveau.



Figure V-2 : Disposition des chaînettes de jauge de type 1/120 KY11 sur la surface externe des assemblages de type sifflet





#### V.2.3. Analyse des courbes extensométriques et diagrammes d'endommagement des assemblages de type sifflet

Pour étudier comment une singularité géométrique interne modifie le comportement mécanique du joint adhésif, nous avons analysé l'évolution de l'endommagement des joints adhésifs entre des éprouvettes de type sifflet (joint de colle continu) et des éprouvettes de type sifflet (présence d'un Vé interne). Les assemblages sont soumis à un essai de traction jusqu'à leur rupture.

Pour plus de clarté, nous avons représenté, dans la suite de ce paragraphe l'évolution des microdéformations superficielles enregistrées par les extensométriques, des échantillons N°1 ainsi que les seuils d'initiation de la première microfissure ( $Fd_p$ ) et le début de propagation de la fissure (Fr) correspondant à la Jauge J2, car cette jauge est la plus apte à détecter les changements d'états relatifs à l'endommagement du joint adhésif. L'erreur de ces seuils est obtenue en analysant les résultats des échantillons N°2 et 3 de tous les corps d'épreuves étudiés dont les résultats sont reportés dans l'annexe II.

L'analyse des seuils d'endommagement Fd, Fg et Fr permet de déterminer la reproductibilité des expériences et de déterminer l'évolution de l'endommagement caractéristique des joints adhésifs en fonction de l'angle de biseautage et de la présence ou non du Vé interne.



#### V.2.3.1. Assemblages biseautés avec un angle de 33°

Figure V-4 : Evolution des microdéformations superficielles des substrats  $F = f(\varepsilon)$  de l'échantillon N°1déterminées à partir des jauges J1 (0,38mm) à J4 (3,38mm) de l'assemblage collé de type siffletbiseauté avec un angle  $\alpha = 33^{\circ}$ 

Remarque : Les détails d'interprétation des essais réalisés sur les échantillons N°2 et N°3 figurent dans l'annexe II.1.

Les seuils moyens Fd, Fg, Fr et le diagramme d'endommagement des éprouvettes biseautées avec un angle de 33° sont répertoriés respectivement dans le Tableaux V-1 et la Figure V-5 ci contre.

<u>Tableaux V-1 : Evolution de la valeur des seuils d'endommagement moyens *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 33°, par les jauges J1 (0,38mm) à J4 (3,38mm).</u>

Biseau 33° (moy)	J1	J2	J3	J4							
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38							
Fd (kN)	5,22	4,41	4,54	4,68	1	$Fd_p =$	4,41	kN	±	0,29	kN
Fg(kN)	5,22	4,88	4,86	4,97	1	$Fg_p =$	4,86	kN	±	0,23	kN
Fr (kN)	5,22	5,22	5,22	5,22	1	r =	5,22	kN	±	0,20	kN









#### V.2.3.2. Assemblages biseautés avec un angle de 18°

Figure V-6 : Evolution des microdéformations superficielles des substrats  $F = f(\varepsilon)$  de l'échantillon N°1déterminées à partir des jauges J1 (0,38mm) à J5 (4,38mm) de l'assemblage collé de type siffletbiseauté avec un angle  $\alpha = 18^{\circ}$ 

Remarque : Les détails d'interprétation des essais réalisés sur les échantillons N°2 et N°3 figurent dans l'annexe II.2.

Les seuils moyens Fd, Fg, Fr et le diagramme d'endommagement des éprouvettes biseautées avec un angle de  $18^{\circ}$  sont répertoriés respectivement dans le Tableaux V-2 et la Figure V-7 ci contre.

pour les trois e	échantillons	de type	sifflet a	vec un ai	ngle de 1	8°, par le	s jau	iges J1	1 (0,3	8mm) à J5
				(4,38mm	<u>ı).</u>					
Biseau 18°	J1	J2	J3	J4	J5					
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38					
Fd (kN)	8,24	6,59	7,00	7,17	7,72	$Fd_p$	=	6,59	kN	± 0,76 kN
Fg(kN)	8,24	7,74	7,94	8,09	8,12	$Fg_p$	=	7,74	kN	± 0,58 kN
Fr (kN)	8,24	8,24	8,24	8,24	8,24	Fr	=	8,24	kN	± 0,49 kN

Tableaux V-2 : Evolution de la valeur des seuils d'endommagement moyens Fd, Fg, Fr enregistrés





<u>Figure V-7 : Représentation des différents domaines d'endommagement de l'assemblage collé de type</u> <u>sifflet. Cas de l'éprouvette avec un angle de biseautage de 18°</u>



#### V.2.3.3. <u>Assemblages biseautés avec un angle de 6°</u>

Figure V-8 : Evolution des microdéformations superficielles des substrats  $F = f(\varepsilon)$  de l'échantillon N°1déterminées à partir des jauges J1 (0,38mm) à J6 (5,38mm) de l'assemblage collé de type siffletbiseauté avec un angle  $\alpha = 6^{\circ}$ 

Remarque : Les détails d'interprétation des essais réalisés sur les échantillons N°2 et N°3 figurent dans l'annexe II.3.

Les seuils moyens Fd, Fg, Fr et le diagramme d'endommagement des éprouvettes biseautées avec un angle de 6° sont répertoriés respectivement dans le Tableaux V-3 et la Figure V-9 ci contre.

pour les troi	is échantil	lons de	type sif	flet ave	c un ang	$\frac{1}{6}$ de $6^{\circ}$	, par les	aug	es J1 (0	),38m	<u>m) à</u>	<u>J6</u>	
				<u>(),</u>	<u>5611111).</u>								
Biseau 6°	J1	J2	J3	J4	J5	J6							
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	5,38							
Fd (kN)	21,79	20,89	21,76	22,42	22,84	23,38	$Fd_p$	=	21,76	kN	± 1,	,69	kN
Fg(kN)	23,96	22,95	23,48	23,76	24,01	24,22	$Fg_p$	=	23,48	kN	± 1,	,10	kN
Fr (kN)	24,89	24,89	24,89	24,89	24,89	24,89	Fr	=	24,89	kN	± 0	,97	kN

Tableaux V-3 : Evolution de la valeur des seuils d'endommagement moyens Fd, Fg, Fr enregistrés





Figure V-9 : Représentation des différents domaines d'endommagement de l'assemblage collé de type sifflet. Cas de l'éprouvette avec un angle de biseautage de 6°

#### V.2.4. Analyse des courbes extensométriques et diagrammes d'endommagement de l'assemblage de type double sifflet

#### V.2.4.1. Assemblage double sifflet avec un angle de 33°





<u>Figure V-10 : Courbes F=f(ε), des jauges J1 (0,38mm)</u> à J4 (3,38mm) à l'aplomb du Vé extérieur. Cas de l'éprouvette en Vé avec un biseautage de 33°



pour les trois	échant	tillons	doub	le siff	let av	ec un	angle	de 33	<sup>°</sup> , enr	egistrée	<u>s par les jaug</u>	<u>es J1 (0,38r</u>	nm)
						à J10	(10,02	2 <u>mm)</u>					
Vé 33°	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10			
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	5,02	6,02	7,02	8,02	9,02	10,02			
Fd (kN)	5,97	5,58	5,65	5,80	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	$Fd_p = 5,58$	$kN \pm 0,27$	/ kN
Fg(kN)	6,01	5,77	5,85	5,97	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	$Fg_p = 5,77$	$kN \pm 0.30$	) kN
Fr (kN)	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	Fr = 6,06	kN ± 0,28	3 kN

Tableaux V-4 : Evolution de la valeur des seuils d'endommagement moyens Fd, Fg, Fr enregistrés





Figure V-12 : Représentation des différents domaines d'endommagement de l'assemblage collé de type double sifflet. Cas de l'éprouvette avec un angle de biseautage de 33°



V.2.4.2. <u>Assemblage double sifflet avec un angle de 18°</u>

2 <u>J4</u> <u>J6</u> J3 J5

<u>J8 J10J12J15J17</u> J7 J9J11J13J16

<u>Figure V-14 : Courbes F=f(ε), des jauges J5</u> (5,02mm) à J17 (10,02mm) à l'aplomb du Vé <u>extérieur Cas de l'éprouvette en Vé avec un</u> <u>biseautage de 17°</u> 9,0

	<u>J17 (18.80mm)</u>															
$\alpha = 18^{\circ} \text{ (moy)}$	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8								
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	5,20	7,00	8,80	9,80								
Fd (kN)	8,54	7,79	8,00	8,17	8,19	8,42	8,42	8,43								
Fg (kN)	8,54	8,42	8,41	8,44	8,44	8,45	8,50	8,50								
Fr(kN)	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54								
	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16	J17							
Abscisse (mm)	10,80	11,80	12,80	13,80	14,80	15,80	16,80	17,80	18,80							
Fd (kN)	8,29	8,27	8,22	8,16	8,16	8,09	8,10	8,39	8,52	$Fd_p$	=	7,79	kN	±	0,57	kN
Fg (kN)	8,50	8,51	8,53	8,46	8,43	8,38	8,44	8,50	8,52	$Fg_p$	=	8,38	kN	±	0,39	kN
Fr(kN)	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	Fr	=	8,54	kN	±	0,40	kN

Tableau V-5 : Evolution de la valeur des seuils d'endommagement moyens *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés pour les trois échantillons de type double sifflet avec un angle de 18°, par les jauges J1 (0,38mm) à J17 (18.80mm)









V.2.4.3. Assemblage double sifflet avec un angle de  $6^{\circ}$ 





<u>Tableau V</u>	/-6 : Ev	voluti	on de	la va	aleur d	les seu	uils d'e	endom	mage	ment r	noyen	s <i>Fd</i> , <i>Fg</i> , <i>Fr</i>	enre	<u>gistrés</u>
pour les tro	is échai	ntillo	ns de	type	doubl	e siffle	et avec	c un ai	ngle de	e 6°, p	ar les	jauges J1 (0,1	<u>38m</u>	<u>m) à J11</u>
_	<u>(48,77mm)</u>													
Vé 6°	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11			
Abscisse (mm	<i>i) 0,38</i>	1,38	2,38	3,38	42,77	43,77	44,77	45,77	46,77	47,77	48,77			
Fd (kN)	22,532	20,802	21,202	22,21	21,65	20,95	21,23	21,71	22,06	22,43	22,53	$Fd_p = 20,80$	kN :	$\pm 0,26$ kN
Fg (kN)	22,532	21,592	21,982	22,14	22,02	21,75	22,05	22,07	22,32	22,56	22,53	$Fg_p = 21,59$	kN :	$\pm 0,54$ kN
Fr (kN)	22,532	22,532	22,532	22,53	22,53	22,53	22,53	22,53	22,53	22,53	22,53	Fr = 22,53	kN :	$\pm 1,18$ kN





Figure V-18 : Représentation des différents domaines d'endommagement de l'assemblage collé de type double sifflet. Cas de l'éprouvette avec un angle de biseautage de 6°

#### V.2.5. Influence du Vé interne sur les seuils d'endommagement $Fd_p$ et Fr

L'observation des courbes et des diagrammes qui caractérisent l'évolution des microdéformations à la surface externe des couvre-joints ainsi que l'endommagement des joints adhésifs qui en découle permet de mettre en avant l'influence du Vé interne sur l'initiation des premières microfissures (seuil  $Fd_p$ ) et sur la rupture ultime du joint adhésif (seuil Fr).

C'est pourquoi nous avons reporté dans la Figure V-19 (a) et (b), l'évolution des seuils  $Fd_p$  et Fr des assemblages de sifflet et double sifflet en fonction de la valeur des angles de biseautage  $\alpha$ . L'interprétation de ces résultats est détaillée ci contre.





#### V.2.6. Interprétations des résultats expérimentaux

L'analyse graphique des domaines d'endommagement des corps d'épreuves étudiés permet de mettre en évidence l'influence d'une singularité interne sur l'initiation et la propagation des fissures dans les joints adhésifs.

Concernant les assemblages de type sifflet ( $\alpha$ =33°,  $\alpha$ =18° et  $\alpha$ =6°), les figures respectives V-5, V-7 et V-9 mettent en évidence les points suivants :

Les microfissures apparaissent systématiquement près des extrémités des biseaux et se propagent plus ou moins vite vers le centre du joint, en fonction de la valeur de l'angle de biseautage. En effet, l'angle de biseautage agit de manière très significative sur l'évolution des domaines d'endommagement.

Lorsque les angles de biseautage sont importants ( $\alpha$ =33° et  $\alpha$ =18°) les domaines d'endommagement s'étendent et sont respectivement compris entre 0 $\leq$ x $\leq$ 3,38mm et 0 $\leq$ x $\leq$ 4,38mm.

- Pour α=33°, la rupture est quasi instantanée dans tout le joint adhésif. La différence entre le seuil d'initiation de la première microfissure (*Fd<sub>p</sub>*) et la rupture ultime (*Fr*) est en effet très faible (*Fd<sub>p</sub>*=4,41kN et *Fr*=5,22kN).
- Pour α=18°, les microfissures s'initient au voisinage des extrémités du substrat puis se propagent vers le centre du joint jusqu'à la rupture du joint adhésif (*Fd<sub>p</sub>*=6,59kN et *Fr*=8,24kN).
- Lorsque l'angle de biseautage est faible (α=6°), les domaines non-linéaires (amorçage des microfissures Fd≤F≤Fg et propagation des fissures Fg≤F≤Fr) sont concentrés dans une zone très réduite au voisinage immédiat des extrémités des biseaux (0≤x≤2,38mm). Le reste du joint adhésif ne s'endommage pas (domaine élastique) jusqu'à la rupture ultime de l'assemblage (Fd<sub>p</sub>=21,76kN et Fr=24,89kN).

Concernant les assemblages de type double sifflet ( $\alpha$ =33°,  $\alpha$ =18° et  $\alpha$ =6°), les figures respectives V-12, V-15 et V-18 mettent en évidence les points suivants :

Lorsque  $\alpha$ =33°, les premières microfissures s'initient au voisinage des extrémités des substrats et se propagent rapidement vers le centre du joint adhésif. Il est remarquable que les jauges placées à l'aplomb du Vé intérieur enregistrent une évolution linéaire des déformations en fonction de la force de traction. Dans cette configuration aucune relaxation des déformations à l'aplomb du Vé intérieur n'est donc détectée. Notons également que, si la résistance ultime (*Fr*) de cet assemblage est très voisine de l'assemblage biseauté (avec un angle  $\alpha$ =33°), le seuil d'initiation des premiers endommagements (*Fd<sub>p</sub>*) apparaît pour un niveau de chargement supérieur. Nous expliquons ce phénomène par l'absence de glissement des substrats dans le plan du joint qui, comme nous l'avons vu dans le Chapitre IV, est un paramètre préjudiciable pour la résistance à l'endommagement des joints adhésifs biseautés.

Pour la configuration de l'assemblage en Vé avec un angle de  $\alpha$ =18°, il est intéressant de constater que les jauges placées le long du recouvrement enregistrent, presque simultanément (pour  $Fd_p$ =8,8kN), une légère relaxation des déformations (initiation des microfissures) à l'aplomb du Vé intérieur et au niveau des extrémités des substrats. Dans cette configuration le Vé intérieur semble avoir une influence sur la résistance à l'endommagement du joint adhésif. En effet, l'effet bénéfique de l'absence de glissement des substrats dans le plan du joint semble être annulé par l'initiation simultanée des fissures à l'extrémité des biseaux et au cœur du joint adhésif. Ainsi on constate que la résistance globale de cette éprouvette est presque identique à l'assemblage collé biseauté avec un angle de  $\alpha$ =18°.

Enfin, l'assemblage de type double sifflet avec un angle de biseautage très effilé ( $\alpha$ =6°), confirme l'influence significative du Vé intérieur sur la résistance globale du joint adhésif. Les jauges placées sur la surface du recouvrement enregistrent une relaxation importante des déformations à l'aplomb du Vé intérieur pour un niveau de chargement relativement faible. Nous constatons également l'initiation des microfissures aux extrémités des substrats pour un même niveau de chargement  $Fd_p$ =20,80kN. Nous remarquons enfin, qu'à longueur de recouvrement égal, cet assemblage a une moins bonne résistance à traction que l'assemblage biseauté avec  $\alpha$ =6°

### V.3. Confrontation des seuils *Fd<sub>p</sub>* et *Fr* théoriques et expérimentaux V.3.1. Remarques préliminaires

Les résultats précédents montrent l'influence significative d'un Vé interne très effilé sur la résistance à l'endommagement des joints adhésifs. Cependant la précision du seuil d'initiation des microfissures au niveau du Vé interne peut être sous évaluée compte tenue de l'épaisseur de l'acier entre la surface externe des couvre-joints et le cœur du joint. C'est pourquoi, l'objet de ce paragraphe est de compléter l'étude expérimentale de l'endommagement des joints adhésifs de type sifflet et double sifflet, réalisée à partir des mesures par extensométrie.

Nous avons utilisé dans le Chapitre IV l'outil numérique par éléments finis *ABAQUS*<sup>®</sup>, pour modéliser le comportement linéaire et non-linéaire de nos joints adhésifs pour des assemblages biseautés. Nous avons pour cela exploité un modèle d'endommagement [72] implémenté dans *ABAQUS*<sup>®</sup>.

Dans un premier temps nous rappellerons les différentes étapes de la modélisation. Ces différentes étapes sont issues du travail réalisé dans le chapitre précédent.

Ensuite, nous étudierons numériquement les joints adhésifs de type sifflet et double sifflet dans le but d'observer l'influence du Vé sur le lieu et le niveau de chargement correspondant à l'initiation des premiers endommagements et sur le niveau de chargement correspondant à la rupture ultime des joints adhésifs.

Enfin, la comparaison des valeurs numériques obtenues à celles déterminées expérimentalement, évalue la capacité du modèle numérique à prédire l'endommagement des joints adhésifs.

#### V.3.2. Paramétrage de la modélisation

Compte tenu du travail réalisé dans le Chapitre IV nous avons modélisé nos assemblages avec les paramètres les mieux adaptés. Ces derniers sont rappelés ci-dessous :

- Géométrie : L'échelle (unité de mesure (mm)) est similaire aux éprouvettes expérimentales. Les éprouvettes sont modélisées en 2D.
- Caractéristique des matériaux : Les caractéristiques de mécaniques paramétrés sont celles de l'acier XC18 et de la résine époxydique *SIKADURE 30 COLLE*<sup>®</sup> (Chapitre II). Les matériaux sont considérés comme étant homogènes et isotropes
- Conditions limites et chargement : Le contact entre l'adhésif et le substrat est considéré comme parfait et les conditions limites de fixation de l'éprouvette respectent les degrés de liberté des mors rotulés expérimentaux.
- Maillage : L'élément utilisé est l'élément CPE3. La taille des éléments dans le joint adhésif correspond au dixième de l'unité de longueur.
- Vitesse de montée en charge : Nous avons conservé la vitesse de montée en charge expérimentale à savoir 25N.s<sup>-1</sup>.
- Limite d'élasticité : Après étude numérique, la limite d'élasticité du joint adhésif, composée de *SIKADURE 30 COLLE*<sup>®</sup>, nécessite un recalage de  $\sigma_{e num}=1,66.\sigma_{e exp}$ . soit un  $\sigma_{e num}=50$ MPa

#### V.3.2.1. <u>Comparaison des seuils d'endommagement Fd<sub>p</sub> et Fr expérimentaux</u> <u>avec les prédictions numériques</u>

Les Figures V-20 et V-21montrent le lieu et la valeur du chargement numérique correspondant à l'initiation des premiers éléments endommagés ( $Fd_{p num}$ ) ainsi que l'endommagement total correspondant à la valeur ( $Fr_{num}$ ) des joints adhésifs modélisés.

Nous avons reporté dans les figures les seuils d'endommagement numériques en fonction de la valeur des angles de biseautage dans le but de les confronter aux valeurs expérimentales.



## Figure V-20 : (a) Lieu des premiers éléments endommagés et charge $Fd_{p num}$ correspondant (b) Fin del'endommagement du joint adhésif et seuil de rupture correspondant $Fr_{num}$ .

#### -131-



Assemblage de type double sifflet

Figure V-21 : (a) Lieu des premiers éléments endommagés et charge  $Fd_{pnum}$  correspondant et (b) Finde l'endommagement du joint adhésif et seuil de rupture correspondant  $Fr_{num}$ .

d'amorquée des premieres merorissures et et la cuinte des joint admest de type sinter et													
<u>doubles sifflet.</u>													
Eprouvettes		Sifflet		Double Sifflet									
angle de biseautage (°)	6°	18°	33°	6°	18°	33°							
$Fd_{p exp.}$ (kN)	21,76	6,59	4,41	20,80	8,09	5,58							
$Fr_{exp.}$ (kN)	24,89	8,24	5,22	22,53	8,54	6,06							
$Fd_{p num}$ (kN).	21,60	7,50	4,96	20,20	7,77	5,56							
$Fr_{num.}$ (kN)	21,75	7,72	4,99	20,35	7,80	5,57							
erreur sur $Fd_p$ (%)	-0,74	13,87	12,53	-2,88	-3,96	-0,35							
erreur sur <i>Fr</i> (%)	-12,63	-6,29	-4,39	-9,68	-8,69	-8,06							

<u>Tableau V-7 : Comparaisons entre les valeurs expérimentales et numériques des seuils Fdp</u> d'amorçage des premières microfissures et Fr de rupture ultime des joint adhésif de type sifflet et



Figure V-22 : Comparaison entre la prédiction numérique des seuils d'endommagement *Fd* et *Fr* avec les valeurs expérimentales.

#### V.3.2.2. Interprétations

Ces résultats montrent que nos modélisations, paramétrées à partir des résultats expérimentaux de l'éprouvette biseautée la plus simple (éprouvette de type sifflet  $\alpha$ =33°), permettent de prévoir avec une bonne précision l'entrée dans le domaine non-linéaire des différents joints adhésifs étudiés, c'est-à-dire l'amorçage des premiers endommagements.

En effet, pour les joints de type sifflet et double sifflet, les valeurs numériques du seuil d'amorçage des premières microfissures (seuil  $Fd_p$ ) sont proches des valeurs expérimentales (l'écart maximale, relevé pour l'éprouvette de type double sifflet avec un angle de biseautage de  $\alpha$ =18°, est légèrement supérieur à 13%).

De même la rupture ultime des joints adhésifs (seuil Fr) est prédite avec une précision satisfaisante (l'écart maximal, relevé pour l'éprouvette de type sifflet avec un angle de biseautage de  $\alpha$ =6°, est légèrement supérieur à 12%).

Par ailleurs l'analyse des Figures V-20 et V-21 est en accord avec les observations expérimentales à savoir :

- Lorsque α=33°, les premières microfissures s'initient au voisinage des extrémités des substrats et se propagent rapidement vers le centre du joint adhésif.
- Lorsque  $\alpha = 18^{\circ}$ , l'initiation des fissures s'initie simultanément à l'extrémité des biseaux et au cœur du joint adhésif ce qui caractérise une légère influence du Vé intérieur.
- Lorsque α=6°, l'initiation des premières microfissures a lieu au cœur du joint adhésif.
  L'influence du Vé intérieur est dans cette configuration préjudiciable ce qui induit un endommagement précoce.

#### V.4. Approche thermique de l'assemblage collé de type double sifflet

Dans ce paragraphe nous avons cherché à cartographier le comportement thermoélastique d'un assemblage collé de type double sifflet ( $\alpha=6^\circ$ ) dans le but de visualiser la répartition des contraintes et si possible le lieu d'amorçage des microfissures.

Dans la première partie de ce paragraphe nous présentons les outils expérimentaux utilisés pour cette étude. Nous présentons également le principe de la thermographie

La première campagne d'essais est développée dans la deuxième partie. Ces essais consistent à mesurer le rayonnement émis par notre corps d'épreuve lorsque celui-ci est sollicité avec une traction uniaxiale à vitesse constante (25N.s<sup>-1</sup>: vitesse identique aux essais expérimentaux du paragraphe V.2). Comptes tenus des résultats observés, un deuxième mode opératoire a été mis en œuvre.

Ce mode opératoire, décrit dans la troisième partie, consiste modifier la résolution de la caméra thermique et changer le mode de sollicitation. En effet une sollicitation dynamique sinusoïdale, (essai thermoélastique) est mieux adaptée pour notre étude.

#### V.4.1. Outils expérimentaux et principe des mesures

#### V.4.1.1. Outils expérimentaux

La machine de traction INSTRON 8872 utilisée pour les essais mécaniques qui suivent, est équipée d'un vérin pouvant appliquer un effort compris entre ±25kN, en statique et dynamique. Les essais sont programmés sous le logiciel WAVE MAKER EDITION.

La caméra thermique utilisée est une caméra matricielle CEDIP IRC 320-4LW qui peut être équipée de plusieurs objectifs. Sa résolution thermique est de 20mK et sa fréquence maximale d'acquisition est de 64Hz en pleine fenêtre et jusqu'à quelques kHz en fenêtrant.

Le système d'acquisition est assuré par le logiciel SAPPHIRE dans lequel on définit : la fréquence d'acquisition des images, et le nombres d'images par acquisition.





La thermomécanique fait le lien entre les phénomènes thermiques et les phénomènes mécaniques qui ont lieu au sein d'un matériau. En effet, l'application d'un effort sur notre assemblage collé de type double sifflet va générer un champ de contraintes au sein de celui-ci, plus ou moins important à cause des singularités angulaires des biseaux. Cette variation des contraintes va entraîner des déformations, élastiques ou plastiques selon le niveau de chargement. Les contraintes plastiques créent une dissipation d'énergie, donc une évolution de la température qu'il sera "théoriquement" possible de détecter.

La mesure effectuée par une caméra infrarouge est une mesure de luminance. Le flux de rayonnement infrarouge mesuré par la caméra (L) dans un domaine spectral donné est décomposé en trois parties [80] :

- Le flux émis par la surface de l'éprouvette et qui traverse l'atmosphère:  $\tau_a \epsilon_0 L_0(T_{éprouv})$
- Le flux réfléchi sur la surface en provenance de l'environnement et qui traverse l'atmosphère:  $\tau_a(1-\epsilon_0)L_0(T_{env})$
- Le flux émis par l'atmosphère entre l'objet et le détecteur :  $(1-\tau_0)L_0(T_{atm})$

Où  $\tau_a$  est le coefficient de transmission effectif de l'atmosphère,  $\varepsilon_0$  l'émissivité effective relative à la bande spectrale du détecteur et à la température de l'éprouvette. L<sub>0</sub> est la luminance d'un radiateur intégral (corps noir) à une température donnée.



Figure V-24 : Bilan radiatif des flux émis et réfléchis par la surface de l'éprouvette et du flux émis par <u>l'atmosphère.</u>

L'équation fondamentale de la thermographie s'écrit alors, en terme de luminance :

$$L = \tau_a \varepsilon_0 L_0(T_{eprouv}) + \tau_a (1 - \varepsilon_0) L_0(T_{env}) + (1 - \tau_0) L_0(T_{atm})$$
(V.1)

Dans nos expériences, la distance entre l'objet et la caméra est très réduite (10 < d < 20 cm)et le coefficient de transmission effectif de l'atmosphère est proche de l'unité. L'équation (V.1) se simplifie donc sous la forme suivante :

$$L = \varepsilon_0 L_0(T_{eprouv}) + (1 - \varepsilon_0) L_0(T_{env})$$
(V.2)

Connaissant l'émissivité  $\varepsilon_0$  et la température de l'atmosphère  $T_{env}$  en mesurant les flux radiatifs en provenance de l'assemblage collé en état repos et en état sous contraint on peut déterminer la différence des luminances  $L_0(T1_{éprouv.})$  et  $L_0(T2_{éprouv.})$ . Avec les courbes d'étalonnage  $L_0(T)$  qui donnent la relation entre la température d'un corps noir et sa luminance mesurée par la caméra, il est possible de déterminer la variation de température  $T2_{éprouv.}-T1_{éprouv.}$ , donc la variation de contraintes via la constante thermoélastique  $K_m$ (équation V.4).  $K_m$  est déterminée à partir de l'équation classique de la thermoélasticimétrie (V.3), selon laquelle la variation de température est proportionnelle à la variation des contraintes principales.

$$\Delta T = -K_m T_0 \Delta I_1 \quad \text{où} \quad I_1 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \tag{V.3}$$

Avec :  $K_m = \frac{\alpha}{\rho c_{\sigma}}$  ordre de grandeur pour notre acier : lmK = lMPa). (V.4)

Où :  $\alpha$  est le coefficient de dilatation ( $\alpha = 12.10^{-6} \text{K}^{-1}$ ),  $\rho$  la masse volumique ( $\rho = 7860$  kg.m<sup>-3</sup>),  $c_{\sigma}$  la chaleur spécifique à contrainte constante ( $c_{\sigma} = 460 \text{ J.kg}^{-1}$ .K<sup>-1</sup>),  $T_0$  la température de la pièce,  $\sigma_i$ , les contraintes principales et  $I_1$  le premier invariant du tenseur des contraintes.

#### V.4.2. Influence d'une traction simple : essai thermographique

#### V.4.2.1. <u>Réalisation des essais</u>

Le premier essai réalisé est un essai de traction simple jusqu'à  $F_{max}$ =12kN. La vitesse de montée en charge est constante et identique aux essais expérimentaux réalisés précédemment (25N.s<sup>-1</sup>). Durant cet essai, on enregistre toutes les secondes le rayonnement émis par l'assemblage, dans trois zones distinctes de l'éprouvette (Figure V-25) :

- à l'extrémité interne  $T_{Vé int.}$
- à l'extrémité externe du substrat Tangle ext
- et dans une zone de l'éprouvette située loin des singularités angulaires  $T_{éprouv}$

Les évolutions du rayonnement, converties en Température (°C), de ces trois zones sont représentées sur la Figure V-26.


Figure V-25: Zones étudiées après acquisition des données thermographiques

Remarque : comme la température de l'environnement évolue sensiblement pendant l'essai de traction, nous choisissons de travailler en écart de température par rapport à l'environnement.



Figure V-26: Evolution de la température : de l'éprouvette (loin des singularités géométriques), à l'extrémité du Vé interne et à l'extrémité du biseau du substrat.

## V.4.2.2. Interprétations et discussion

La Figure V-26 montre l'évolution de la température de l'éprouvette  $T_{éprouv.}$  l'évolution de la température à l'une des extrémités du substrats  $T_{ange ext.}$  et au niveau du Vé interne  $T_{Vé int.}$ . Nous constatons un léger refroidissement similaire de ces trois zones, lié soit à une dérive de la caméra soit au fait qu'une barre sollicitée par une traction élastique se refroidit. De plus il faut remarquer que cette évolution reste dans une échelle de température très faible (< 0,1 °C).

Il n'apparaît pas de zones plus fortement sollicitées que d'autres, ou du moins la mesure thermique ne permet pas de les déceler. Si des concentrations de contraintes existent, leur effet thermique pourrait bien être effacé par la diffusion de la chaleur dans l'éprouvette. L'acier est très conducteur et la fréquence d'acquisition des images (f=1Hz) ne permet probablement pas d'enregistrer la diffusion.

Cette configuration expérimentale ne permet donc pas de tirer des conclusions satisfaisantes sur l'influence des singularités angulaires. En traction simple il n'y a guère d'espoir de visualiser ou d'enregistrer l'endommagement du joint adhésif.

Pour tenter de contourner le problème lié à la diffusion thermique dans la barre, nous avons choisi de solliciter notre éprouvette avec un chargement sinusoïdale. En effet une sollicitation dynamique et continue permet de stimuler la diffusion de la chaleur (Figure V-27). Cet essai consiste en un essai de thermoélasticimétrie, à partir duquel on cherche à mesurer la variation de la température à la surface de l'échantillon.



Figure V-27 : Illustration de la perte du signal thermique en fonction du mode de sollicitation

#### V.4.3. Influence d'une traction sinusoïdale : étude thermoélasticimétrique

Le phénomène thermoélastique a été observé pour la première fois par le physicien allemand W. E. WEBER en 1830 [76]. Dans les années cinquante, William THOMSON plus tard connu sous le nom de Lord KELVIN formalise ce phénomène [77]. Par la suite, BIOT [78] et BEVER [79] ont respectivement modélisé et reformulé le phénomène thermoélastique en s'appuyant sur les concepts de la mécanique et de la thermodynamique moderne.

#### V.4.3.1. <u>Réalisation des essais</u>

Après de nombreux essais préliminaires dans lesquels nous avons fait varier le profil des sollicitations dynamiques, nous avons choisi de conserver l'essai le plus pertinent décrit cidessous. Sur un assemblage collé de type double sifflet, des essais dynamiques de type sinusoïdaux sont réalisés. Le niveau de chargement moyen  $F_{moy}$  et l'amplitude  $\Delta F$  croissent jusqu'à la rupture ultime de l'assemblage collé (Tableau V-8). La fréquence d'excitation est de f=10Hz et le champ de visée est limité à une fenêtre 120x160 dans le but de centrer l'objectif au niveau du Vé interne, là où les surcontraintes sont maximales. Enfin la fréquence d'acquisition des images est de f=50Hz pour les premiers essais (5kN< $F_{moy}$ <9kN) et passe à f=200Hz pour les derniers essais (10kN< $F_{moy}$ <12,5kN).

Tableau V-8: Sollicitations dynamiques exercées sur l'assemblage collé de type double sifflet

F(kN)	5	6	7	8	9	11	11,5	12	12,5
$\pm \Delta F(kN)$	4	5	6	7	8	10	10,5	11	11,5

Après l'analyse numérique des données enregistrées par la caméra IR, nous obtenons pour chaque essai, une cartographie de l'assemblage collé représentant la répartition des amplitudes thermiques donc des contraintes (Rappel: pour l'acier 1mK=1MPa). Nous choisissons de ne représenter ici que les cartographies des essais  $8 \pm 7$  kN,  $11,5 \pm 10,5$  kN et  $12,5 \pm 11,5$  kN car ces cartographies représentent différentes étapes de l'endommagement.



<u>Figure V-28 : Amplitudes thermiques enregistrées pour l'essai 8  $\pm$  7 kN</u>



(a)



(b)



## V.4.3.2. <u>Résultats des amplitudes thermiques</u>

Pour chaque zone étudiée i.e.  $\Delta T_{éprouv.,} \Delta T_{Ve int.}$  et  $\Delta T_{env.,}$  nous avons reporté, dans le tableau suivant, les amplitudes des températures enregistrées par la caméra thermique. Leurs évolutions en fonction de  $F_{max}$  c'est-à-dire le chargement maximal réellement supporté par l'assemblage sont représentées sur les Figures V-29 et V-30.

Tableau V-9 : Résultats des am	plitudes thermiques	enregistrées	par la caméra	IR après 1	e traitement
	numérique de	es données.	<b>^</b>	*	

$F \pm \Delta F(kN)$	$F \pm \Delta F$	<b>F</b> <sub>max</sub>	$\Delta T$ (mK)	ΔT <sub>éprouv.</sub>	$\Delta T_{V\acute{e}\ int.}$	$\Delta T_{env.}$
	$5 \pm 4$	9		20,40	24,38	2,55
	$6 \pm 5$	11		25,61	29,90	2,55
	$7\pm 6$	13		30,86	35,46	2,84
	$8\pm7$	15		36,56	40,58	3,56
	$9\pm8$	17		40,14	45,80	3,93
	$11 \pm 10$	21		51,87	60,02	3,95
	$11,5 \pm 10,5$	22		44,90	51,63	11,12
	$12 \pm 11$	23		57,08	63,59	15,35
	$12,5 \pm 11,5$	24		46,53	51,20	10,40



Figure V-30 : Evolution de l'amplitude thermique : de l'éprouvette (loin des singularités angulaires $T_{éprouv.}$ ) et de la pointe du Vé interne  $T_{Ve int.}$ , en fonction de la force maximale des différentessollicitations dynamiques.



Figure V-31: Evolution de l'amplitude thermique de la pointe du Vé interne  $\Delta T_{Vé int.}$  par rapport à <u>l'ensemble de l'éprouve</u>

#### V.4.3.3. Interprétations et discussions des résultats

Les résultats expérimentaux (Figure V-30) montrent, pour les deux zones observées  $(\Delta T_{V\acute{e}\ int.} ainsi que \Delta T_{\acute{e}prouv.})$ , que l'augmentation de l'amplitude de la température est linéaire entre 9< $F_{max}$ <21kN avant de diminuer brutalement lorsque  $F_{max}$ =22kN. Après une certaine instabilité des  $\Delta T$ , une seconde chute brutale des amplitudes thermiques se produit jusqu'à la rupture ultime du joint adhésif.

Nous expliquons la première chute de l'amplitude thermique par l'amorçage des microfissures dans le joint adhésif qui a pour effet de relaxer localement les contraintes et donc de diminuer l'amplitude thermique dans les zones observées. La continuité des efforts n'étant plus complètement assurée par le joint adhésif, l'amplitude thermique connaît un régime "instable". Enfin lorsque les fissures se propagent dans le joint adhésif, les contraintes se relâchent complètement et donc l'amplitude thermique chute brutalement.

Les courbes représentées sur la Figure V-30 semblent avoir une évolution quasi similaire, cependant nous savons, grâce aux travaux précédents, que la singularité géométrique du Vé interne induit l'initiation précoce des microfissures dans le joint adhésif. Dans le but d'observer plus précisément les phénomènes thermiques au niveau du Vé interne,

nous avons choisi de soustraire l'amplitude thermique globale de l'éprouvette. Les résultats représentés sur la Figure V-31 sont très intéressants car ils permettent de mettre en lumière les points suivants :

- L'amplitude thermique, au niveau du Vé, croît plus rapidement que dans l'ensemble de la structure. Les surcontraintes qui existent réellement dans cette zone peuvent donc être prises en compte dans les essais thermoélasticimétriques.
- Lorsque le niveau de chargement maximal est atteint, la chute de l'amplitude thermique diminue également plus rapidement à la pointe du Vé que dans l'ensemble de l'éprouvette. De plus cette chute est irréversible jusqu'à la rupture ultime du joint adhésif. Cette observation signifie selon nous que l'initiation des premières microfissures intervient bien à la pointe du Vé et que l'analyse thermoélastique est capable de les détecter.

Enfin, la comparaison de ces données thermiques avec les résultats expérimentaux obtenus par extensométrie sur des assemblages identiques est très encourageante. Nous avions constaté que, dans cette configuration, l'initiation des premiers endommagements avait lieu à la pointe du Vé interne pour une force  $Fd_p=20,8$ kN avant de se propager dans le joint adhésif jusque la rupture ultime de l'assemblage pour une force Fr=22,53kN. Ces résultats, très proches de ceux obtenus dans cette étude par thermoélasticimétrie, justifient l'intérêt d'utiliser cet outil pour détecter l'initiation des premières microfissures dans le joint adhésif.

Notons cependant que si l'analyse thermoélastique est capable de détecter avec une bonne précision les effets de l'endommagement de nos assemblages collés, il est pour le moment impossible de les visualiser. Les causes principales de ce problème sont liées aux performances de la caméra thermographique et surtout à la diffusivité thermique dans l'acier.

## **V.5. Conclusions**

Dans ce chapitre nous avons élaboré et testé des éprouvettes de type sifflet et double sifflet, dans le but d'étudier l'influence d'une singularité géométrique (Vé interne) sur l'endommagement des joints adhésifs. Les résultats expérimentaux ont permis de déterminer pour chaque corps d'épreuve l'initiation des premières microfissures et leurs propagations jusqu'à la rupture du joint adhésif.

Nos résultats montrent que l'assemblage de type double sifflet présente des performances mécaniques supérieures à l'assemblage collé de type sifflet (lorsque l'angle de biseautage reste faible) car cet assemblage conserve un alignement optimal des substrats pendant l'essai de traction. Cependant, nous avons également observé que lorsque l'angle de biseautage est très effilé ( $\alpha$ =6°) l'assemblage collé de type double sifflet devient mécaniquement moins performant car le Vé interne très marqué dans cette configuration favorise l'initiation précoce des premiers endommagements.

Notre outil numérique appliqué à ces deux assemblages a permis l'obtention de résultats très proches de ceux obtenus expérimentalement. Nous constatons que la prédiction de l'initiation des microfissures ainsi que leurs évolutions dans le joint de type double sifflet est en bonne adéquation avec la réalité expérimentale et permet d'appuyer les résultats expérimentaux obtenus par les jauges électriques à l'aplomb des Vé internes.

La thermoélasticimétrie permet dans cette étude de détecter l'effet de l'initiation des premières microfissures avec une précision très satisfaisante. Cependant il n'est pour le moment pas possible de visualiser clairement leurs localisations, car le bruit propre de la caméra reste important par rapport à l'effet induit par l'endommagement, mais aussi et surtout à cause de la diffusion de la chaleur, "formant" les contrastes thermiques, qui est (et restera) un obstacle.

# **CONCLUSION GENERALE**

## VI. Conclusion générale

Cette étude contribue à caractériser les phénomènes micromécaniques locaux qui apparaissent et se développent dans les joints adhésifs constituants les assemblages collés. Ces phénomènes, très difficiles à caractériser avec précision sont fondamentaux car ils conditionnent la résistance globale de la liaison colle-substrat et donc celui de toute la structure. Les assemblages collés de type sifflet et double sifflet retenus dans cette étude sont bien adaptés car ce sont des assemblages simples et très bien définis, qui permettent d'obtenir une bonne reproductibilité des mesures. De plus, leurs géométries présentent des angles aigus et obtus au voisinage des extrémités des substrats dont l'influence, sur l'évolution de l'endommagement, est un paramètre très intéressant à étudier.

Ce travail contribue également à montrer que le phénomène d'adhésion ne peut pas être considéré comme un système simple ne faisant intervenir que l'adhésif et l'adhérent, les deux pris séparément. Il doit au contraire être considéré un comme problème complexe faisant intervenir de nombreux facteurs qui s'influencent mutuellement. Les approches physiques et thermodynamiques actuelles ne prennent pas en compte certaines modifications morphologiques ou structurales des surfaces ou des matériaux en présence. Le facteur temps n'est pas pris en compte. C'est pourquoi nous avons choisi d'étudier dans un premier temps l'influence du temps sur la résistance à l'endommagement des joints adhésifs en résine époxy, après un vieillissement naturel de 10 ans.

A partir de notre base de données existante, nous avons étudié les performances mécaniques de deux configurations d'assemblages collés de type sifflet ayant des angles de biseautage différents ( $\alpha$ =33° et  $\alpha$ =6°). Ces éprouvettes, élaborées en 1996, ont été conservées pendant 10 ans, dans des conditions stables en terme de température et d'humidité. Après des essais de fatigue théoriquement suffisants pour endommager nos assemblages collés nous n'avons constaté aucune rupture ni apparition de microfissures dans les joints adhésifs. Ces premiers résultats nous laissent penser que les caractéristiques de la résine constituant le joint adhésif ont évoluées avec le temps. Dans le but de déterminer les nouvelles performances mécaniques de la couche adhésive nous avons réalisé un essai de traction jusqu'à la rupture des éprouvettes vieillies. Un tableau récapitulatif de nos essais est présenté ci-dessous.

La comparaison entre l'évolution de l'endommagement de l'endommagement des éprouvettes vierges (non vieillies) et les éprouvettes naturellement vieillies permet de noter une augmentation du seuil avant l'apparition des premières microfissures de 25% lorsque  $\alpha$ =33° jusqu'à 70% lorsque  $\alpha$ =6°.

Assemblage type	19	996	20	06
angle de biseautage	α=33°	$\alpha = 6^{\circ}$	α=33°	$\alpha = 6^{\circ}$
$Fd_p$ (kN)	4,23	11,83	5,26	20,96
$Fg_p(\mathbf{kN})$	4,90	16,04	5,43	21,87
Fr (kN)	5,18	18,77	5,51	23,80
Augmentation du seuil $Fd_p$			+25%	+70%
Diminution du domaine non	-75%	-50%		
Diminution du domaine non	-71%	40%		

#### <u>Tableau récapitulatif des performances mécaniques des assemblages collés</u> <u>de type sifflet assemblés en 1996. Testés en 1996 et 2006</u>

Nous suggérons que, lorsque l'assemblage collé est préservé de toutes agressions extérieures (environnementale ou mécanique), le nombre de réticulations du réseau polymère continu à croître lentement ce qui aurait pour effet d'augmenter favorablement la rigidité du joint adhésif.

La réalité expérimentale impose parfois des barrières qui limitent l'élaboration des spécimens ou qui limitent l'étude fine de nos assemblages. La modélisation numérique nous permet de lever certaines de ces barrières expérimentales et permet également de compléter nos connaissances en mettant en lumière des phénomènes locaux difficilement accessibles expérimentalement. Dans le but d'étudier l'endommagement des joints adhésifs biseautés nous avons utilisé un critère d'endommagement implémenté dans le logiciel *ABAQUS*<sup>®</sup> et confronté les prédictions numériques avec des résultats expérimentaux. Après avoir recalé le modèle numérique nous avons étudié plusieurs paramètres tels que : l'influence de la nature des substrats, l'épaisseur du joint adhésif et de la valeur de l'angle de biseautage. Pour la plupart de ces configurations, il apparaît que la modélisation est capable de prévoir avec une

bonne précision l'évolution de l'endommagement des joints adhésifs. Ces bons résultats rendent possible l'utilisation de ce modèle pour étudier des assemblages plus complexes tels que les assemblages collés de type double sifflet.

Cet assemblage fait l'objet des derniers travaux présentés dans ce mémoire. Trois géométries sont étudiées ( $\alpha$ =33°,  $\alpha$ =18° et  $\alpha$ =6°), dans le but de caractériser l'influence du Vé sur l'endommagement du joint adhésif. La confrontation des performances mécaniques avec l'assemblage collé de type sifflet est développée tant du point de vue de la résistance ultime (seuil *Fr*) que de l'amorçage des premières microfissures (seuil *Fd<sub>p</sub>*).

Un tableau récapitulatif de nos essais est présenté ci-dessous. Les résultats expérimentaux montrent que cet assemblage est en effet influencé par la présence de la singularité géométrique interne lorsque celui-ci est très effilé ( $\alpha$ =6°). En comparant les performances mécaniques des assemblages collés de type sifflet avec les performances mécaniques des assemblage de type double sifflet (pour un même angle de biseautage) nous constatons que l'assemblage de type double sifflet possède des propriétés voisines voire supérieures pour de faibles angles de biseautage mais inférieures lorsque  $\alpha$ =6°. Cela s'explique par l'initiation précoce des premières microfissures (enregistrées par les jauges extensométriques) à l'extrémité du Vé interne.

Assemblage type		sifflet			Double siffle	et		
angle de biseautage	α=33°	α=18°	$\alpha = 6^{\circ}$	α=33°	α=18°	α=6°		
$Fd_{p}$ (kN)	4,41	6,59	21,76	5,58	7,79	20,80		
$Fg_p(\mathbf{kN})$	4,86	7,74	23,48	5,77	8,38	21,59		
Fr (kN)	5,22	8,24	24,89	6,06	8,54	22,53		
Continuité des efforts en		+++		+++				
traction		Très bonne	e		Très bonne			
Possibilitá do flovion		+			+++			
rossionite de nexion	Ι	Risque si e <sub>j</sub> él	evée	Risque e	éliminé (form	e en Vé)		
Influence des singularités		++			+			
géométriques	Si	gnificative si	$\alpha = 6^{\circ}$	Très significative si $\alpha$ =6°				

# Tableau récapitulatif des performances mécaniques des assemblages collés de type sifflet et double sifflet

Les calculs numériques donnent des résultats satisfaisants en ce qui concerne l'amorçage des premières microfissures (seuil  $Fd_p$ ) et le seuil Fr de rupture ultime. Ils permettent de vérifier l'influence du Vé intérieur sur l'initiation des microfissures et leur localisation. Enfin l'analyse thermoélasticimétrique permet dans cette étude de détecter les variations thermiques induites par l'initiation des premières microfissures avec une précision très proche des données expérimentales et numériques. Cependant les performances de la caméra thermique ne nous permettent pas de visualiser clairement leurs localisations, tant la diffusion de la chaleur est importante et l'effet thermique induit par l'endommagement est faible.

Dans la perspective de compléter les travaux qui contribuent à la compréhension des phénomènes micromécaniques qui conditionnent la résistance des assemblages collés il serait intéressant de poursuivre les points suivants :

Concernant les travaux relatifs à l'effet bénéfique du vieillissement naturel sur la résistance du joint adhésif, il serait utile de vérifier si une évolution microstructurale à bien lieu lors d'un vieillissement naturel. L'utilisation d'un microscope électronique à balayage peut nous aider dans cette démarche et confirmer ou non notre hypothèse.

Le modèle numérique que nous avons utilisé donne de bons résultats pour nos assemblages collés avec une résine fragile. Il serait intéressant par la suite d'étudier des assemblages collés avec des adhésifs qui présentent un caractère viscoélastique plus marqué donc plus difficile à caractériser expérimentalement.

Enfin, l'assemblage collé de type sifflet reste mal connu, compte tenue de sa géométrie particulière en forme de Vé. Nous avons cependant mis en évidence que ses performances mécaniques sont au moins aussi grandes que l'assemblage de type sifflet (tant que le Vé interne n'est pas trop faible). Il serait intéressant de compléter nos résultats en caractérisant l'influence du Vé dans le cadre de sollicitations dynamiques. Du point de vue thermiques, il sera bientôt possible d'améliorer la résolution des données et donc de visualiser l'initiation précoce des premiers endommagent. En effet l'installation (début 2008) d'une nouvelle caméra thermique *CEDIP Titanium*, plus performante permettra d'améliorer la résolution spatiale et d'enregistrer les effets thermiques induits par l'endommagement, avec une fréquence d'acquisition beaucoup plus élevée (jusqu'à 1kH).

## **BIBLIOGRAPHIE**

## **Bibliographie**

## References

## 1 HADJ-RABAH Y.

"Etude par élément finis d'interface des effets de bord et des défauts dans les assemblages collés" Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne, 1991

#### 2 BERDAH C.

"Analyse théorique et expérimentale du comportement mécanique fin d'assemblage collés. Application à l'étude du vieillissement humide" Thèse de doctorat de l'Université de Paris VI, 1998

#### 3 BENSAID A.

"Contribution à l'étude analytique, numérique et expérimentale du comportement mécanique d'un assemblage collé à simple recouvrement en escalier, sollicité à la traction"

Thèse de doctorat de l'Université de Paris VI, 1992

#### 4 KOMIHA M.A.

"Analyse théorique et expérimentale de l'influence de l'épaisseur du film de colle, dans un assemblage collé à double recouvrement" Thèse de doctorat de l'Université de Paris VI, 1983

#### 5 FARGETTE B., GILIBERT Y. et RIMBLINGER L.

"Comparaison between experimentale and theorical analysis of stress distribution in adhesively-bonded joint : tenon and mortise joints ans single-lap joints" Journal of Adhesion, Vol. 59, pp. 159-170, 1996

## 6 TCHIENKOUA R.

"Analyse théorique et expérimentale du comportement mécanique d'un assemblage collé du type tenon mortaise, sollicité à la traction simple" Thèse de doctorat de l'Université de Paris VI, 1988

## 7. CALGARO J.A. et LACROIX R.

*"Maintenance et réparation des ponts"* Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp 11-19, 1997

#### 8. 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

## 9. ASSIH J. et DELMAS Y.,

"Influence of the adhesive thickness and steel plate thickness on the behaviour of the strengthened concrete beams" Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 14, pp. 1639-1656, 2000

## 10. ASSIH J., LI A. et DELMAS Y.

"Strengthened Concrete beams by gluing carbon fiber composite sheet : application of damage theory" Composites in Constructions, pp. 623-628, 2001.

#### 11. LI A., DIAGANA C., BUYLE-BODIN F. et DELMAS Y. "Shear strenthening of reinforced concrete beams" Concrete Science and Engineering, Vol. 3, pp. 250-256, 2001

#### **12.** PERSON B.N.J. et TOSATTI E.

*"The effect of surface roughness on the adhesion of elastics solids"* Journal of Chemical Physics., Vol. 115, pp. 5597-5610, 2001

#### 13. BOUNYAVONG F.

"Etude expérimentale et théorique de l'influence de paramètre physico-chimiques et géométriques relatif à l'états de surface des subjectiles sur le comportement mécanique fin d'assemblages collés du type escalier simple sollicité en traction simple"

Rapport de recherche 270, E.N.S.T.A, 1993

## 14. 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, Vol. 47, pp. 84-86, 1982

## 15. HALFAOUI S.

"Contribution à l'étude de l'influence de la rugosité des subjectiles sur la résistance mécanique en traction et en fatigue de l'assemblage collé à simple recouvrement en sifflet"

Thèse de doctorat spécialité : Mécanique, Université de Paris VI, 1993

## 16. QIANG Z.Q. et AKISANYA A.R.

"An experimental investigation of failure initiation in the bonded joints". Acta Materialia, Vol. 46, pp. 4895-4904, 1998.

## 17. OBJOIS A.

"Etude théorique et expérimentale du comportement mécanique fin de la structure collée de type sifflet" Thèse de doctoret enérgielité : Mécanique, Université de Deires, 1008

Thèse de doctorat spécialité : Mécanique, Université de Reims, 1998

## **18.** LUHOWIAK W.

*"Etude de la résistance au choc d'assemblages collés par l'intermédiaire d'une résine époxydique"* 

Thèse de doctorat spécialité : Chimie structurale, Université de Reims, 1979

## 19. 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

## 20. VOLKERSEN O.

"Die Nietkraftverteilung in zugbeansprunchten Neitverbindungen mit konstanten lasschenquerschinitten" Luftfahrforschung, Vol. 15, pp. 41-47, 1938

## 21. GOLAND M. et REISSNER E.

"The stress in cemented joints" Journal of Applied Mechanics, Vol. 11, pp. 17-27, 1944

## 22. LUBKIN J.L.

"A theory of adhesive scarf-joints" Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, pp. 255-260, 1957

## 23. ADAMS R.D. et PEPPIATT N.A.

"Effect of Poisson's ratio strains in adherends on stresses of an idealized lap joint" Journal of Strain Analysis, Vol. 8, pp. 134-139, 1973

## 24. ERDOGAN F. et RATWANI M.

"Stress distribution in bonded joints" Journal of Composite Materials, Vol. 5, pp. 378-393, 1971

## 25. HART-SMITH L.J.

"Adhesive bonded Scarf –joint and stepped la joints" NASA, CR 112237, 1973

## 26. WESTMANN R.A.

"Geometrical effects in adhesive joints" International Journal Engineering Sciences, Vol 13, pp 369-391, 1975

## 27. RAMAMURTHY T.S.

"Elastic Analysis of adhesive joint" International Journal of Structural Mechanics and Materials Science, Vol. 14, pp 127-144, 1985,

## 28. MUKI R. et STERNBERG E.

"On the stress analysis of over lapping bonded elastic sheets" International Journal of Solids and Structures, Vol. 4, pp 75-94, 1968

## **29. PERRENOT G.**

*"Etude expérimentale et théorique d'assemblage métalliques en forme de sifflet collé avec une résine époxy",* Thèse Université de Reims, 1988

## **30. RIGOLOT A.**

*"Sur une théorie asymptotique des poutres droites",* Thèse de doctorat d'État de mathématiques, Université de Paris VI, 1976.

## 31. GILIBERT Y. et RIGOLOT A.

"Analyse asymptotique des assemblages collés à double recouvrement sollicités au cisaillement en traction" Journal of Applied Mechanics., Vol. 3, n°3, 1978

## 32. RIGOLOT A. et GILIBERT Y.

" *Théorie élastique de l'assemblage collé*" Matériaux et Techniques, Vol. 18, pp 255-259, 1980

## 33. HALFAOUI S. et 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.

## 34. WASSIAMA A.

"Analyse théorique et expérimentale des contraintes dans un assemblage collé à simple recouvrement en biseau" Thèse de doctorat spécialité : Mécanique, Université de Paris VI, 1991

## 35. ADAMS R.D. et PEPPIATT N.A.

"Stress analysis of adhesive bonded tubular lap joint" Journal of Adhesion, Vol. 9, pp. 255-260, 1957

## 36. THEIN WAH

"Plane stress analysis of a scarf joint" International Journal Solids Structures, Vol. 11, pp. 255-260, 1957

## 37 IKEGAMI M., KISHIMOTO W. OKITA K, NAKAYAMA ET SHIRATO M.

"Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre reinforced plastics and metals"

Internaltional Journal of Adhesion ans Adhesives, Vol. 10, pp. 199-206, 1990

## 38. ADAMS R.D. et PANES G.A.

"The effect of three dimensionnal stresses on the failure of the single lap joints. Proceedings" Proceedings of Euradh 94, Institutes of Materials, 1994

**39.** CROCOMBE A.D., BIGWOOD D.A. et RICHARDSON G.

"Analysing structural adhesive joints failure" International Journal of Adhesion, Vol. 10, pp. 167-178, 1990

## 40. LEE S.J. et LEE G.L.

"Development of the failure model for the adhesively bonded tubular single lap joint" Journal of Adhesion, Vol. 40, pp. 1-14, 1992

### 41 CLARKE J.D. et MCGREGOR I.J.

"Ultimate tensile stress over a zone : a new failure criterion for adhesive joints" Journal of Adhesion, Vol. 42, pp. 255-263,1993

#### 42 CROCOMBE A.D. et ADAMS R.D.

"Elasto-plastic investigation of the peel test" Journal of Adhesion, Vol.13, pp. 241-267, 1982

#### 43 TRANTINA G.G.

"Fracture mechanics approach to adhesive joints" Journal of Composite Materials, Vol. 6, pp. 371-385, 1972

## 44. CHOW C.L. et LU T.J.

"Analysis of failure properties and strength of structural adhesive joints with damage mechanics" International Journal of Damage Mechanics, Vol. 1, pp. 404-434, 1992

#### 45. LASCHET G.

"Numerical strenght perdictions of adhesively bonded multimaterial joints" Conference on Bolted/Bonded Joints in polymeric Composites, Agard, pp. 1-8, 1997

#### 46. KUMAR S.B., SRIDHAR I., SIVASHANKER S., OSIYEMIS.O. et BAG A.

"Tensile failure of adhesively bonded composite scarf joint" Material Science and Engineering, Vol. 132, pp 113-120, 2006

#### 47. HASHIN Z.

" A Reinterpretation of the Palmgren-Miner Rule for Fatigue Life Prediction" Journal of Applied Mechanics, Vol. 47, 329-334, 1980

#### 48. LEE J.D.

"Three dimensional finite element analysis of damage accumulation in composite laminate"

Computers & Structures, Vol.15, pp. 335-350, 1982

#### 49. RANDOLPH A. et CLIFFORD M.

"An improved 2D model for bonded composite joints" International Journal of Adhesion and Adhesive, Vol. 24, pp. 389-405, 2004

#### 50 SIENER M.P.

"Stress field sensitivity of a composite patch repair as a result of varing patch repair thickness"

Composite materials: Testing and design, Vol. 12, pp 444-464, 1992

## 51. BOUAZAOUI L.

"Contribution à l'étude expérimentale et théorique de structures mixtes acier/béton assemblée par collage"

Thèse de doctorat spécialité : Génie Civil, Université de Reims, 2005

## 52. ABE H. ET SATOCH TJ.

"Non-Destructive Detection Method of Fatigue Crack in Spot-Welded Joints " Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol. 4, pp. 666-673, 1986

#### 53. IMANAKA M., HARAGA K et NISHIKAWA T.

"Fatigue strength of adhesive/rivet combined lap joints" Journal of adhesion, Vol. 49, pp. 197-209, 1993

### 54. ZHANG Z., SHANG J.K et LAWRENCE J.R.

"A back face technique strain technique for detecting fatigue crack initiation in adhesive joints" Journal of adhesion, Vol. 49, pp. 23-36, 1995

## 55. CURLEY A.J., HADAVINIA H., KINLOCH A.J. et TAYLOR A.C.

"Predicting the service-life of adhesively-bonded joints" International Journal of Fracture, Vol. 103, pp. 41-69, 2000

#### 56. HADAVINIA H., KINLOCH .J., LITTLE M.S.G. et TAYLOR A.C.

"The prediction of crack growth in bonded joints under cyclic-fatigue loading : I Experimental studies" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 23, pp. 449-461, 2003

#### 57. HADAVINIA H., KINLOCH .J., LITTLE M.S.G. et TAYLOR A.C.

"The prediction of crack growth in bonded joints under cyclic-fatigue loading : II Analytical and finite element studies" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 23, pp. 463-471, 2003

#### 58. GILIBERT Y. et MOREL E.

"Etude de l'influence du comportement mécanique d'un assemblage collé : extensométrie et émission acoustique simultanée" Annales des Composites, pp 301-304, AMAC, n° 3-4, Paris, 1986.

#### 59. QIANG Z.Q. et AKISANYA A.R.

"An investigation of stress singularity near the edge of scarf joints" European Journal of Mechanics A Solids, Vol. 18, pp. 443-463, 1999

## 60. OBJOIS A., GILIBERT Y. et 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

## 61. OBJOIS A., FARGETTE B. et 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, pp. 1057-1070, 2000

## 62. GILBERT Y.

"La liaison collée de type double sifflet : Son comportement mécanique fin étudié à l'aide de l'extensométrie à jauges électriques" Matériaux et technique, Vol 3, pp 39-46, 1999

## 63. DESTREBECQ J.F., GREDIAC M. et SIERRA-RUIZ V.

"The transfer length in reinforced concrete structures strengthened with composite plates: experimental study and modelling" Composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 707-719, 2007

## 64. KINLOCH A.J.

"Predicting the fatigue life of adhesively-bonded joints" The Journal of adhesion, Vol. 43, pp. 79-90, 1993

## 65. HUMFELD G.R. et DILLARD D.A.

"Residual stress development in adhesive joints subjected to thermal cycling" The Journal of adhesion, Vol. 65, pp. 277-306, 1998

## 66. KEMAL APALAK M et GÜNES R

"Thermal residual stresses in an adhesively-bonded functionally graded single-lap joint"

Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 20, pp. 1295-1320, 2006

## 67. COMYN J.

"The effect of humidity on the durability of aluminium-epoxide joints" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 10, pp. 247-253, 1990

## 68. WILSON I., SHEASBY P.G et MADDISON A.

"Significance of environment for performance of structural adhesive bonding" SAE Special Publication, Vol. 106, pp. 1-9, 1997

## 69. COGNARD J.

*"Science et technologie du collage"* Presses Polytechnique Romandes, Lausanne, 2000

## 70. BROCKMANN

"Le collage structural moderne " page 59

## 71. SAANOUNI K. et CHABOCHE J.L.,

"Numerical and Computational methods" (De Borst and Mang), Vol. 3, Chap. 7, 2003

## 72. LESTRIEZ P., SAANOUNI K., MARIAGE J.F. et CHEROUAT A.

"Numerical prediction of ductile damage in metal forming processes including thermal effects"

International Journal of Damage Mechanics, Vol. 13, pp. 59-80, 2004

## 73. LESTRIEZ P., MARIAGE J.F., SAANOUNI K. et CHEROUAT A.

"Numerical simulation of wheel forming process with damage and thermal effects" 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes Columbus, Ohio, U.S.A., 2004

74. ABAQUS 6.4 Documentation Hibbitt, Kerlsson et Sorensen, Inc. http://www.abaqus.com

## 75. ARCAN L., ARCAN M. et DANIEL I.

"SEM fractography of pure and mixed mode interlaminar fracture in graphite/epoxy composite" ASTM Special Technical Publication, Vol. 948, pp. 41-57, 1987

#### 76. WEBER W

"Über die spezifishhe Wärme fester Körper insbesondere der Mettalle" Annalen der Phisik und Chemie, Vol. 96, pp. 177-213, 1830

## 77. TOMSON W. (Lord KELVIN)

"On the dynamical theory of heat" Transaction of the Royal Society, Edinburg, Vol. 20, pp. 261-283, 1853

## **78. BIOT M.A.**

"Thermoelasticity and irreversibile thermodynamics" Journal of applied Physics, Vol. 27, pp. 531-540, 1956

## 79. ROCCA R. et BEVER M.B.

"The thermoelastic effect in iron and nickel as a function of temperature" Transactions AIME, Vol. 188, pp 327-333, 1950

## 80 OFFERMAN S.

"Etude des contraintes mécaniques par Thermoélasticimétrie" Thèse de doctorat de l'Université de Reims, 1988.

## Brevet

#### {1} BREVET AMINES. 20, Bd St Michel 75272 Paris cedex 06.

Inventeur: Y. GILIBERT. 11 rue Delacroix, La Neuvillette 51100 Reims « *Procédé d'assemblage par collage de deux substrats aboutés »* BREVET FRANÇAIS : n° 87.15575, du 10.11.1987. B.O.P.I « Brevets » n°19 du 12 mai 1989. EUROPE : GB, NL, DE, IT, FR, dépôt n° 88.402835.8, du 10.11.1988, n° de la publication 0316 273/A1 de la demande 17.05.1989. Bulletin 89/20.

#### {2} BREVET AMINES. 20, Bd St Michel 75272 Paris cedex 06.

« Dispositif d'ancrage mécanique pour le maintien d'une extrémité d'une pièce parallélépipédique, procédé de fabrication d'un tel dispositif et adaptateur pour son montage sur une machine de traction »

BREVET FRANÇAIS : n° 87.14137, du 10.10.1986. B.O.P.I « Brevets » n°51 du 23 12.88. EUROPE : GB, NL, IT, demande n°87.402264.3, du 9.10.87, délivré le 23.12.88, n°2.605.068.

## **ANNEXES**

## SOMMAIRE

## Données expérimentales du Chapitre III :

Annexe I : Influence du vieillissement naturel

Annexe I.1 : Eprouvette de type sifflet : angle de biseautage $\alpha=33^{\circ}$	170
Annexe I.2 : Eprouvette de type sifflet : angle de biseautage $\alpha=6^{\circ}$	

## Données expérimentales du Chapitre IV :

Annexe II : Influence de la géométrie des subjectiles

Annexe II.1 : Eprouvette de type sifflet : angle de biseautage  $\alpha = 33^{\circ}$ 174Annexe II.2 : Eprouvette de type sifflet : angle de biseautage  $\alpha = 18^{\circ}$ 176Annexe II.3 : Eprouvette de type sifflet : angle de biseautage  $\alpha = 6^{\circ}$ 178Annexe II.4 : Eprouvette de type double sifflet : angle de biseautage  $\alpha = 33^{\circ}$ 180Annexe II.5 : Eprouvette de type double sifflet : angle de biseautage  $\alpha = 18^{\circ}$ 182Annexe II.6 : Eprouvette de type double sifflet : angle de biseautage  $\alpha = 6^{\circ}$ 184

172



<u>Microdéformations superficielles des substrats de type sifflet biseauté avec un angle</u> <u>α=33°constituants les éprouvettes N°1, 2 et 3 étudiées en 2006. A gauche sont représentées les</u> <u>microdéformations de toutes les jauges, à droite sont représentées les jauges de J2 à J8.</u>

α=33° Essai 1	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	-			
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,23	4,38	10,13	11,13	12,13	13,13	14,13				
Fd (kN)	5,65	5,38	5,27	5,45	5,54	5,51	5,54	5,36	5,46	5,65	$Fg_p$	=	5,27	kN
Fg (kN)	5,65	5,52	5,54	5,56	5,65	5,60	5,66	5,58	5,57	5,65	$Fd_p$	=	5,52	kN
Fr (kN)	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65	Fr	=	5,65	kN
$\alpha$ =33° Essai 2	J1	<b>J</b> 2	J3	J4	J5	J6	<b>J</b> 7	18	J9	J10				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,23	4,38	10,13	11,13	12,13	13,13	14,13				
F d(kN)	5,36	5,21	5,24	5,29	5,30	5,29	5,27	5,20	5,25	5,36	$Fg_p$	=	5,20	kN
Fg (kN)	5,36	5,35	5,35	5,35	5,35	5,30	5,30	5,27	5,35	5,36	$Fd_p$	=	5,27	kN
Fr (kN)	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	Fr	=	5,36	kN
α=33° Essai 3	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,23	4,38	10,13	11,13	12,13	13,13	14,13				
Fd (kN)	5,52	5,19	5,28	5,45	5,49	5,51	5,38	5,34	5,21	5,52	$Fg_p$	=	5,19	kN
Fg (kN)	5,52	5,51	5,41	5,45	5,51	5,51	5,51	5,51	5,52	5,52	$Fd_p$	=	5,41	kN
Fr (kN)	5,52	5,52	5,52	5,52	5,52	5,52	5,52	5,52	5,52	5,52	Fr	=	5,52	kN

Evolution de la valeur des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J10 (14,13mm), pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 33°, étudiés en 2006.

Moyenne des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J10 (14,13mm), pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 33°, étudiés en 2006.

$\alpha = 33^{\circ} \text{ (moy)}$	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10						
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,23	4,38	10,13	11,13	12,13	13,1	14,13						
<i>Fd</i> (kN)	5,51	5,26	5,26	5,40	5,44	5,44	5,40	5,30	5,31	5,51	$Fg_p$	=	5,26	kN	±	0,04
Fg (kN)	5,51	5,46	5,43	5,45	5,50	5,47	5,49	5,45	5,48	5,51	$Fd_p$	=	5,43	kN	±	0,13
Fr (kN)	5,51	5,51	5,51	5,51	5,51	5,51	5,51	5,51	5,51	5,51	Fr	=	5,51	kN	±	0,14
$Fg_p = 5,26$	kN ±	0,04 1	kN													
$Fd_p = 5,43$	kN ±	0,131	kN													
Fr = 5,51	kN ±	0,141	kN													



<u>Microdéformations superficielles des substrats de type sifflet biseauté avec un angle α=6°constituants</u> les éprouvettes N°1, 2 et 3, étudiées en 2006. A gauche sont représentées les microdéformations de toutes les jauges, à droite sont représentées les jauges de J2 à J21.

α=6° Essai 1	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	5,38	6,38	7,38	8,38	9,38	14,38				
Fd (kN)	22,24	18,73	20,27	20,43	20,62	20,81	20,77	21,42	21,77	22,03	22,24				
Fg (kN)	22,40	20,39	21,24	21,24	21,56	21,76	21,95	22,14	22,23	22,24	22,38				
Fr (kN)	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90				
	J12	J13	J14	J15	J16	J17	J18	J19	J20	J21	J22				
Abscisse (mm)	81,76	85,76	86,76	87,76	88,76	89,76	90,76	91,76	92,76	93,76	94,76				
Fd (kN)	22,24	22,24	21,89	21,49	21,44	21,26	20,93	20,53	19,91	22,24	22,24	$Fg_p$	=	18,73	kN
Fg (kN)	22,34	22,33	22,14	22,14	22,01	22,01	21,56	21,21	20,89	22,40	22,40	$Fd_p$	=	20,39	kN
Fr (kN)	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90	Fr	=	22,90	kN
α=6° Essai 2	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	5,38	6,38	7,38	8,38	9,38	14,38				
Fd (kN)	25,21	21,37	21,75	22,43	22,59	22,72	22,89	23,22	23,77	23,90	23,90				
Fg (kN)	24,83	22,6	23,17	23,52	23,87	24,1	24,4	24,52	24,64	24,66	24,76				
Fr (kN)	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21				
	J12	J13	J14	J15	J16	J17	J18	J19	J20	J21	J22				
Abscisse (mm)	81,76	85,76	86,76	87,76	88,76	89,76	90,76	91,76	92,76	93,76	94,76				
Fd (kN)	23,90	23,90	23,54	23,38	23,10	22,89	22,49	22,27	21,33	19,68	25,21	$Fg_p$	=	22,60	kN
Fg (kN)	24,76	24,66	24,54	24,54	24,4	24,1	23,9	23,52	23,13	23,15	24,83	$Fd_p$	=	25,21	kN
Fr (kN)	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	25,21	Fr	=	25,21	kN
α=6° Essai 3	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	5,38	6,38	7,38	8,38	9,38	14,38				
Fd (kN)	22,50	19,20	19,68	20,18	20,87	20,97	21,48	21,97	22,17	22,17	22,48				
Fg (kN)	23,3	22,35	22,49	22,52	22,64	22,65	22,9	23,04	23,13	23,15	23,28				
Fr (kN)	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30				
	J12	J13	J14	J15	J16	J17	J18	J19	J20	J21	J22				
Abscisse (mm)	81,76	85,76	86,76	87,76	88,76	89,76	90,76	91,76	92,76	93,76	94,76				
Fd (kN)	22,48	21,97	21,87	21,76	21,27	21,17	20,76	20,18	19,68	22,50	22,50	$Fg_p$	=	19,20	kN
Fg (kN)	23,28	23,15	23,13	23,04	22,9	22,65	22,51	22,32	22,3	23,3	23,3	$Fd_p$	=	22,30	kN
Fr (kN)	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	23,30	Fr	=	23,30	kN

Evolution de la valeur des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J22 (96,76mm), pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 6°, étudiés en 2006.

Moyenne des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J22 (96.76mm), pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 6°, étudiés en 2006.

<u>(96,76n</u>	<u>nm), po</u>	ur les t	trois ec	hantill	ons de	type si	fflet av	vec un	angle c	le 6°, i	<u>etudies e</u>	eı
$\alpha = 6^{\circ} \text{ (moy)}$	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	) J11	
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	5,38	6,38	7,38	8,38	9,38	3 14,38	
Fd (kN)	23,32	19,77	20,57	21,01	21,36	21,50	21,71	22,20	22,57	22,70	) 22,87	
Fg (kN)	23,51	21,78	22,30	22,43	22,69	22,84	23,08	23,23	23,33	23,35	5 23,47	
Fr (kN)	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	) 23,80	
	J12	J13	J14	J15	J16	J17	J18	J19	J20	J21	J22	
Abscisse (mm)	81,76	85,76	86,76	87,76	88,76	89,76	90,76	91,76	92,76	93,76	5 94,76	
Fd (kN)	22,87	22,70	22,43	22,21	21,94	21,77	21,39	20,99	20,31	21,47	23,32	
Fg (kN)	23,46	23,38	23,27	23,24	23,10	22,92	22,66	22,35	22,11	22,95	23,51	
Fr (kN)	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	23,80	) 23,80	
$Fg_p = 19,77$	$kN \pm$	1,94	kN									
Ed - 21.78	kN +	2.41	kΝ									

 $Fd_p = 21,78 \text{ kN} \pm 2,41 \text{ kN}$  $Fr = 23,80 \text{ kN} \pm 1,16 \text{ kN}$ 




α=33° Essai N°1	J1	J2	J3	J4		
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38		
<i>Fd</i> (kN)	4,97	4,06	4,32	4,47	$Fd_p$	= 4,06 kN
Fg (kN)	4,97	4,61	4,58	4,70	$Fg_p$	= 4,58 kN
Fr (kN)	4,97	4,97	4,97	4,97	Fr	= 4,97 kN
α=33° Essai N°2	J1	J2	J3	J4		
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38		
Fd (kN)	5,32	4,52	4,58	4,76	$Fd_p$	= 4,52 kN
Fg (kN)	5,32	4,99	4,94	5,03	$Fg_p$	= 4,94 kN
Fr (kN)	5,32	5,32	5,32	5,32	Fr	= 5,32 kN
α=33° Essai N°3	J1	J2	J3	<b>J</b> 4		
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38		
Fd (kN)	5,37	4,64	4,71	4,82	$Fd_p$	= 4,64 kN
Fg (kN)	5,37	5,04	5,05	5,18	$Fg_p$	= 5,04 kN
Fr (kN)	5,37	5,37	5,37	5,37	Fr	= 5.37 kN

Evolution de la valeur des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J4 (3,38mm), pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 33°..

### Moyenne des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J24 (3,38mm), pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 33°.,

$\alpha = 33^{\circ} \text{ (moy)}$	J1	J2	J3	J4							
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38							
Fd (kN)	5,22	4,41	4,54	4,68	$Fd_p$	=	4,41	kN	±	0,29	kN
Fg (kN)	5,22	4,88	4,86	4,97	$Fg_p$	=	4,86	kN	±	0,23	kN
Fr (kN)	5,22	5,22	5,22	5,22	Fr	=	5,22	kN	±	0,20	kN





α=18° Essai N°1	J1	J2	J3	J4	J5	
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	
Fd (kN)	8,27	6,22	6,67	6,95	7,36	$Fd_p = 6,22$ kN
Fg (kN)	8,27	7,76	7,82	8,11	8,12	$Fg_p = 7,76$ kN
Fr (kN)	8,27	8,27	8,27	8,27	8,27	Fr = 8,27  kN
α=18° Essai N°2	J1	J2	J3	J4	J5	
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	
Fd (kN)	7,73	6,01	6,58	6,70	7,52	$Fd_p = 6,01$ kN
Fg (kN)	7,73	7,14	7,55	7,52	7,63	$Fg_p = 7,14$ kN
Fr(kN)	7,73	7,73	7,73	7,73	7,73	Fr = 7,73  kN
α=18° Essai N°3	J1	J2	J3	J4	J5	
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	
Fd (kN)	8,71	7,53	7,75	7,85	8,27	$Fd_p = 7,53$ kN
Fg (kN)	8,71	8,31	8,43	8,64	8,60	$Fg_p = 8,31$ kN
Fr (kN)	8,71	8,71	8,71	8,71	8,71	Fr = 8,71  kN

Evolution de la valeur des seuils d'end	ommagement Fd, Fg,	Fr enregistrés	par les j	auges J1 (	0,38mm)
à J5 (4,38mm), pour les tro	vis échantillons de typ	e sifflet avec ur	angle c	le 33°.,	

## Moyenne des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J5 (4,38mm), pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 33°.,

$\alpha = 18^{\circ} \text{ (moy)}$	J1	J2	J3	J4	J5					
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38					
Fd (kN)	8,24	6,59	7,00	7,17	7,72	$Fd_p$	= 6,59	kN	± 0,76	kN
Fg (kN)	8,24	7,74	7,94	8,09	8,12	$Fg_p$	= 7,74	kN	± 0,58	kN
Fr(kN)	8,24	8,24	8,24	8,24	8,24	Fr	= 8,24	kN	<b>±</b> 0,49	kN





$\alpha = 6^{\circ}$ Essai N°1	J1	J2	J3	J4	J5	J6	
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	5,38	
Fd (kN)	25,96	22,43	23,20	24,26	24,53	24,86	$Fd_p = 23,20$ kN
Fg (kN)	25,96	24,15	24,75	25,12	25,06	25,34	$Fg_p = 24,75  \mathrm{kN}$
Fr (kN)	25,96	25,96	25,96	25,96	25,96	25,96	Fr = 25,96  kN
α=6° Essai N°2	J1	J2	J3	J4	J5	J6	
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	5,38	
Fd (kN)	24,7	21,29	22,26	22,55	23,06	23,6	$Fd_p = 22,26$ kN
Fg (kN)	24,7	22,89	23,15	23,43	23,85	24,11	$Fg_p = 23,15 \text{ kN}$
Fr (kN)	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	Fr = 24,70  kN
α=6° Essai N°3	J1	J2	J3	J4	J5	J6	
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	5,38	
<i>Fd</i> (kN)	14,72	18,95	19,82	20,46	20,92	21,67	$Fd_p = 19,82$ kN
Fg (kN)	21,22	21,82	22,55	22,74	23,13	23,22	$Fg_p = 22,55  \text{kN}$
Fr (kN)	24,02	24,02	24,02	24,02	24,02	24,02	Fr = 24,02  kN

### Evolution de la valeur des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J6 (5,38mm), pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 33°..

## Moyenne des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J6 (5,38mm), pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 6°.,

$\alpha = 6^{\circ} \text{ (moy)}$	J1	J2	J3	J4	J5	J6							
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	5,38							
Fd (kN)	21,79	20,89	21,76	22,42	22,84	23,38	$Fd_p$	=	21,76	kN	±	1,69	kN
Fg (kN)	23,96	22,95	23,48	23,76	24,01	24,22	$Fg_p$	=	23,48	kN	±	1,10	kN
Fr (kN)	24,89	24,89	24,89	24,89	24,89	24,89	Fr	=	24,89	kN	±	0,97	kN



<u>Microdéformations superficielles des substrats de type sifflet biseauté avec un angle</u> <u>α=33°constituants les éprouvettes N°1, 2 et 3, en fonction de la force de traction. A gauche sont</u> <u>représentées les microdéformations de des jauges J1 à J4 situées à l'extrémité du substrat, à droite sont</u> <u>représentées les microdéformations des jauges J5 à J10 situées à l'aplomb du Vé interne</u>

$\alpha = 33^{\circ}$ Eccol N <sup>o</sup> 1	<b>I</b> 1	12	13	14	15	16	17	10	10	110				
$\frac{0-33}{1}$ Essailly 1	0.20	J2	<b>J</b> 20	2 20	5.02	502	7.02	0.00	J.9	10.02				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	5,02	0,02	7,02	8,02	9,02	10,02				
Fd (kN)	5,54	5,30	5,45	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	$Fd_p$	=	5,30	kN
Fg (kN)	5,63	5,54	5,65	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	$Fg_p$	=	5,54	kN
Fr (kN)	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	Fr	=	5,79	kN
α=33° Essai N°2	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	5,02	6,02	7,02	8,02	9,02	10,02				
Fd (kN)	6,03	5,49	5,68	5,78	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	$Fd_p$	=	5,49	kN
Fg (kN)	6,03	5,60	5,75	5,90	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	$Fg_p$	=	5,60	kN
Fr(kN)	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	Fr	=	6,03	kN
α=33° Essai N°3	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	5,02	6,02	7,02	8,02	9,02	10,02				
Fd (kN)	6,36	5,95	5,83	5,83	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	$Fd_p$	=	5,83	kN
Fg (kN)	6,36	6,16	6,15	6,23	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	$Fg_p$	=	6,15	kN
Fr (kN)	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	Fr	=	6,36	kN

### Evolution de la valeur des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J10 (10,02mm), pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 33°..

## Moyenne des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J10 (10,02mm), pour les trois échantillons de type sifflet avec un angle de 33°.,

$\alpha = 33^{\circ} \text{ (moy)}$	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10						
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	5,02	6,02	7,02	8,02	9,02	10,02						
Fd (kN)	5,97	5,58	5,65	5,80	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	$Fd_p$	= 5,58	kN	±	0,27	kN
Fg (kN)	6,01	5,77	5,85	5,97	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	$Fg_p$	= 5,77	kN	±	0,30	kN
Fr(kN)	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	Fr	= 6,06	kN	±	0,28	kN



<u>Microdéformations superficielles des substrats de type sifflet biseauté avec un angle</u> <u>α=18°constituants les éprouvettes N°1, 2 et 3, en fonction de la force de traction. A gauche sont</u> <u>représentées les microdéformations de des jauges J1 à J6 situées à l'extrémité du substrat, à droite sont</u> <u>représentées les microdéformations des jauges J7 à J17 situées à l'aplomb du Vé interne</u>

<u>a J17 (10,</u>	<u>oomin),</u>	pour le	5 11015 6	Chantin	ulls de l	<u>ype uoi</u>		IEL AVEC	un angio	<del>c uc 10.</del>		
α=18° Essai N°1	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	7,00	8,80	9,80				
Fd (kN)	8,15	7,04	7,75	7,89	7,85	8,00	8,00	8,03				
Fg (kN)	8,15	8,08	8,01	8,02	8,03	8,08	8,15	8,15				
Fr (kN)	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15				
	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16	J17			
Abscisse (mm)	10,80	11,80	12,80	13,80	14,80	15,80	16,80	17,80	18,80			
Fd (kN)	7,69	7,82	7,78	7,88	7,88	7,78	7,78	7,98	8,13	$Fd_p =$	7,04	kN
Fg (kN)	8,15	8,15	8,15	8,03	8,04	8,04	8,08	8,13	8,13	$Fg_p =$	8,01	kN
Fr (kN)	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	Fr =	8,15	kN
α=18° Essai N°2	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	4,38	7,00	8,80	9,80				
Fd (kN)	8,96	8,23	8,17	8,23	8,45	8,79	8,85	8,85				
Fg (kN)	8,96	8,79	8,79	8,85	8,85	8,79	8,96	8,96				
Fr (kN)	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96				
	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16	J17			
Abscisse (mm)	10,80	11,80	12,80	13,80	14,80	15,80	16,80	17,80	18,80			
Fd (kN)	8,79	8,62	8,45	8,45	8,51	8,34	8,45	8,79	8,96	$Fd_p =$	8,17	kN
Fg (kN)	8,96	8,96	8,96	8,96	8,85	8,85	8,85	8,91	8,96	$Fg_p =$	8,79	kN
Fr (kN)	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	Fr =	8,96	kN
α=18° Essai N°3	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	5,20	7,00	8,80	9,80				
Fd (kN)	8,52	8,10	8,08	8,40	8,27	8,48	8,40	8,40				
Fg (kN)	8,52	8,39	8,43	8,44	8,43	8,48	8,40	8,40				
Fr (kN)	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52				
	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16	J17			
Abscisse (mm)	10,80	11,80	12,80	13,80	14,80	15,80	16,80	17,80	18,80			
Fd (kN)	8,40	8,36	8,43	8,16	8,10	8,15	8,07	8,40	8,48	$Fd_p =$	8,07	kN
Fg (kN)	8,40	8,42	8,49	8,39	8,39	8,26	8,40	8,46	8,48	$Fg_p =$	8,26	kN
Fr (kN)	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	Fr =	8,52	kN

Evolution de la valeur des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J17 (18,80mm), pour les trois échantillons de type double sifflet avec un angle de 18°.

Moyenne des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J17 (18,80mm), pour les trois échantillons de type double sifflet avec un angle de 18°.,

$\alpha = 18^{\circ} \text{ (moy)}$	J1	J2	J3	<b>J</b> 4	J5	J6	- J7	J8			-					
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	5,20	7,00	8,80	9,80								
Fd (kN)	8,54	7,79	8,00	8,17	8,19	8,42	8,42	8,43								
Fg (kN)	8,54	8,42	8,41	8,44	8,44	8,45	8,50	8,50								
Fr(kN)	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54								
	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16	J17							
Abscisse (mm)	10,80	11,80	12,80	13,80	14,80	15,80	16,80	17,80	18,80							
Fd (kN)	8,29	8,27	8,22	8,16	8,16	8,09	8,10	8,39	8,52	$Fd_p$	=	7,79	kN	±	0,57	k
Fg (kN)	8,50	8,51	8,53	8,46	8,43	8,38	8,44	8,50	8,52	$Fg_p$	=	8,38	kN	±	0,39	k
Fr (kN)	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	Fr	=	8,54	kN	±	0,40	k



<u>Microdéformations superficielles des substrats de type sifflet biseauté avec un angle α=6°constituants</u> <u>les éprouvettes N°1, 2 et 3, en fonction de la force de traction. A gauche sont représentées les</u> <u>microdéformations de des jauges J1 à J4 situées à l'extrémité du substrat, à droite sont les</u> <u>microdéformations des jauges J5 à J11 situées à l'aplomb du Vé interne</u>

α=6° Essai N°1	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	42,77	43,77	44,77	45,77	46,77	47,77	48,77				
Fd (kN)	23,68	20,85	21,50	23,11	22,38	21,56	21,97	22,91	23,68	23,68	23,68	$Fd_p$	=	20,85	kN
Fg (kN)	23,68	21,87	22,38	22,84	23,06	22,68	23,27	23,01	23,68	23,68	23,68	$Fg_p$	=	21,87	kN
Fr(kN)	23,68	23,68	23,68	23,68	23,68	23,68	23,68	23,68	23,68	23,68	23,68	Fr	=	23,68	kN
α=6° Essai N°2	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	42,77	43,77	44,77	45,77	46,77	47,77	48,77				
Fd (kN)	21,32	20,43	20,78	20,93	20,56	20,56	20,34	20,43	20,39	21,03	21,32	$Fd_p$	=	20,34	kN
Fg (kN)	21,32	21,17	21,25	20,98	20,78	20,91	20,91	21,06	21,06	21,42	21,32	$Fg_p$	=	20,78	kN
Fr (kN)	21,32	21,32	21,32	21,32	21,32	21,32	21,32	21,32	21,32	21,32	21,32	Fr	=	21,32	kN
or C <sup>0</sup> Essei Nº2	T1	10	12	T4	15	И	17	TO	IO	110	<b>T</b> 1.1				
$\alpha = 0^{\circ}$ Essai N°3	JI	J2	12	J4	12	10	J/	J8	J9	J10	JII				
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	42,77	43,77	44,77	45,77	46,77	47,77	48,77				
Fd (kN)	22,60	21,12	21,33	22,60	22,00	20,72	21,37	21,78	22,13	22,60	22,60	$Fd_p$	=	20,72	kN
Fg (kN)	22,60	21,74	22,30	22,60	22,22	21,66	21,97	22,13	22,22	22,60	22,60	$Fg_p$	=	21,66	kN
Fr(kN)	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	Fr	=	22,60	kN

Evolution de la valeur des seuils d'e	endommagement Fa	d, Fg, Fr enreg	gistrés p	oar les	auges J1	(0,38mm)
<u>à J11 (48,77mm), pour le</u>	es trois échantillons	s de type siffle	et avec i	ın angl	e de 6°.	

# Moyenne des seuils d'endommagement *Fd*, *Fg*, *Fr* enregistrés par les jauges J1 (0,38mm) à J11 (48,77mm), pour les trois échantillons de type double sifflet avec un angle de 6°..

$\alpha = 6^{\circ} \text{ (moy)}$	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11
Abscisse (mm)	0,38	1,38	2,38	3,38	42,77	43,77	44,77	45,77	46,77	47,77	48,77
Fd (kN)	22,53	20,80	21,20	22,21	21,65	20,95	21,23	21,71	22,06	22,43	22,53
Fg (kN)	22,53	21,59	21,98	22,14	22,02	21,75	22,05	22,07	22,32	22,56	22,53
Fr (kN)	22,53	22,53	22,53	22,53	22,53	22,53	22,53	22,53	22,53	22,53	22,53
$Fd_p = 20,80$ $Fg_p = 21,59$ Fr = 22,53	$\begin{array}{ll} kN & \pm \\ kN & \pm \\ kN & \pm \end{array}$	0,26 0,54 1,18	kN kN kN								

#### ETUDE EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT MICROMECANIQUE DES LIAISONS COLLEES DE TYPE SIFFLET ET DOUBLE SIFFLET

### Résumé :

Cette étude porte sur l'analyse expérimentale et numérique du comportement micromécanique des assemblages collés de type sifflet et double sifflet. La partie expérimentale de nos recherches utilise la grande sensibilité des jauges électriques, dans le but de caractériser l'endommagement progressif de nos éprouvettes jusqu'à leurs ruptures. Les nombreux essais réalisés montrent que l'endommagement peut être défini par trois seuils distincts (amorçage des premières microfissures Fd, charge pour laquelle elles se propagent Fg et la rupture ultime de l'éprouvette Fr), et que cet endommagement est étroitement lié aux propriétés mécaniques et géométriques des échantillons. Cette technique expérimentale est utilisée pour caractériser l'influence du vieillissement naturel sur l'endommagement des joints adhésifs biseautés en résine époxy et pour caractériser l'influence d'une singularité géométrique située au cœur du système jointif. La partie numérique de nos recherches est basée sur l'utilisation d'une loi élastoplastique couplée avec un modèle d'endommagement. Les modélisations nous permettent d'étudier le comportement de nos assemblages à l'échelle du joint, d'affiner nos analyses expérimentales et de préciser nos conclusions. Enfin une analyse prospective, basée sur des essais de thermoélasticimétrique est réalisée sur un assemblage collé de type double sifflet. Cette analyse apporte un éclairage original sur le comportement mécanique de ce type de liaison.

### EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF THE MICROMECHANICAL BEHAVIOR OF THE ADHESIVELY BONDED SCARF JOINT AND DOUBLE SCARF JOINT

#### **Abstract :**

This work consists in experimental and numerical analysis of the micromechanical behaviour of the adhesively bonded scarf joints and double scarf joints. The experimental part of our research uses the great sensitivity of the electric gauges, in order to characterize the progressive damage evolution of our bonded joints. The collected experimental data shows that damage can be defined by three distinct thresholds: the initiation of the first microcracks (load Fd), start of microcracks propagation (load Fg) and the ultimate failure of the adhesive layer (load Fr). The aim of this experimental program is to characterise the influence of natural ageing process on the damage evolution of two adhesively bonded scarf joints and to characterize the effects of geometrical singularity located in the middle of the adhesive joint. The numerical modelling of our research is carried out with ABAQUS® software. F.E. Modelling, enable us to study the mechanical behaviour of our assemblies in zones difficult to observe in the experimental studies. A complete thermoelasticimetric analysis of an adhesively bonded double scarf joint was carried out. This work allows studying and understanding the influence of an interior angle confined in the middle of the assembly, on the first damages initiation.