



HAL
open science

Assemblages structuraux des convertisseurs de puissance

Mohamad Ali

► **To cite this version:**

Mohamad Ali. Assemblages structuraux des convertisseurs de puissance. Génie des procédés. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2009. Français. NNT : 2009INPT003H . tel-04399162

HAL Id: tel-04399162

<https://theses.hal.science/tel-04399162>

Submitted on 17 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *Institut National Polytechnique de Toulouse*

Discipline ou spécialité : *Mécanique*

Présentée et soutenue par : *ALI Mohamad*

Le *15 Mai 2009*

Titre : *Assemblages structuraux des convertisseurs de puissance*

Jury

<i>M. HABAS Jean-Pierre</i>	<i>Maître de conférences HDR à l'Université de Pau</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>M. GERARD Alain</i>	<i>Professeur des universités à l'université de Bordeaux</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>M. MORY Mathieu</i>	<i>Professeur des universités à l'ENSGTI Pau</i>	<i>Membre</i>
<i>M. PUEL Bernard</i>	<i>Chef de service conception Industrielle à ALSTOM Transport</i>	<i>Membre</i>
<i>M. KARAMA Moussa</i>	<i>Professeur des universités à l'ENIT</i>	<i>Directeur de Thèse</i>
<i>M. LORRAIN Bernard</i>	<i>Maître de conférences à l'ENIT</i>	<i>Co-Encadrant</i>
<i>M. EVIEUX Jérôme</i>	<i>Responsable Métier Industrialisation Avancée ALSTOM Transport</i>	<i>Invité</i>
<i>M. CHAMIELEC Olivier</i>	<i>Chef de Groupe Conception Industrielle ALSTOM Transport</i>	<i>Invité</i>

Ecole doctorale : *Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés (MEGeP)*

Unité de recherche : *Laboratoire Génie de Production de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes*

Directeur de thèse : *KARAMA Moussa*

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE liant la société ALSTOM Transport de Séméac (65) et le Laboratoire Génie de Production (LGP) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes. (ENIT).

Je tiens à remercier Monsieur Bernard PUEL, chef de service conception Industrielle à ALSTOM Transport et qui est à l'origine de cette étude, pour sa précieuse collaboration à la réalisation de ce travail.

J'adresse ma profonde reconnaissance aux Professeurs Jacques Alain PETIT et Daniel NOYES, respectivement Directeur de l'ENIT et Directeur du LGP, pour m'avoir accueilli au sein de leur structure.

Je remercie vivement mon directeur de thèse Moussa KARAMA Professeur et Directeur de la Recherche à l'ENIT, pour son aide, son soutien et pour la grande confiance qu'il m'a accordée.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon co-encadrant Bernard LORRAIN Maître de Conférences à l'ENIT, pour son aide et ses conseils si précieux, sa disponibilité tout au long de ces travaux. Je le remercie tout particulièrement pour son aide à la mise en place et à la réalisation des essais.

Mes plus sincères remerciements vont à Messieurs Jean Pierre HABAS, Maître de conférences HDR à l'université de PAU et des Pays de l'Adour, et Alain GERARD Professeur à l'université de Bordeaux, qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de cette thèse. Ainsi qu'à Monsieur le Professeur Mathieu MORY de l'université de PAU et des Pays de l'Adour et à Messieurs Jérôme EVIEUX et Olivier CHAMIELEC de la société ALSTOM Transport qui ont accepté de participer à mon jury de soutenance.

J'adresse mes plus vifs remerciements d'une part à Madame Valérie NASSIET Maître de conférences au LGP de l'ENIT pour sa disponibilité et le temps qu'elle m'a consacré ainsi que pour ses conseils et son aide précieuse et profitable. Je remercie d'autre part toutes les personnes du LGP ainsi que l'équipe de l'atelier de l'ENIT qui m'ont aidé à réaliser les travaux de ma thèse.

Toute ma reconnaissance va à ma famille, et, plus particulièrement à ma femme et ma mère qui par leur présence et leur soutien m'ont aidé à achever mes études.

Résumé

L'accroissement des performances des équipements de Traction ferroviaire, reposait essentiellement jusqu'à maintenant, sur l'intégration des innovations dans le domaine des composants électriques et des matériaux diélectriques mais la standardisation de sous-ensembles réutilisables nous conduit à reconsidérer les assemblages structuraux des coffres de traction (convertisseurs de puissance).

Ces coffres de traction sont assemblés actuellement avec des éléments de fixation mécanique (boulon, rivet), le but est donc d'améliorer la connaissance des comportements mécaniques de ces types d'assemblages à travers d'une étude expérimentale basée sur des essais statiques et dynamiques sur des joints boulonnés et rivetés. Ces essais nous ont permis de valider des modèles numériques par des éléments finis en utilisant les codes de calcul ABAQUS et ANSYS.

La deuxième partie de la thèse concerne les assemblages par collage structural. Nous avons étudié la possibilité de remplacer les assemblages mécaniques classiques par l'assemblage par collage structural. La première phase de notre travail a été de recenser et sélectionner des adhésifs structuraux susceptibles de répondre à notre cahier de charge. Dans cette partie les travaux suivants ont été réalisés :

- Etude des comportements des adhésifs en tant que matériau, ce qui a nécessité de réaliser des éprouvettes massiques.
- Réalisation d'essais expérimentaux en statique et en dynamique sur des joints collés avec l'adhésif sélectionné.
- Création des modèles numériques non linéaires en 3D sur ABAQUS pour les joints collés.
- Etude hygrothermique accélérée afin d'étudier l'effet du vieillissement sur les assemblages collés en fonction de l'humidité et de la température.

Mots clés : assemblages structuraux, assemblages boulonnés, assemblages rivetés, collage structural, joints collés, vieillissements hygrothermiques.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Techniques d’assemblages et caractérisations	7
I-1 Introduction.....	9
I-2 Historique sur les assemblages ferroviaires.....	9
I-3 Les technologies d’assemblages utilisées par ALSTOM Transport.....	11
I-4 Assemblage ponctuel par éléments de fixation mécanique.....	11
I-4-1 Types d’éléments de fixation et domaines d’application.....	12
I-4-2 Études réalisées dans le domaine des assemblages mécaniques.....	14
I-4-2.1 Transfert de charge	14
I-4-2.2 Investigations sur la flexibilité des fixations	16
I-4-3.3 Synthèse.....	19
I-4-3 Méthodes pour calculer le transfert de charge des assemblages en multi-fixation.....	19
I-4-3.1 Définition.....	20
I-4-3.2 Approche par récurrence	20
I-4-3.3 Approche par analogie électrique.....	21
I-4-4 Rupture.....	22
I-4-4.1 Modes de rupture	22
I-4-4.2 Concentration de contraintes	24
I-4-5 Essais mécaniques sur des joints boulonnés ou rivetés	25
I-4-5.1 Sollicitation en cisaillement	25
I-4-5.2 Sollicitation en traction	27
I-4-6 Modélisation numérique des fixations.....	27
I-4-6.1 Modèle ressort	27
I-4-6.2 Modèle poutre unique.....	28
I-4-6.3 Modèle coque et poutre	28
I-4-6.4 Modèle complet.....	29
I-5 Assemblage continu par collage structural	29
I-5-1 Introduction.....	29
I-5-2 Les mécanismes du collage et les modèles de l’adhésion	30
I-5-2.1 Principe de l’adhésion	30
I-5-2.2 Modèles de l’adhésion.....	31

➤	Modèle de la liaison chimique.....	31
➤	Modèle mécanique.....	32
➤	Modèle thermodynamique - Notion de mouillage	33
➤	Modèle de la diffusion.....	35
➤	Modèle électrostatique.....	35
➤	Modèle des couches interfaciales à faible cohésion	36
I-5-3	L'adhésif structural et les principales familles d'adhésifs utilisées dans l'industrie...	36
I-5-3.1	Généralités sur les adhésifs structuraux	36
I-5-3.2	Les principales familles d'adhésifs utilisées dans l'industrie	37
➤	Les époxydes	37
➤	Les polyuréthanes.....	38
➤	Les acryliques	38
➤	Les polyimides.....	38
➤	Les silicones	39
I-5-3.3	Applications des adhésifs structuraux	39
I-5-3.4	Mise en œuvre du collage structural.....	40
➤	Préparation des surfaces	40
➤	Les traitements mécaniques.....	40
➤	Les traitements chimiques (cas des métaux)	41
➤	Primaires d'adhésion.....	41
➤	Réaction de prise	42
I-5-4	Comportements mécaniques des joints collés	42
I-5-4.1	Approches analytiques	43
➤	Analyse uniaxiale	43
➤	Analyses biaxiales	45
I-5-4.2	Approches numériques	49
➤	Analyse de Harris et Adams	49
➤	Analyse de Tsai et Morton	50
➤	Utilisation d'éléments finis spéciaux.....	50
I-5-4.3	Synthèse.....	52
➤	La longueur de recouvrement.....	52
➤	La rigidité des substrats	53
➤	La rigidité de l'adhésif.....	53
➤	Le comportement mécanique des adhésifs	53

II-4-2 Étude numérique.....	78
II-4-2.1 Objectif.....	79
II-4-2.2 Modélisation actuelle du coffre de traction.....	79
II-4-2.3 Modèles 3D non linéaires	80
II-4-2.3.1 Position du problème.....	80
II-4-2.3.2 Caractéristiques des matériaux.....	81
II-4-2.3.3 Le maillage.....	81
II-4-2.3.4 Conditions aux limites.....	82
II-4-2.3.5 Caractéristiques des matériaux et prise en compte des conditions de montage	83
II-4-2.4 Corrélation des résultats statiques et numériques	83
II-4-2.4.1 Résultats en Cisaillement	83
II-4-2.4.2 Résultats en traction	84
II-4-3 Exploitations ALSTOM	86
II-4-3.1 Préparation à la modélisation Ansys®	86
II-4-3.2 Modèle numérique 2D	89
II-5 Approche expérimentale en dynamique	91
II-5-1 But des essais de fatigue et conséquences	92
II-5-2 Méthode et conditions d'essai	92
II-5-3 Résultats des essais dynamiques.	93
II-5-3.1 Sollicitations en traction.....	93
II-5-3.2 Sollicitations en cisaillement	94
II-5-4 synthèse	96
II-6 Conclusion.....	97

Chapitre III : Assemblage par collage structural 99

III-1 Introduction	101
III-2 Assemblage par collage structural	101
III-2-1 Collage structural moderne	101
III-2-2 Efficacité des adhésifs structuraux.....	102
III-2-2.1 Adhésion et Cohésion.....	102
III-2-2.2 Interfaces et préparations des surfaces	102
III-2-2.3 Sollicitations mécaniques et modes de rupture.....	103

III-3 Cahier des charges.....	103
III-3-1 Fonctions à assurer par le collage structural	103
III-3-2 Conditions industrielles et mise en œuvre du collage structural.....	104
III-3-3 Choix et validation de quelques adhésifs répondant au cahier des charges	105
III-3-4 Choix de l'adhésif à utiliser	107
III-3-5 L'adhésif époxy bi-composants 7240	108
III-4 Comportement mécanique de l'adhésif sélectionné	108
III-4-1 Caractérisation de l'adhésif à l'état massif	109
III-4-2 Caractérisation non destructive par propagation d'ondes ultrasonores.....	110
III-4-2.1 Génération d'ondes ultrasonores	111
III-4-2.2 Dispositif de caractérisation par contact direct.....	112
III-5 Etude expérimentale de l'assemblage collé	113
III-5-1 Configurations et géométries des essais sur les assemblages collés.....	113
III-5-1.1 Joints sollicités en cisaillement.....	114
III-5-1.2 Joints sollicités en traction.....	114
III-5-2 Mise en œuvre et réalisation des joints collés.....	115
III-5-3 Essais mécaniques sur joints collés.....	116
III-5-3.1 Etude statique des joints collés	117
III-5-3.2 Etude dynamique des joints collés.....	120
III-6 Modélisation numérique des essais mécaniques	123
III-6-1 Introduction	123
III-6-2 Modélisation de l'adhésif	124
III-6-2.1 Les grandes classes de comportement de l'adhésif	124
III-6-2.1.a Comportement élastique.....	124
III-6-2.1.b Comportement visco-élastique.....	125
III-6-2.1.c Comportement élasto-plastique.....	125
III-6-2.2 La loi de comportement de l'adhésif 7240	125
III-6-3 Modèles numériques 3D non linéaires	126
III-6-3.1 La géométrie	126
III-6-3.2 Le maillage	126
III-6-3.3 Les matériaux.....	127
III-6-3.4 Les conditions aux limites et le chargement	127
III-6-3.5 Gestion des calculs et exploitation des résultats	127

III-7 Conclusions	130
<hr/>	
Chapitre IV : Dégradation hygrothermique des assemblages collés	131
IV-1 Vieillissement hygrothermique	133
IV-1-1 Prédiction de la durée de vie	134
IV-1-2 Protocole expérimental du vieillissement hygrothermique accéléré	136
IV-1-3 Températures de vieillissement-facteur d'accélération	137
IV-1-4 Indicateur d'endommagement	137
IV-1-5 Procédure et fréquence de prélèvement	138
IV-1-6 Démarche expérimentale	138
IV-1-7 Résultats obtenus	138
IV-2 Optimisation du cycle de réticulation de l'adhésif	142
IV-2-1 Caractérisation thermomécanique de l'adhésif 7240 réticulé à température ambiante	143
IV-2-1.1 Le rhéomètre.....	143
IV-2-1.2 L'analyseur thermomécanique (TMA).....	145
IV-2-1.2.1 Coefficient de dilatation thermique	147
IV-2-2 Polymérisation de l'adhésif époxy (7240 B/A)	147
IV-2-2.1 La calorimétrie différentielle à balayage (DSC)	148
IV-2-3 Optimisation du cycle de réticulation de l'adhésif	148
IV-2-4 vieillissement hygrothermique par le mécanisme de diffusion d'eau.....	155
IV-2-4.1 Mécanisme de diffusion d'eau.....	155
IV-3 Conclusions et récapitulatifs	156
<hr/>	
Conclusions générales et perspectives	157
Conclusions	159
Perspectives	160
Production scientifique	163
Références	167
Annexes	177
Annexe 1.....	179
Annexe 2.....	181
Annexe 3.....	183

Annexe 4.....	187
Annexe 5.....	189
Annexe 6.....	191

Introduction générale

L'assemblage structural est l'un des aspects clés du développement et de la fabrication des produits et des structures de construction mécanique. Pour faire le bon choix parmi les nombreuses méthodes d'assemblage, l'utilisateur doit définir le cahier des charges de l'assemblage en tenant compte en premier lieu des combinaisons de matériaux à assembler. En effet, l'assemblage ne sera pas abordé de la même façon s'il doit concerner des pièces métalliques revêtues ou non, des pièces composites, voire un assemblage hybride. De même, l'aspect fonctionnel de l'assemblage doit être considéré au sens de sa résistance, de sa durée de vie et de l'éventualité de son démontage. D'autre part les contraintes économiques liées à l'industrialisation du produit ne sont pas à négliger et il faut prendre en compte les critères de mise en œuvre et d'accessibilité pour la réalisation de l'assemblage.

La structure métallique, autour de laquelle ce travail s'est articulé, est un coffre de traction (Figure 1) installé sur les trains, métros ou tramways et qui reçoit les convertisseurs de puissance. Ce coffre est constitué d'un ensemble de caisses métalliques boulonnées dans lesquelles nous trouvons les différents composants électriques et électroniques nécessaires pour assurer la traction d'un train. Ces caisses ou modules sont regroupés sur une barre centrale qui joue le rôle de colonne vertébrale du coffre, l'ensemble est fixé sur la locomotive par un châssis porteur. La structure du coffre de traction doit alors répondre aux normes de résistance mécanique appliquées dans le domaine du transport ferroviaire. Le partenaire industriel de notre étude est l'entreprise ALSTOM TRANSPORT de Tarbes (65).

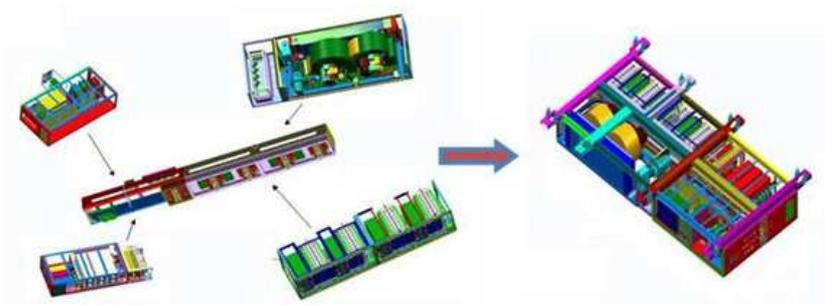


Figure 1 : Coffre de traction.

L'accroissement des performances des équipements de traction, reposait essentiellement jusqu'à maintenant, sur l'intégration des innovations dans le domaine des composants électriques et des matériaux diélectriques mais la standardisation de sous-ensembles réutilisables nous conduit à reconsidérer les assemblages structuraux des coffres de traction.

Etudier les assemblages structuraux des coffres est une démarche novatrice qui permettra d'identifier des solutions performantes pour la conception et la réalisation des systèmes de

traction, et de répondre ainsi à des exigences de plus en plus fortes du marché ferroviaire en termes de réduction de coûts et de masse.

Les enjeux industriels de cette étude sont alors de deux ordres :

- Economique : Optimisation où il est possible d'imaginer une réduction de 50 % des liaisons vissées soit un gain de 20% sur le coût global d'assemblage/câblage du coffre.
- Technique : Amélioration des modèles prédictifs afin d'aboutir à un « bon du premier coup » au niveau des tests de vibrations et de chocs. Il s'agit aussi de mieux anticiper le vieillissement de ces liaisons structurales qui vont être généralisées sur tous les coffres de traction standards.

La maîtrise des assemblages structuraux dans une application industrielle s'avère alors être un des facteurs les plus importants pour réaliser un produit qui peut répondre aux différentes exigences économiques et techniques. Le choix du mode d'assemblage le mieux adapté à l'application reste l'élément clé pour avoir une structure robuste qui satisfasse au cahier des charges du produit.

Dans l'application ferroviaire sur laquelle ce travail a été réalisé, le mode d'assemblage de la structure métallique doit assurer à la fois la tenue vis à vis des contraintes mécaniques (vibration et chocs) et des contraintes environnementales (humidité, température, etc.).

Les différents modes d'assemblage pour la réalisation de telles structures sont entre autres, le soudage, l'assemblage par élément de fixation et le collage. Chacun de ces modes d'assemblage présente ses avantages et ses inconvénients, l'un de nos buts sera la prédiction du mode d'assemblage le mieux adapté à la structure du coffre de traction.

La problématique principale dans la conception du coffre de traction est la réduction du coût des assemblages actuels, soit par la diminution de leur nombre, soit par leur optimisation, soit par leur substitution, tout en préservant une rigidité satisfaisante face à des sollicitations mécaniques et environnementales. Afin de remplir ces objectifs, le travail de recherche a été divisé en 2 grandes étapes :

La première étape, concerne la connaissance des différents modes d'assemblages utilisés actuellement par ALSTOM Transport (boulonnage, rivetage, vissage/collage). L'objectif est ainsi de connaître la tenue mécanique de ces assemblages et leur impact économique sur la réalisation de la structure.

La deuxième étape concerne le collage structural en vue de construire un prototype à l'échelle du coffre de traction et d'effectuer les tests nécessaires selon les normes en vigueur dans le transport ferroviaire (tests de vibrations et de chocs).

Pour accomplir ces deux étapes, ce mémoire va être réalisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre concerne l'état de l'art et la recherche bibliographique sur les modes d'assemblage qui seront étudiés dans notre travail et notamment l'assemblage ponctuel par des éléments de fixation (vis, boulon, rivet) et l'assemblage par collage structural. Dans ce chapitre, nous présenterons les méthodes de dimensionnement pour des assemblages par éléments de fixation et par collage structural ainsi que les études qui ont déjà été réalisées dans le domaine des assemblages structuraux.

Le second chapitre s'attache à détailler les études réalisées sur les assemblages ponctuels (vissage, rivetage). La première partie de ce chapitre décrit l'expertise du matériau utilisé dans la construction du coffre et les travaux expérimentaux réalisés pour identifier la loi de comportement de ce matériau. La deuxième partie concerne les études sur des joints assemblés par un seul élément de fixation, à travers des essais en statique et dynamique, et sollicités en cisaillement et en traction par rapport à cet élément de fixation. Ces essais ont pour but de déterminer les comportements mécaniques élastiques et plastiques des joints pour créer une référence sur la tenue mécanique par rapport à la technologie d'assemblage utilisée actuellement. Les essais en statique seront validés par des modèles numériques 3D non linéaires réalisés sur le logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS.

Le troisième chapitre traite de la partie assemblage par collage structural, où dans un premier temps nous présenterons la démarche pour sélectionner l'adhésif structural qui répond au mieux au cahier des charges de notre structure. Les résultats des différents essais réalisés sur des éprouvettes massiques de l'adhésif utilisé seront présentés et permettront d'identifier les caractéristiques mécaniques dans le domaine linéaire (module d'Young et coefficient de Poisson) et en non linéaire (loi de comportement). Ces caractéristiques sont nécessaires pour nous permettre de créer des modèles numériques sur des joints collés. La deuxième partie de ce chapitre concerne l'étude effectuée sur des joints collés en utilisant l'adhésif sélectionné. Une même campagne d'essais que celle présentée dans le deuxième chapitre a été réalisée.

Le quatrième chapitre s'inscrit comme une suite logique aux différentes études réalisées dans notre travail en intégrant dans la connaissance du comportement mécanique des joints collés en statique et en dynamique la prise en compte de l'effet du vieillissement hygrothermique. L'objectif de ces travaux est de surveiller la dégradation du comportement

mécanique à la rupture des joints en fonction du temps de vieillissement accéléré afin de prédire si l'adhésif structural utilisé peut assurer sa fonctionnalité pour la durée de vie du coffre de traction.

Chapitre I : Techniques d'assemblages et caractérisations

I-1 Introduction

Les structures ou charpentes métalliques industrielles sont en général obtenues par assemblage de divers éléments. La phase d'assemblage doit donc être intégrée dans la démarche de conception du produit. Elle peut être envisagée selon différentes techniques. La plupart des concepteurs connaissent les différentes techniques concurrentielles comme le soudage, le collage, le rivetage, le vissage, le boulonnage, le sertissage / l'agrafage, l'emmanchement forcé, à chaud ou à froid, etc. (Tableau I-1) [HAM01].

	Classique	Nouvelle
Liaison temporaire	Vissage	Sertissage
Liaison partiellement temporaire	Pliage	Rivetage
Liaison permanente	Soudage avec gaz inerte Collage	Soudage par points Soudage laser clinchage

Tableau I-1: Les différentes techniques d'assemblage.

De nouvelles techniques d'assemblage par soudage ont émergé lors de l'apparition de nouveaux matériaux, non aisément soudables; dont on ne désire pas endommager les caractéristiques spécifiques telles les états de surface ou les propriétés isolantes thermiques ou phoniques par exemple.

Dans le tableau I-1 ci-dessus, les techniques d'assemblage sont recensées selon le critère de la démontabilité de la liaison. Nous pouvons aussi classer ces technologies d'assemblage en regardant si la liaison est ponctuelle (boulonnage, rivetage, clinchage) ou continue (soudage et collage). Dans la conception de ses coffres de traction, notre partenaire ALSTOM Transport utilise des techniques d'assemblage ponctuel (vissage et rivetage). L'objectif de cette thèse est d'optimiser dans un premier temps ces techniques et de proposer dans un second temps des procédés alternatifs (assemblage par collage) en vue de réduire le coût de production des coffres de traction.

I-2 Historique sur les assemblages ferroviaires

Traditionnellement, les structures ferroviaires et notamment les coffres de traction sont essentiellement assemblés par soudage [CEB02]. Ces structures sont aujourd'hui principalement composées d'alliages d'aluminium (sauf pour les organes de traction et de choc). L'avantage est

un gain de masse conséquent par rapport à l'acier, mais la limite élastique demeure cependant beaucoup plus faible. Le soudage accentue cet inconvénient en diminuant de moitié la limite élastique du matériau dans la zone affectée thermiquement, ce qui engendre des problèmes de tenue mécanique de la structure là où se situent les concentrations de contrainte. Face à ce problème mais aussi à la nécessité constante de réduire les coûts de fabrication, les constructeurs utilisent de plus en plus le procédé d'assemblage par élément de fixation comme le boulon et le rivet, qui permet également de rendre les structures plus modulaires. En effet, ce procédé offre la possibilité de modifier sensiblement la gamme de fabrication en concevant et en fabriquant des sous ensembles entièrement équipés ; l'assemblage étant effectué seulement en phase finale.

Par ailleurs, afin d'améliorer la sécurité dans les transports guidés, les constructeurs ferroviaires intègrent dans les phases de conception des critères de dimensionnement à la collision, critères qui varient selon les cahiers des charges des matériels concernés. Il apparaît dès lors nécessaire de mieux connaître le comportement des assemblages sous ce type de sollicitation. En effet, au cours de leur vie en service, les éléments doivent supporter des sollicitations statiques et cycliques consécutives au poids propre de la structure et au chargement des passagers. Ils doivent également supporter les sollicitations à faible énergie, provoquées par les accostages, et surtout à haute énergie lors d'une collision. La rationalisation du nombre, de la dimension et de la répartition géométrique des éléments de fixation est donc un objectif prioritaire pour optimiser le dimensionnement des structures assemblées et conserver ainsi l'intérêt de ces procédés d'assemblages.

ALSTOM Transport, site de Tarbes fabrique essentiellement les éléments de la chaîne de traction pour des applications ferroviaires (Figure I-1). Ces éléments sont en fait de grands coffres dans lesquels on vient fixer des modules. Le coffre doit supporter les modules et en regard de ses dimensions, il possède un important et complexe réseau de raidisseurs.

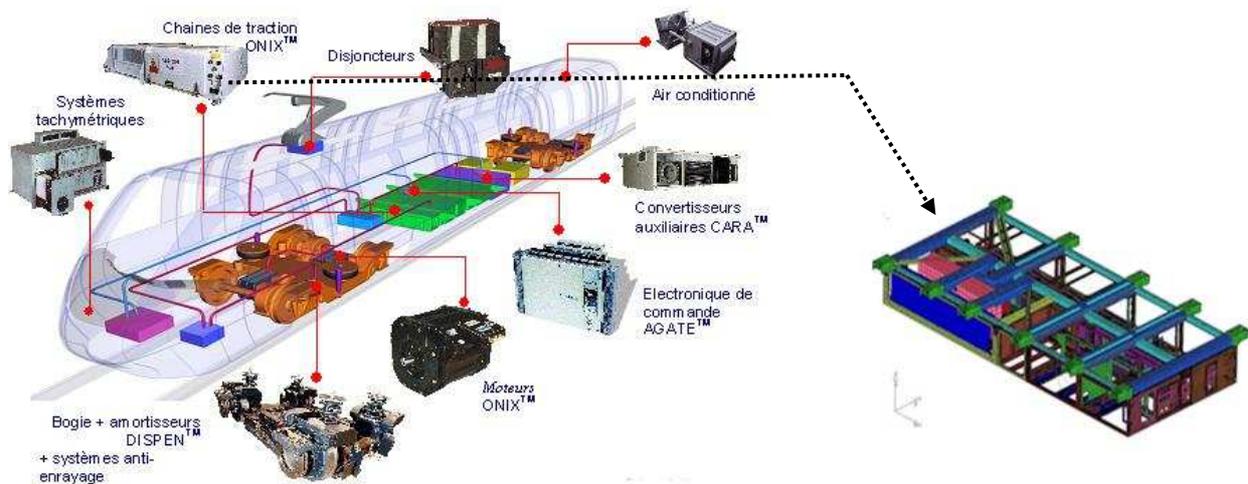


Figure I-1: (à gauche) : Les différents composants du système de traction ; (à droite) : Coffre de traction d'un AGV (Automotrice Grande Vitesse).

I-3 Les technologies d'assemblages utilisées par ALSTOM Transport

Actuellement l'assemblage du coffre de traction chez ALSTOM Transport est assuré par des éléments de fixation mécanique. Ces éléments sont principalement des boulons (vis + écrou frein), et des rivets à sertir avec des bagues. Ces deux types d'assemblages ont remplacé l'assemblage par soudage depuis dix ans au sein des ateliers d'ALSTOM Transport.

I-4 Assemblage ponctuel par éléments de fixation mécanique

La technique d'assemblage par éléments de fixation est la technique la plus ancienne utilisée par l'homme. Les clous les plus anciens ont été retrouvés en Mésopotamie au Moyen Orient ; ils servaient à fixer des feuilles de cuivre sur une statue datant de 3500 ans avant J.C.

Les procédés mécaniques de l'assemblage ponctuel sont ceux qui utilisent des éléments de fixation cylindriques, disposés dans des trous pratiqués dans les pièces à assembler. Il s'agit donc des différentes catégories de boulons, rivets, clous, etc. Ces éléments d'assemblage assurent la transmission des efforts entre les pièces assemblées dans une structure mécanique :

- soit par butée ;
- soit par mobilisation du frottement entre les pièces assemblées ;
- soit par la mise en traction des éléments de fixation ;
- soit par combinaison de ces sollicitations.

Dans tous les cas, la vérification de la résistance de l'assemblage réalisé par un procédé mécanique nécessite la vérification conjointe de la résistance des éléments de fixation et celle des pièces assemblées.

L'avantage prépondérant des assemblages ponctuels avec des vis et écrous classiques est leur faculté à pouvoir être montés et démontés à de nombreuses reprises durant le cycle de vie du produit. Afin de garantir le non-desserrage de ces assemblages dans ces conditions, diverses solutions peuvent être apportées par l'utilisation d'écrous freinés, de vis enduites de colle ou diverses technologies de rondelles.

I-4-1 Types d'éléments de fixation et domaines d'application

Nous pouvons aujourd'hui recenser une grande quantité d'éléments de fixation de différents types. Le choix d'un constructeur pour un type donné est orienté par plusieurs paramètres, tels que les sollicitations auxquelles doivent être soumises les structures à assembler (statiques, dynamiques rapides, vibratoires), les matériaux (aluminium, acier, composite...), les contraintes d'accessibilité aux éléments de fixation, mais aussi la facilité et la rapidité d'installation. La liste non exhaustive suivante présente quelques exemples d'éléments et leurs domaines d'application respectifs (Tableau I-2).

Les deux éléments concernés par notre étude sont la vis autorouleuse ou autoformeuse et le rivet Magna-grip[®]. Ces deux techniques d'assemblage sont utilisées actuellement dans les ateliers de l'entreprise ALSTOM Transport, à Tarbes pour assembler les différents modules des coffres de traction. Elles seront détaillées dans le chapitre II.

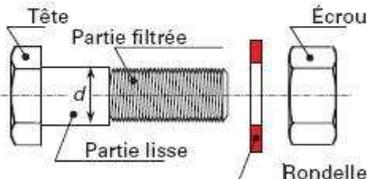
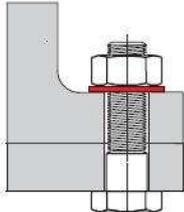
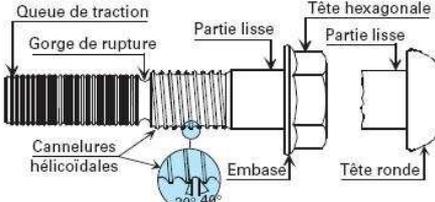
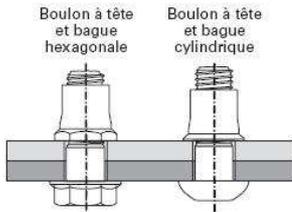
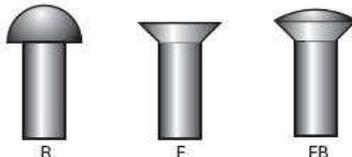
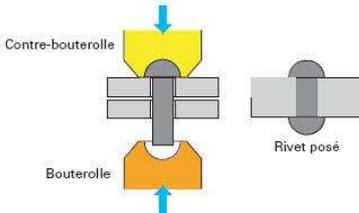
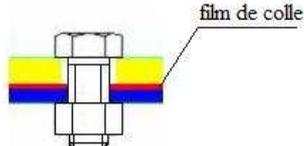
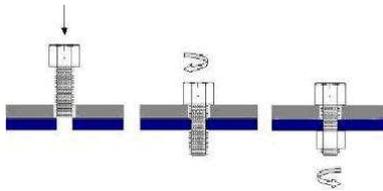
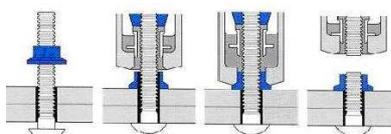
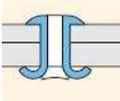
Types d'éléments	Pose	Domaines d'application
<p style="text-align: center;">Boulon</p> 		<p style="text-align: center;">Ponts, constructions métalliques...</p>
<p style="text-align: center;">Boulon serti</p> 		<p style="text-align: center;">Automobile...</p>
<p style="text-align: center;">Rivet à chaud</p> 		<p style="text-align: center;">Automobile, aéronautique...</p>
<p style="text-align: center;">Vis autorouleuse</p> 		<p style="text-align: center;">Automobile, ferroviaire...</p>
<p style="text-align: center;">Rivet Magna-grip®</p> 		<p style="text-align: center;">Véhicule industriel, ferroviaire</p>
<p style="text-align: center;">Rivet peel™</p> 		<p style="text-align: center;">Automobile...</p>

Tableau I-2: Eléments de fixation et domaines d'application

I-4-2 Études réalisées dans le domaine des assemblages mécaniques

Différentes études ont été effectuées sur les assemblages par éléments de fixation (boulons, rivets). Cependant, celles-ci concernent plus particulièrement le domaine aéronautique, les principales différences avec le domaine ferroviaire étant les dimensions des éléments utilisés, leur matière, leur type, ou encore leur processus de mise en place. Ces études ont été concentrées principalement sur le rôle de l'élément de fixation dans une structure, où il assure techniquement l'assemblage de deux ou plusieurs pièces et mécaniquement le transfert de charge entre ces pièces.

I-4-2.1 Transfert de charge

La transmission d'efforts entre deux plaques liées par un élément de fixation est un problème qui peut paraître simple, mais une étude approfondie met en exergue la complexité du phénomène. Il est très important d'identifier le rôle sous chargement de chacun des composants de l'assemblage. Ainsi on considèrera qu'une des plaques est la partie émettrice de l'effort, et que l'autre est la partie réceptrice. L'élément de fixation (vis, boulon ou rivet) assure le transfert de charge entre les plaques.

La conception des assemblages par des éléments de fixation est basée sur la capacité de pouvoir transmettre la charge d'un coté à l'autre (Figure I-2) sans générer une détérioration des pièces assemblées ou des éléments de fixation utilisés. Le paramètre qui aide à déterminer cette capacité est la flexibilité des points d'assemblages.

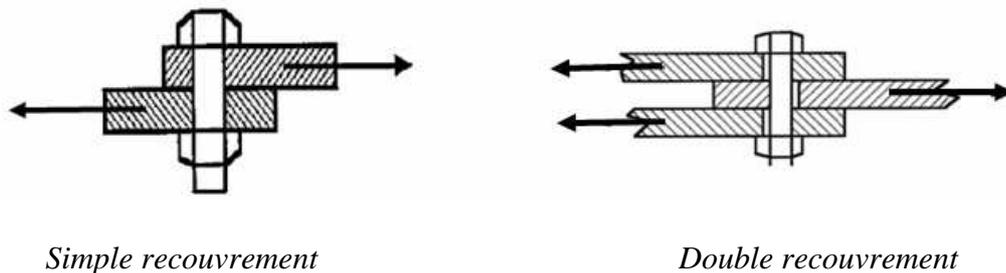


Figure I- 2: Joint assemblé par élément de fixation.

La flexibilité est un des paramètres les plus importants dans le dimensionnement des assemblages ponctuels, puisque la durée de vie de l'assemblage est directement liée à la répartition des contraintes autour du trou de la fixation. De nombreuses études ont alors été réalisées pour déterminer la valeur de ce paramètre de manière précise [KOF99].

Sur la figure I-3 ; nous avons un joint en simple recouvrement qui est sollicité par un effort F et qui génère un déplacement δ du boulon. La mesure de la déflexion de la fixation permet de déterminer sa flexibilité. Dans le cas présent sur la figure I-3 le paramètre K mesuré est la rigidité de la liaison soit l'inverse de la flexibilité.

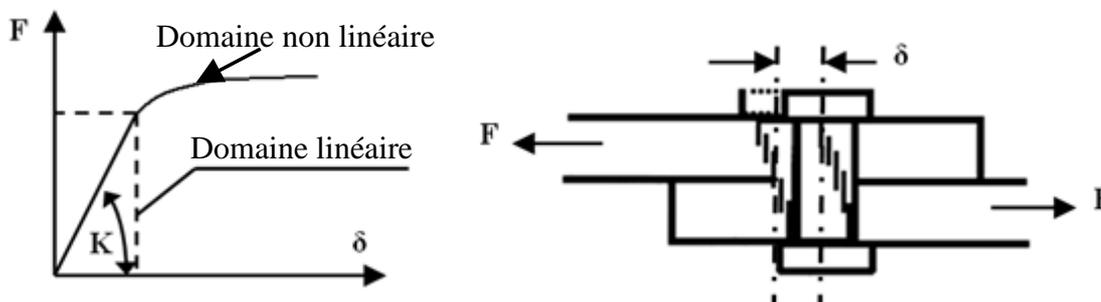


Figure I-3 : Courbe de comportement d'une fixation dans le domaine élastique.

La flexibilité d'une fixation est définie par :

$$C_f = \frac{\delta}{F} \quad (I-1)$$

Avec δ l'allongement de la fixation et F l'effort appliqué.

La rigidité est l'inverse de la flexibilité :

$$K = \frac{1}{C_f} \quad (I-2)$$

H.Huth [HUT86], a travaillé sur l'influence de la flexibilité sur la durée de vie d'un assemblage. La figure I-4 donne l'illustration de la définition de la flexibilité d'une fixation en fonction du nombre d'éléments de fixation mis en jeu.

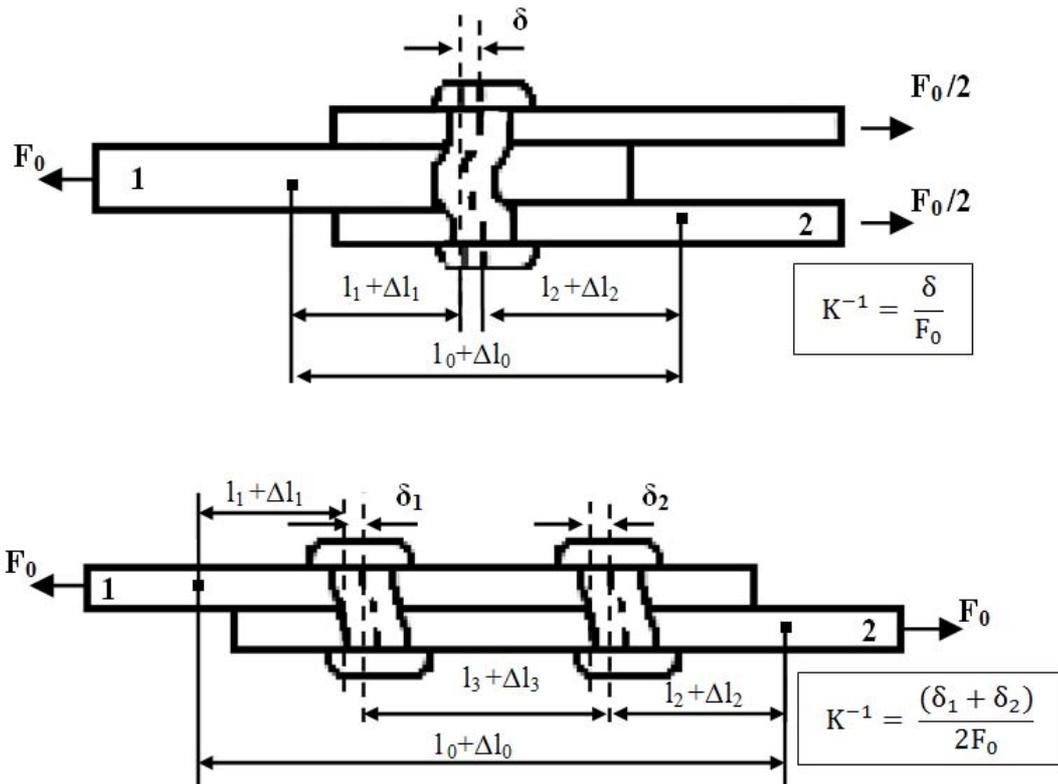


Figure I-4 : Flexibilité d'une fixation.

La notion de rigidité n'est valide que tant que le comportement de l'assemblage demeure linéaire. Ce terme ne s'applique qu'aux assemblages de deux plaques en simple cisaillement ou de trois plaques en double cisaillement.

I-4-2.2 Investigations sur la flexibilité des fixations

Les premiers travaux sur la flexibilité des assemblages ont été réalisés par Vogt [VOG44]. Vogt a essayé de déterminer la rigidité de la fixation dans un assemblage symétrique avec un seul boulon. Deux auteurs de la NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), M.B. Tate et S.J. Rosenfeld [TAT46] après une longue étude expérimentale parallèle à celle de Vogt proposent en 1946 dans le cas d'un assemblage en simple cisaillement l'expression ci-dessous (Figure I-5) :

$$C = \frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} + \frac{1}{t_1 \cdot E_f} + \frac{1}{t_2 \cdot E_f} + \frac{32 \cdot (t_1 + t_2)(1 + \nu)}{9 \cdot E_f \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{8 \cdot (t_1^3 + 5t_2^2 \cdot t_1 + 5t_1^2 \cdot t_2 + t_2^3)}{5 E_f \cdot \pi \cdot d^4} \quad (I-3)$$

Dans la même optique, Gore propose la formule suivante pour le calcul de la flexibilité des fixations en simple cisaillement [GOR90] :

$$C = \frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} + \frac{t_1 + t_2}{t_1 \cdot t_2 E_f} + \frac{4 \cdot (t_1 + t_2)}{5 \cdot G_f \cdot A_f} + \frac{(t_1^3 + 5t_2^2 \cdot t_1 + 5t_1^2 \cdot t_2 + t_2^3)}{40 \cdot E_f \cdot I_f} \quad (\text{I-4})$$

Avec :

- t_1, t_2 : épaisseur respective des plaques 1 et 2
- E_1, E_2 : module de Young des plaques 1 et 2
- E_f : module de Young des boulons
- d : diamètre des boulons
- G_f : module de cisaillement des boulons
- A_f : section des boulons
- I_f : moment quadratique des boulons

Ces formulations sont développées à partir des hypothèses suivantes:

- les matériaux de l'assemblage sont sollicités dans le domaine élastique ;
- la flexion des substrats est négligée ;
- le frottement entre les éléments de l'assemblage est négligé ;
- le jeu est nul ;
- la relation entre la charge appliquée et la charge transférée par les fixations est linéaire.

D'autres auteurs du domaine aéronautique proposent des formules semi-empiriques pour le calcul de la flexibilité des fixations. Le constructeur aéronautique américain BOEING [BOE00] propose à partir de travaux expérimentaux dans le cas d'un assemblage en simple cisaillement, l'expression suivante de la flexibilité :

$$C = \frac{2\left(\frac{t_1}{d}\right)^{0,85}}{t_1} \left(\frac{1}{E_f} + \frac{3}{8E_f} \right) + \frac{2\left(\frac{t_2}{d}\right)^{0,85}}{t_2} \left(\frac{1}{E_2} + \frac{3}{8E_f} \right) \quad (\text{I-5})$$

Devant ces formulations très différentes les unes des autres et ayant des domaines d'application variés, Heimo Huth [HUT86] lança une grande campagne d'essais pour la détermination de la flexibilité des fixations. Il fait la différence entre deux groupes de paramètres qui influencent le comportement de l'assemblage. Ces deux groupes sont :

- Les paramètres principaux liés à la géométrie et aux matériaux

- Module de Young des plaques
- Modules de Young des fixations
- Epaisseur des plaques
- Diamètres des fixations
- Configuration simple ou double recouvrement

➤ Les paramètres secondaires liés à l'installation

- couple de serrage
- ajustement des fixations dans les trous (avec ou sans jeu)
- types de fixations utilisées, rivet ou boulon (tête plate, fraisée,.....)
- état de surface des pièces assemblées

L'auteur propose, après la synthèse des essais effectués, une formule de la flexibilité qui prend en compte la plupart des cas couramment rencontrés. Cette formule, contrairement aux précédentes, fait état du simple et du double cisaillement. Des coefficients donnés par l'auteur permettent de l'utiliser pour différents types de technologie.

$$C = \left(\frac{t_1 + t_2}{2 \cdot d} \right)^a \cdot \frac{b}{n} \cdot \left[\frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} + \frac{1}{2t_1 \cdot E_f} + \frac{1}{2n \cdot t_2 \cdot E_f} \right] \quad ((I-6))$$

Le coefficient n permet de faire la différence entre le simple et le double cisaillement :

n=1 : simple cisaillement, n=2 : double cisaillement

Les coefficients a et b dépendent du matériau et de la technologie d'assemblage utilisée :

- assemblage métallique boulonné : a = 0,66 ; b = 3
- assemblage métallique riveté : a = 0,4 ; b = 2,2
- assemblage carbone/époxy boulonné : a = 0,66 ; b = 4,2

L'équation (I-6) donne des valeurs plus proches des mesures de la flexibilité tant en simple qu'en double cisaillement.

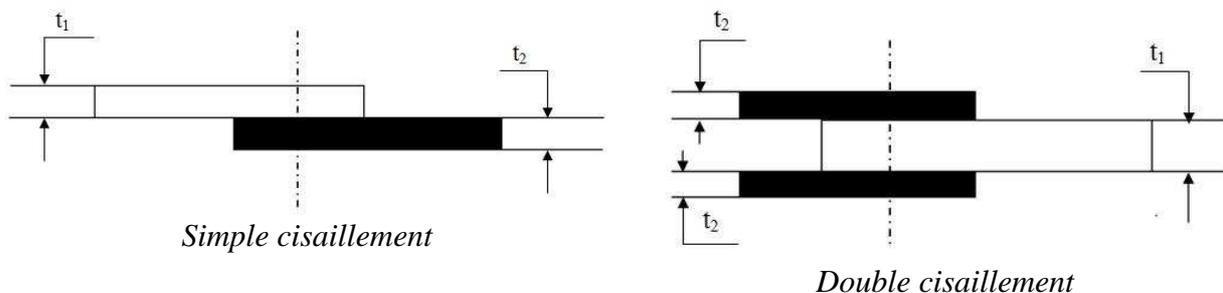


Figure I-5 : Signification des épaisseurs utilisées dans les formules.

I-4-3.3 Synthèse

Les études présentées précédemment montrent la difficulté d'accéder à une valeur de référence de la rigidité des fixations dans un assemblage en simple ou double cisaillement, vu le nombre de formulations différentes, qui reposent le plus souvent, soit entièrement, soit en partie, sur des résultats expérimentaux.

Il est cependant possible de déceler des analogies entre ces différentes formulations et d'en distinguer deux groupes :

- Le premier groupe contient les formulations de Tate et Rosenfeld et de Gore. Elles sont construites sur la somme de trois termes (exprimés en déplacement par exemple) qui correspondent à trois phénomènes différents :
 - le déplacement dû au cisaillement de la fixation;
 - le déplacement dû à la flexion de la fixation;
 - le déplacement dû au matage.
- Le second groupe contient les formulations de Huth et de Boeing. Elles sont construites à partir de la contrainte de matage (contrairement au déplacement le diamètre de la fixation intervient explicitement).

Toutes ces formulations sont dépendantes explicitement des matériaux constitutifs des fixations et des substrats.

I-4-3 Méthodes pour calculer le transfert de charge des assemblages en multi-fixation

Pour un assemblage boulonné à plusieurs lignes de fixations, des méthodes présentées par la suite ont été développées, afin de calculer la distribution des transferts de charge entre les différentes lignes de fixations. La figure I-6 présente le comportement d'un tel assemblage en simple recouvrement ; elle met en évidence la flexion des plaques due au chargement excentrique de l'assemblage.

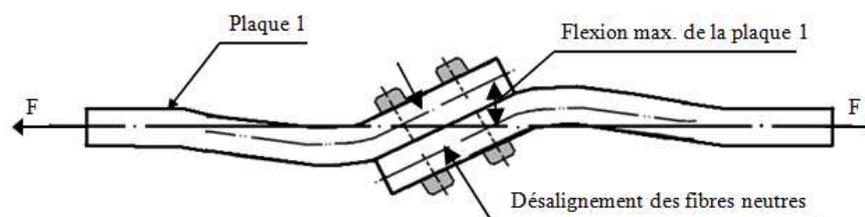


Figure I-6 : Flexion d'un assemblage boulonné en simple cisaillement.

I-4-3.1 Définition

L'effort appliqué à l'assemblage n'est pas équitablement réparti sur toutes les fixations. Ce sont elles qui permettent de transférer la charge d'une tôle à une autre. La figure I-7 illustre le mécanisme du transfert d'effort au niveau de la dernière ligne de fixation dans un assemblage en simple cisaillement.

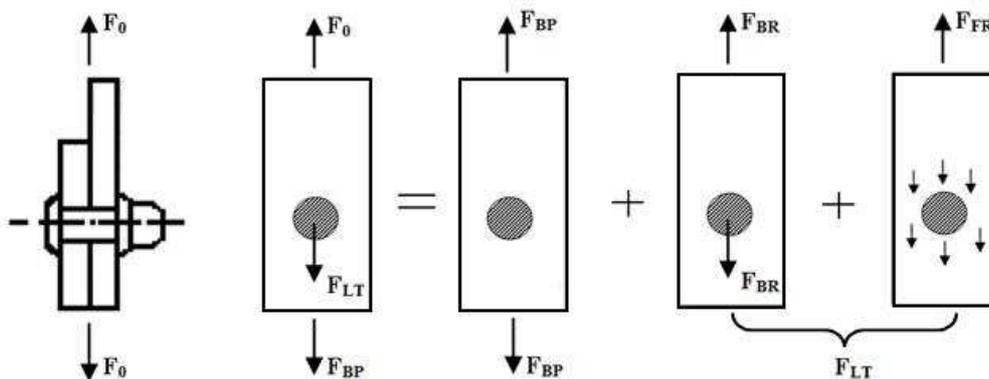


Figure I-7 : Transfert de charge (d'après [HUT86]).

[F_0 : Effort total, F_{BP} : Effort passant, effort de traction dans la tôle, F_{BR} : Effort de matage, F_{FR} : Effort de friction, F_{LT} : Effort transféré]

L'effort de matage et l'effort de friction représentent donc l'effort transféré par la fixation. Nous définissons alors le taux de transfert d'effort au niveau de la fixation en faisant le rapport entre l'effort transféré et l'effort total. Il faut noter que l'effort de friction n'est pas souhaitable puisqu'il peut être à l'origine d'endommagement au niveau du plan de joint ; c'est pourquoi, les constructeurs aéronautiques en particulier, ajoutent une couche de mastic entre les deux tôles. Par ailleurs, il apparaît que le transfert de charge dans un assemblage boulonné se fait de manière discrète, et que l'effort passant dans les plaques est une fonction discontinue en escalier. Nous nous intéressons donc aux méthodes de détermination du taux de transfert.

I-4-3.2 Approche par récurrence

Tate et Rosenfeld [TAT46], développent une approche par récurrence de la détermination du transfert de charge. Ils partent d'une jonction symétrique en double cisaillement, dans le domaine élastique, sans flexion secondaire, sans friction à l'interface. En notant R_i la charge transférée par la fixation i , ils obtiennent, dans le cas d'une jonction à paramètres constants la relation suivante :

$$R_{i+1} = R_i - \frac{2K_p}{C_f} F + \frac{(2K_p + K_s)}{C_f} \sum_{j=0}^i R_j \quad (I-7)$$

Où K_p est la souplesse de la plaque principale ou intermédiaire, et K_s la souplesse des plaques supérieures et inférieures, entre deux boulons. Les auteurs proposent deux méthodes de résolution : méthodes par différences finies et par analogie au collage.

Dans la méthode par différences finies, les auteurs obtiennent l'équation de récurrence suivante :

$$R_{i+1} - (2 + \varphi)R_i + R_{i-1} = 0 \quad (I-8)$$

En notant :

$$\varphi = \frac{2K_p + K_s}{C_f}$$

La solution de l'équation s'écrit :

$$R_i = a \exp(\lambda i) + b \exp(-\lambda i) \quad (I-9)$$

Avec:

$$\lambda = \cosh^{-1}(1 + 0.5\varphi) \quad (I-10)$$

$$a = -\frac{\varphi + (e^{-n\lambda} - 1) \frac{2K_p}{C_f}}{(e^{n\lambda} - e^{-n\lambda})(e^{-\lambda} - 1)} f \quad (I-11)$$

$$b = -\frac{\varphi + (e^{n\lambda} - 1) \frac{2K_p}{C_f}}{(e^{n\lambda} - e^{-n\lambda})(e^{\lambda} - 1)} f \quad (I-12)$$

n est le nombre de fixations.

I-4-3.3 Approche par analogie électrique

Le calcul du transfert de charge d'un assemblage sans colle peut être résolu par analogie à un réseau maillé électrique. Ross [ROS47] développe une analogie électrique qui permet, en particulier pour une jonction en double cisaillement, et à partir de la formule de Tate et Rosenfeld pour le calcul des raideurs de fixation, de trouver les charges transférées dans chaque

partie de la jonction. La modélisation de l'assemblage en simple cisaillement considère ici encore un seul degré de liberté (Figure I-8).

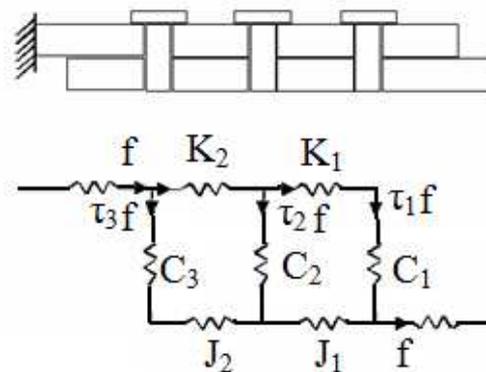


Figure I-8 : Assemblage en simple cisaillement et son analogue électrique.

K_i et J_i sont les souplesses des plaques de l'assemblage et les C_i sont les souplesses des fixations. Pour un assemblage avec n boulons, le système linéaire s'écrit sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} C_1 + J_1 + K_1 & -C_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ K_2 + J_2 & C_2 + J_2 + K_2 & -C_3 & \dots & 0 & 0 \\ K_3 + J_3 & K_3 + J_3 & C_3 + J_3 + K_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n-1} + J_{n-1} & K_{n-1} + J_{n-1} & K_{n-1} + J_{n-1} & \dots & C_{n-1} + J_{n-1} + K_{n-1} & -C_n \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \dots \\ \tau_{n-1} \\ \tau_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ \dots \\ J_{n-1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I-13})$$

I-4-4 Rupture

Le calcul du taux de transfert des fixations permet donc de connaître l'effort appliqué à celles-ci et de le comparer à l'effort à rupture à ne pas dépasser. On distingue plusieurs modes de rupture qui seront décrits ci-dessous.

I-4-4.1 Modes de rupture

Il existe plusieurs modes d'endommagement et de rupture des assemblages ponctuels présentés sur la figure I-9 (a,b,c,d). La rupture en section nette(a) se traduit par une rupture de la tôle au niveau de la fixation, perpendiculairement à la direction de chargement. La rupture s'initie en bord du trou ; la section active diminue, jusqu'à la rupture. La rupture due au matage (b) se traduit plutôt par une rupture par cisaillement des tôles (c) (shear-out failure) ou par une

rupture par clivage et cisaillement combiné (cleavage-tension failure). La rupture peut enfin se produire au niveau de l'élément de fixation par cisaillement au plan de joint, ou par flexion sous la tête de la fixation (d). D'autres modes de ruines existent comme le passage de la tête fraisée au travers des trous des tôles, ou le flambage des tôles devant la fixation.

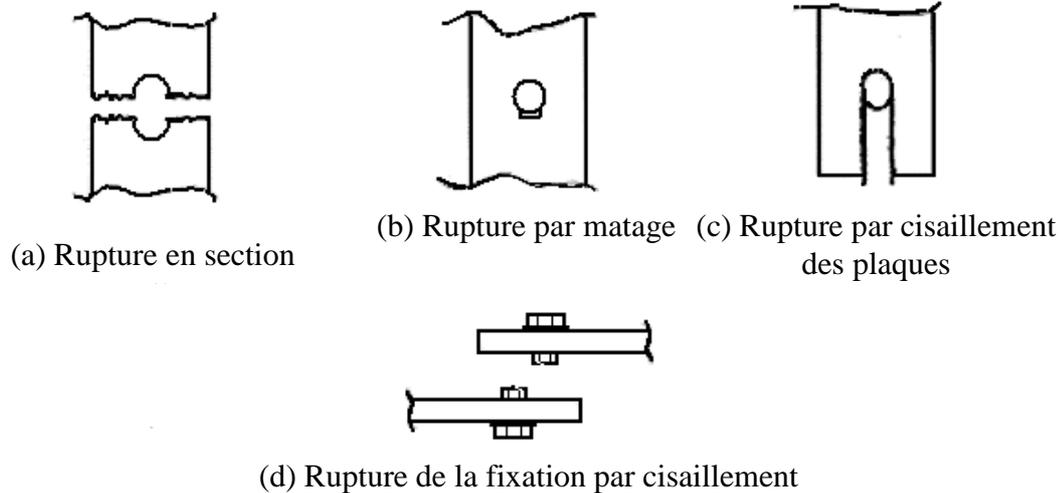


Figure I-9: Quelques modes de rupture d'un assemblage boulonné.

La charge maximale P_u que peut supporter l'assemblage dans le cas d'un matage est donnée par :

$$P_u = F_{bru} \cdot t \cdot d \quad (I-14)$$

Où F_{bru} est la contrainte de matage maximale, t est l'épaisseur de la plaque, d est le diamètre de l'élément de fixation.

En ce qui concerne le cisaillement, la charge maximale que peut supporter la fixation est approchée par la formule suivante :

$$\frac{P_u}{d^2} = F_{su} \cdot \frac{\pi}{4} \quad (I-15)$$

où F_{su} est la contrainte de cisaillement

Le passage d'un mode d'endommagement à un autre apparaît de façon assez nette sur La représentation graphique des charges admissibles (Figure I-10).

Dans la zone de transition, nous pouvons retrouver des modes d'endommagement ou de rupture difficilement prévisibles : la rupture due à la flexion de la plaque sous la tête de l'élément de fixation, ou la rupture due au passage de la tête fraisée au travers du trou. Ce sont des modes

très dangereux dont on connaît mal les mécanismes. Cependant, cette zone est limitée et bornée par deux zones, pour lesquelles les modes de rupture sont préférables et les mécanismes mieux connus. Il faut néanmoins noter que, dans la pratique, pour le mode de rupture en matage, la contrainte de matage admissible est réduite, afin d'éviter une rupture en zone de transition, ce qui montre que les mécanismes de la rupture par matage ne sont pas encore totalement maîtrisés.

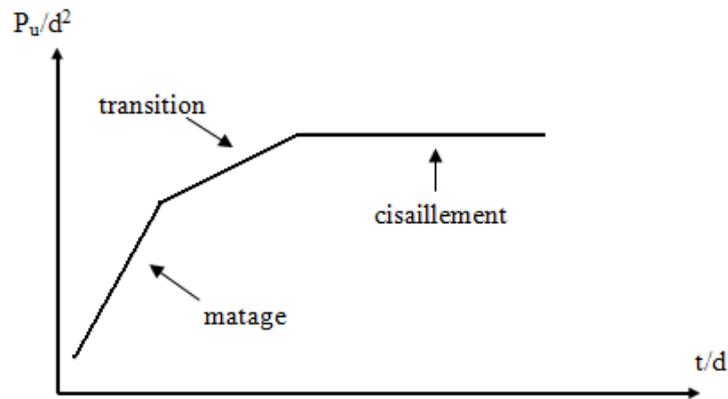


Figure I-10: Diagrammes des charges maximales admissibles selon les modes de rupture en simple cisaillement ([CHI03]).

I-4-4.2 Concentration de contraintes

La concentration de contrainte en bord de trou est la cause principale de l'apparition de fissures dans les assemblages ponctuels. La rupture survient toujours par propagation de fissures dans les pièces assemblées ; fissures s'initiant dans les zones les plus sollicitées [HUE95] [KOF99]. La durée de vie de l'assemblage est directement liée au coefficient de concentration de contrainte K_t . Ce coefficient est défini comme le rapport de la contrainte maximale en bord de trou sur la contrainte appliquée à l'infini.

Barrois [BAR65] et [BAR73], donne des expressions pour le calcul du coefficient de surcontrainte, en fonction du rapport λ_k du diamètre de la fixation d avec b la largeur de l'assemblage :

$$K_t = \frac{1 + \lambda_k^2}{\lambda_k (1 - \lambda_k)} \quad (\text{I-16})$$

avec :

$$\lambda_k = \frac{d}{b} \quad (\text{I-17})$$

Il donne aussi les coefficients de contrainte dus au matage K_b et à la traction de la tôle en section nette K_{net} (dû à l'effort passant) :

$$K_b = \frac{1 + \lambda_k^2}{(1 - \lambda_k)} \quad (I-18)$$

$$K_{net} = \lambda_k + \frac{1}{\lambda_k} \quad (I-19)$$

Nous pouvons noter que ces trois coefficients sont liés par :

$$K_b = \lambda_k K_t = \frac{\lambda_k}{1 - \lambda_k} K_{net} \quad (I-20)$$

Cette formulation est modifiée par Niu [NIU93] qui introduit des paramètres technologiques liés à la fabrication et à la réalisation de l'assemblage. Il part du fait que la contrainte en bord de trou est la somme de la contrainte de traction de la tôle en bord de trou vide et de la contrainte de matage. Il aboutit à l'expression suivante :

$$K_t = \alpha \beta \left(K_b \frac{\theta \cdot \tau}{\lambda_k} + K_{net} (1 - \tau) \right) \quad (I-21)$$

Dans cette expression :

- les coefficients α et β sont des paramètres empiriques issus d'essais de fatigue ; α dépend de l'état de surface du trou et β est fonction du type de fixation ;
- τ est le taux de transfert ;
- θ est le coefficient de distribution de matage qui permet de distinguer le simple et le double cisaillement (prise en compte du gradient dans l'épaisseur) et est donné par des abaques ;
- K_b est le coefficient de contrainte dû au matage, qui est donné par des abaques ;
- K_{net} est le coefficient de contrainte dû à la traction de la tôle, qui est donné par des abaques.

I-4-5 Essais mécaniques sur des joints boulonnés ou rivetés

I-4-5.1 Sollicitation en cisaillement

L'identification du comportement du point de fixation à la rupture nécessite d'effectuer des essais en cisaillement. Notre étude se limitera à l'analyse de la fixation simple recouvrement

sollicitée en simple cisaillement car il s'avère qu'elle est majoritairement présente dans les coffres de traction élaborés par notre partenaire industriel et qu'elle représente, de plus, la configuration la plus fragile. La difficulté dans l'analyse de cette sollicitation réside dans le fait que le simple cisaillement de la liaison ne génère pas forcément un cisaillement pur dans l'élément de fixation. Une flexion secondaire et des déformations plastiques peuvent apparaître dans les plaques (Figure I-11).

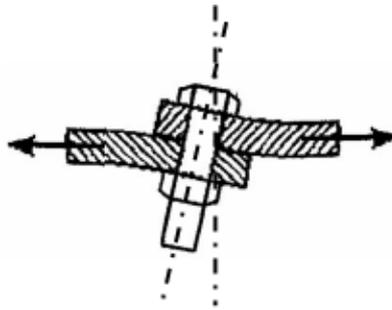


Figure I-11 : Flexion secondaire dans la fixation en simple recouvrement d'après [MIN05].

J. Minguez et J. Vogwell [MIN05], ont étudié le comportement global de la fixation en simple recouvrement sous chargement en cisaillement et montrent que la courbe effort-déplacement se divise en plusieurs phases (Figure I-12) :

- Phase (1) : transfert de la charge par le frottement.
- Phase (2) : glissement d'une plaque par rapport à l'autre.
- Phase (3) : transfert élastique de la charge par contact entre l'élément de fixation et l'alésage (phase de matage).
- Phase (4) : écoulement plastique, l'élément de fixation tend à tourner et la flexion de la plaque sous la tête devient prépondérante.
- Phase (5) : rupture.

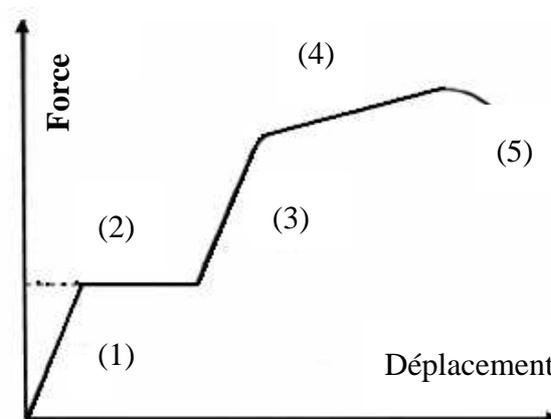


Figure I-12: Courbe en cisaillement du joint à simple recouvrement d'après [MIN05].

I-4-5.2 Sollicitation en traction

Lors de la sollicitation en traction du joint, la charge se transfère par les têtes de l'élément de fixation (tête de la vis et écrou dans le cas d'un joint boulonné). La traction permet de solliciter l'élément de fixation dans une direction qui lui est normale [ALI07] (Figure I-13). Les plaques sont fortement déformées sous la sollicitation par des phénomènes de flexion locale. Il faut alors une forte rigidité des plaques pour pouvoir solliciter l'élément de fixation.

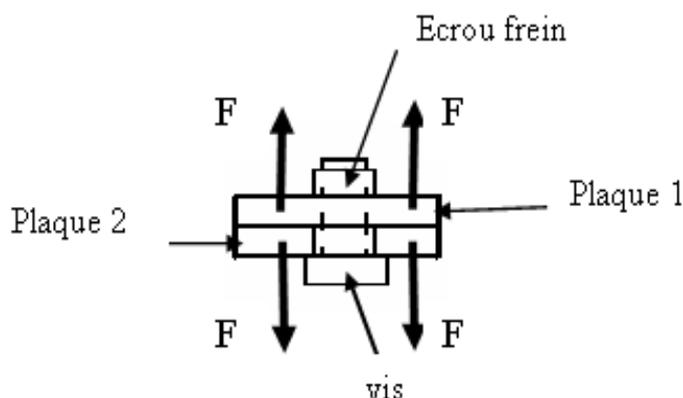


Figure I-13: Joint chargé en traction.

I-4-6 Modélisation numérique des fixations

L'approche par la méthode des éléments finis du comportement des assemblages boulonnés ou rivetés nécessite de réaliser un modèle de représentation des fixations qui s'avère relativement complexe. En effet, l'établissement d'un tel modèle qui doit donner une reproduction parfaite du comportement réel de la fixation dans son environnement naturel est rendu très difficile du fait des nombreux phénomènes mis en jeu.

La modélisation 2D (bi-dimensionnelle) se révèle encore plus difficile à mettre au point qu'une modélisation complète 3D (modèle réel), car elle nécessite une traduction la plus précise possible des phénomènes qui se passent dans l'espace. Des hypothèses simplificatrices sur la transmission des efforts sont donc nécessaires.

Plusieurs modèles sont donc possibles en fonction du besoin et des objectifs à atteindre. Ces modèles sont détaillés ci-dessous.

I-4-6.1 Modèle ressort

Le modèle ressort (Figure I-14) est un modèle dans lequel les plaques et les fixations sont représentées par des ressorts qui travaillent dans la direction de l'effort. Ce modèle sert à évaluer le taux de transfert et peut être utilisé pour les assemblages où la flexion secondaire est

négligeable (ex : assemblage en double cisaillement). K_1 , K_2 , et K_3 sont les raideurs des ressorts qui correspondent aux rigidités des éléments de fixation.

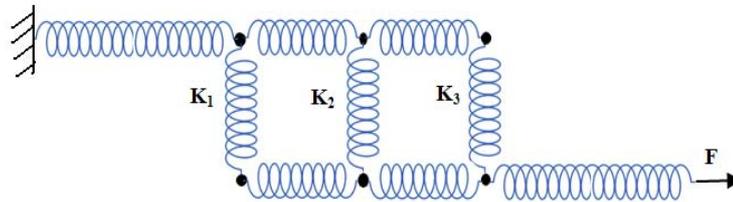


Figure I-14 : Modèle ressort.

I-4-6.2 Modèle poutre unique

Dans un modèle poutre unique, l'assemblage est représenté par une seule poutre (Figure I-15). Ce modèle est conseillé pour évaluer la flexion d'ensemble de l'assemblage. Ce modèle convient bien pour les assemblages en simple cisaillement car il prend en compte la flexion secondaire.

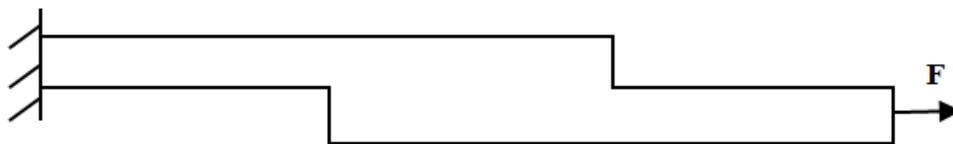


Figure I-15: Modèle poutre unique.

I-4-6.3 Modèle coque et poutre

Dans un modèle coque et poutre (Figure I-16) les plaques sont présentées par une coque mince et les fixations par des poutres. Des conditions de contact sont introduites au niveau des nœuds en vis-à-vis sur les plaques.

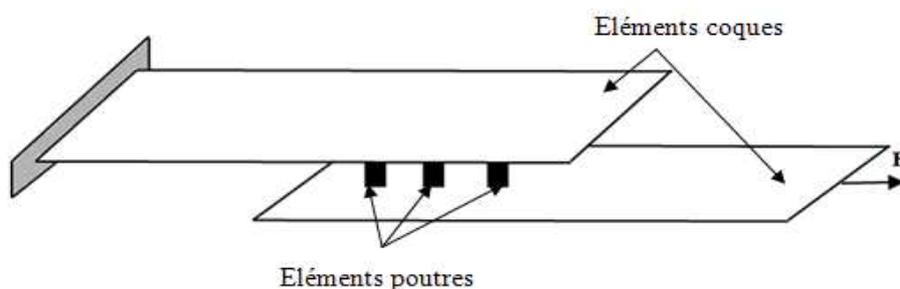


Figure I-16 : Modèle coque et poutre.

Les trois modèles précédents restent toujours insuffisants et leurs applications sont limitées.

I-4-6.4 Modèle complet

K.KOFFI [KOF99] a réalisé un modèle complet adapté à l'étude des éclissages aéronautiques. Il a ainsi créé un modèle 2D où la fixation est représentée par deux rondelles liées aux plaques par des conditions de contact (Figure I-17).

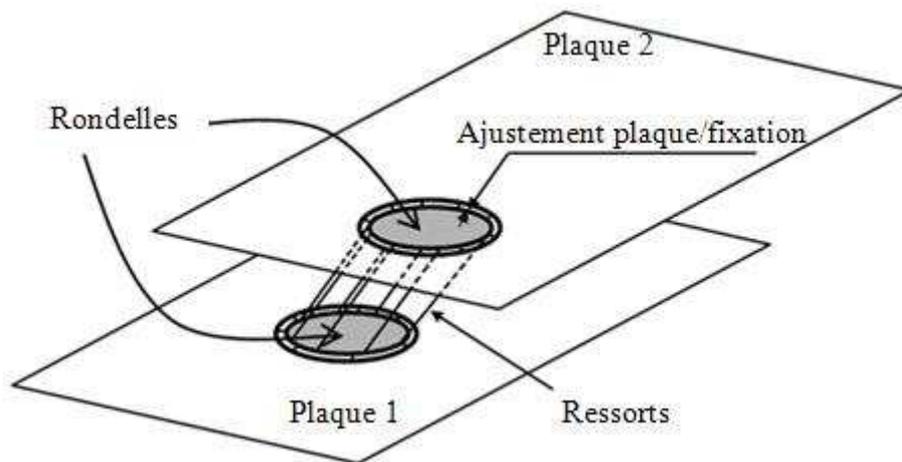


Figure I-17 : Modélisation 2D d'une fixation [KOF99].

Les caractéristiques techniques de la fixation sont les suivantes :

- Chaque rondelle est constituée de N éléments.
- Le maillage des plaques est raffiné autour des trous.
- L'ajustement plaque/fixation est pris en compte.
- Un ressort de faible raideur placé entre deux nœuds en vis-à-vis de la rondelle et de la plaque supprime la liberté en rotation de la rondelle autour de l'axe Z (axe de l'élément de fixation).
- Les rondelles sont liées entre elles par des ressorts suivant les deux composantes X et Y (axes du plan des plaques).
- La rigidité des ressorts est calculée à partir de la formule de Huth (I-6) [HUT86] qui prend en compte le comportement réel de la fixation (comportement 3D).

I-5 Assemblage continu par collage structural

I-5-1 Introduction

Le collage est une technique d'assemblage de plus en plus présente dans les différents domaines du transport (aéronautique, automobile et ferroviaire). On retrouve en effet, le collage

dans une multitude d'applications industrielles, allant de concepts simples à des réalisations complexes telles que l'assemblage de pièces aéronautiques.

Même si le collage est utilisé par l'homme depuis plus de trente siècles [MAC06], les mécanismes qui gouvernent l'adhésion entre deux matériaux collés restent complexes et partiellement connus. La durabilité des assemblages collés est également un problème récurrent, d'une importance capitale pour les industriels, mais que les scientifiques ont toujours du mal à appréhender.

L'approche bibliographique sur le collage structural est orientée suivant trois directions:

- Dans la première partie, nous rappellerons le principe de l'adhésion ainsi que les différents modèles associés.
- La seconde partie sera consacrée à une description générale des adhésifs structuraux et en particulier celle des systèmes époxydes et de leurs phénomènes de vieillissement.
- La dernière partie concernera l'état de l'art sur la modélisation du comportement mécanique des assemblages collés.

I-5-2 Les mécanismes du collage et les modèles de l'adhésion

Le collage permet d'assembler deux substrats par l'intermédiaire d'un tiers corps, qui est le plus souvent un adhésif polymère. Pour que l'assemblage soit performant et durable, il est nécessaire d'obtenir un niveau d'adhésion satisfaisant entre adhérent et adhééré. Cette condition implique une bonne compréhension des mécanismes qui sont à l'origine du phénomène d'adhésion.

I-5-2.1 Principe de l'adhésion

La technique de collage consiste à assembler deux matériaux en appliquant entre eux un adhésif qui peut se présenter sous forme liquide, pâteuse ou en film. L'adhésion peut être définie comme étant un phénomène interfacial dans lequel des forces mécaniques et/ou chimiques se créent entre deux surfaces mises en contact. En d'autres termes, la force d'adhésion est une mesure du degré d'attraction entre les deux parties à coller. Trois conditions sont à satisfaire pour l'obtention d'une liaison solide :

- Les surfaces à assembler nécessitent parfois un traitement approprié, physique ou chimique.
- La colle doit mouiller toute la surface à coller.

- La colle doit subir une polymérisation ou une réticulation suffisante pour entraîner son bon durcissement.

Plusieurs modes de rupture caractérisent un joint collé :

- Rupture cohésive qui correspond à une rupture ayant lieu dans la colle et par conséquent est liée aux caractéristiques de celle-ci.
- Rupture adhésive au niveau de l'interface colle/substrat.
- Rupture mixte qui combine les deux ruptures cohésive et adhésive.
- Rupture cohésive dans le substrat.

I-5-2.2 Modèles de l'adhésion

La réalisation d'un collage consiste à mettre en contact des surfaces imparfaites et à établir des liaisons physiques ou chimiques entre ces surfaces par le biais de l'adhésif. Il existe de nombreux modèles relevant de la physico-chimie, de la tribologie et d'autres disciplines, qui rendent compte de ces interactions entre adhérent et adhérent. Cependant, aucune de ces théories ne permet d'expliquer à elle seule le phénomène d'adhésion, car celui-ci résulte de la superposition de nombreux mécanismes élémentaires qui seront présentés dans ce qui suit.

➤ Modèle de la liaison chimique

Il est parfois possible de créer à l'interface colle/substrat des liaisons covalentes ou ioniques lors de réactions chimiques. Ces liaisons seront autant de points d'ancrage qui assureront une grande résistance à la rupture et une bonne durabilité de l'assemblage. Ces liaisons chimiques peuvent être créées de deux manières :

- par réaction directe entre l'adhésif et le substrat ; c'est par exemple le cas entre une résine époxyde et la couche d'oxyde superficielle d'un métal (Figure I-18).
- par l'intermédiaire d'un agent de couplage, c'est-à-dire d'une molécule compatible à la fois avec la colle et avec le substrat. C'est généralement la technique utilisée avec du silane pour obtenir une bonne adhésion entre une matrice époxyde et des fibres de verre dans les matériaux composites (Figure I-19).

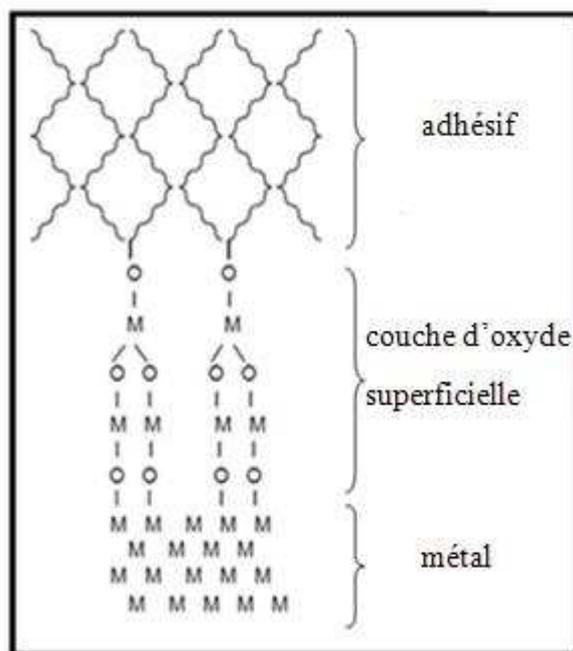


Figure I-18: Liaison chimique directe entre adhérent et adhéru.

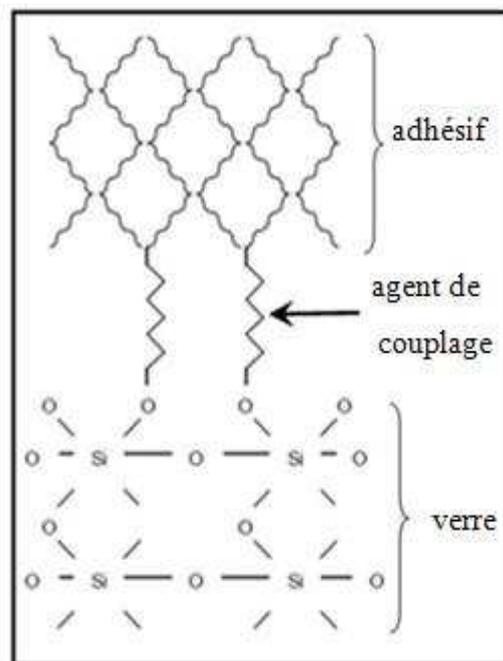
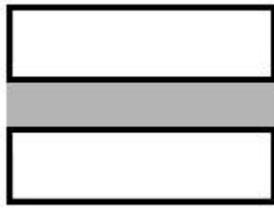


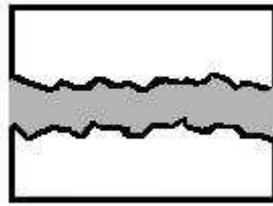
Figure I-19: Agent de couplage pour former une liaison chimique.

➤ Modèle mécanique

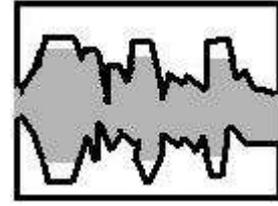
Proposé par Mac Bain et Hopkins [MAC25], ce modèle tient compte de l'hypothèse que l'adhésion résulte essentiellement d'un ancrage mécanique des matériaux mis en contact. Le mécanisme mis en jeu est lié à la pénétration de la colle dans les porosités et les aspérités des substrats, ce qui permet de constituer de nombreux points d'ancrage après solidification de l'adhésif. Si la liaison mécanique contribue à accroître l'adhésion par l'augmentation de l'aire de contact effective et donc du nombre de liaisons interfaciales, elle peut également être un handicap. En effet, il est nécessaire que la colle mouille parfaitement les surfaces afin de ne pas piéger de bulles d'air dans les porosités, ce qui induirait des concentrations de contraintes et fragiliserait le joint. Or, une rugosité trop importante peut elle aussi être source de bulles d'air. Il existe donc une rugosité optimale des substrats à assembler (Figure I-20). On peut obtenir dans certains cas un excellent collage en l'absence de rugosité (silicone/verre). Cette théorie trouve des applications essentiellement dans les collages de matériaux poreux (pièces en bois, en papier, en tissu) ou encore de métaux anodisés comme l'aluminium.



Surfaces trop lisses: pas d'ancrage



Rugosité optimale: ancrage efficace



Rugosité trop importante: concentration de contraintes dans les cavités restées vides

Figure I-20 : Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique.

➤ **Modèle thermodynamique - Notion de mouillage**

Ce modèle met l'accent sur le mouillage du substrat par la colle. En effet, les colles étant mises en œuvre à l'état liquide dans la plupart des cas, il est nécessaire de considérer leur étalement sur la surface de contact.

Le phénomène de mouillage traduit l'aptitude de l'adhésif à créer des liaisons de Van der Waals [KIN87] ou des liaisons de type acide-base (liaisons "hydrogène") avec le substrat. Bien que de faible énergie et de courte portée, ces forces compensent plus ou moins la disparition des forces de cohésion internes de la colle lors de l'augmentation de l'aire de contact avec le substrat. Selon le modèle, l'adhésion s'expliquerait donc par l'existence de ces forces de liaisons physiques.

Plusieurs grandeurs caractéristiques permettent de décrire cette adhésion thermodynamique. Il paraît intéressant de les définir et de donner ici leurs définitions et leurs expressions. On peut ainsi calculer une énergie libre de surface (γ), également appelée tension superficielle, qui correspond au travail (dw) à fournir pour accroître la surface (ds) d'une unité, soit :

$$\gamma = dw/ds \tag{I-22}$$

De plus, lorsque l'on dépose une goutte de liquide sur un solide, celle-ci va s'étaler jusqu'à atteindre un état d'équilibre, caractérisé par l'angle de contact liquide/solide (Figure I-21) et décrit par l'équation d'Young.

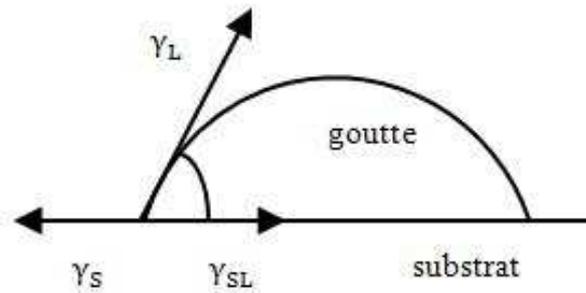


Figure I-21 : Etalement d'une goutte sur un substrat solide.

- θ = angle de contact
- γ_L = énergie libre de surface du liquide en contact avec sa vapeur
- γ_S = énergie libre de surface du solide en contact avec la vapeur du liquide
- γ_{SL} = énergie interfaciale solide-liquide

L'équation de Young s'écrit:

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cdot \cos \theta \quad (\text{I-23})$$

Or,

$$\gamma_S = \gamma_{SL} - \pi_e \quad (\text{I-24})$$

Avec γ_S l'énergie libre de surface du solide dans le vide, qui sert alors de référence. Et π_e la pression d'étalement due à la présence de vapeur. Cette pression représente la réduction de l'énergie de surface du solide dans le milieu environnant, due à la pression, à la température, aux contaminants susceptibles d'être absorbés sur la surface libre.

On obtient alors :

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cdot \cos \theta + \pi_e \quad (\text{I-25})$$

Le processus d'absorption et les forces de surface (responsables de l'énergie libre de surface) influent directement sur le travail thermodynamique d'adhésion W_a , comme l'exprime la relation de Dupré [KIN87] :

$$W_a = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL} \quad (\text{I-26})$$

En utilisant avec l'équation de Young (I-23), on obtient l'équation de Young-Dupré:

$$W_a = \gamma_L(1 + \cos \theta) + \pi_e \quad (\text{I-27})$$

Nous pouvons ainsi voir que plus l'angle de contact θ est faible (voire nul), plus le mouillage est bon et plus l'énergie d'adhésion est grande. Le tableau I-3 donne quelques valeurs d'énergies de surface pour des matériaux usuels.

La théorie définit donc des conditions indispensables mais non suffisantes pour obtenir une bonne adhésion. Elle permet également d'aborder le comportement des assemblages collés dans certains environnements spécifiques, comme le délaminage par réversibilité des liaisons interfaciales en milieu solvant par exemple.

Matériau	Energie de surface (mJ/m ²)
Aluminium	840
Cuivre	1000
Verre	73
Plastiques	18-50
Epoxy	44
PVC	39
Caoutchouc	57
Polyéthylène	31

Tableau I-3 : Energies de surface pour quelques matériaux usuels [CET06].

➤ **Modèle de la diffusion**

Cette théorie repose sur le phénomène de diffusion et considère l'adhésion comme étant le résultat de l'interdiffusion des molécules entre les deux surfaces de polymères en contact [VOY63]. Ce modèle est inapplicable aux métaux.

➤ **Modèle électrostatique**

En l'absence de groupes réactifs, le mécanisme dominant l'adhésion est l'attraction électrostatique polaire entre l'adhésif et l'adhérent. Ce sont des forces dispersives ou liaisons de London qui se produisent par l'interaction permanente de deux dipôles. En effet, ces liaisons d'attraction entre le substrat et l'adhésif contribuent d'une manière très significative à produire une rupture cohésive dans la colle [DER57].

➤ **Modèle des couches interfaciales à faible cohésion**

Cette théorie, basée sur l'hypothèse, dite des zones de faible cohésion (W.B.L : weak boundary layer), indique que la rupture d'un assemblage collé ne peut être adhésif, mais se produit toujours dans une zone de faible cohésion, située plus ou moins proche de l'interface. Cette théorie ne constitue pas une théorie de l'adhésion, mais elle peut fournir une explication de certaines ruptures de joints collés.

En résumé, l'adhésion peut être examinée à l'aide de différentes théories. Cependant aucune d'entre elles n'est capable, à elle seule, d'expliquer de manière pleinement satisfaisante la totalité des phénomènes observés. En général, ce sont plutôt plusieurs de ces mécanismes qui entrent en jeu dans le phénomène d'adhésion. Néanmoins, quelles que soient les théories prises en compte, les forces d'adhésion d'un adhésif sur un substrat dépendent essentiellement de la compatibilité chimique substrat/adhésif, de l'aptitude de ce dernier à mouiller le substrat et de la propreté et la régularité des surfaces qui entrent en contact. De petites quantités d'impuretés, des gaz absorbés ou de légères couches d'oxyde auront pour effet de modifier considérablement les forces d'adhésion.

I-5-3 L'adhésif structural et les principales familles d'adhésifs utilisées dans l'industrie

Les adhésifs, quel que soit leur état (liquide, pâte ou film), sont constitués majoritairement de polymères organiques et appartiennent à l'une des trois catégories suivantes :

- Les thermodurcissables, dont le réseau polymère possède une structure tridimensionnelle. Ils présentent une rigidité élevée et de très bonnes propriétés mécaniques.
- Les thermoplastiques, constitués de chaînes linéaires, qui présentent en général des propriétés mécaniques inférieures à celles des thermodurcissables.
- Les élastomères, très souples et présentent une très forte adhésivité.

I-5-3.1 Généralités sur les adhésifs structuraux

La notion de colle structurale est apparue dans les années 1940 [BUR06], en Grande-Bretagne et en Allemagne, lors de la mise au point des colles polyuréthanes et des colles phénoliques destinées aux assemblages métal/métal pour des applications dans le domaine aéronautique. Leur science s'est depuis largement développée, permettant la mise au point d'adhésifs de plus en plus performants. Cependant, la nature et les propriétés fondamentales de ces polymères restent les mêmes.

I-5-3.2 Les principales familles d'adhésifs utilisés dans l'industrie

➤ **Les époxydes**

Ce sont des thermodurcissables, mono ou bi-composants, qui se présentent sous la forme de produits liquides ou pâteux ou en film. La réaction de polycondensation entre la base époxyde (mélange de prépolymères comportant au moins deux groupements époxy ou oxyrane) et le durcisseur aminé ou dianhydride conduit à la formation d'un réseau tridimensionnel. La figure I-22 illustre la réaction entre le diglycidyléther de bisphénol A ou DGEBA (qui est une des bases époxydes les plus couramment utilisée) et une diamine aliphatique.

Les époxydes sont généralement utilisés pour réaliser des collages métal/métal ou métal/plastique qui seront soumis à des contraintes très élevées, notamment en cisaillement. Ils présentent une bonne adhésion sur la plupart des matériaux et une excellente résistance au vieillissement (en particulier, résistance aux huiles et aux solvants). Enfin, ils présentent une très bonne tenue en température. L'utilisation d'une colle époxy mono-composant nécessite un chauffage des assemblages pour la mise en œuvre. De plus, ce type de colle est souvent nocif (présence d'amines) et relativement onéreux ; ce qui explique que de nombreux professionnels donnent aujourd'hui leur préférence aux adhésifs époxydes bi-composants, d'usage plus pratique.

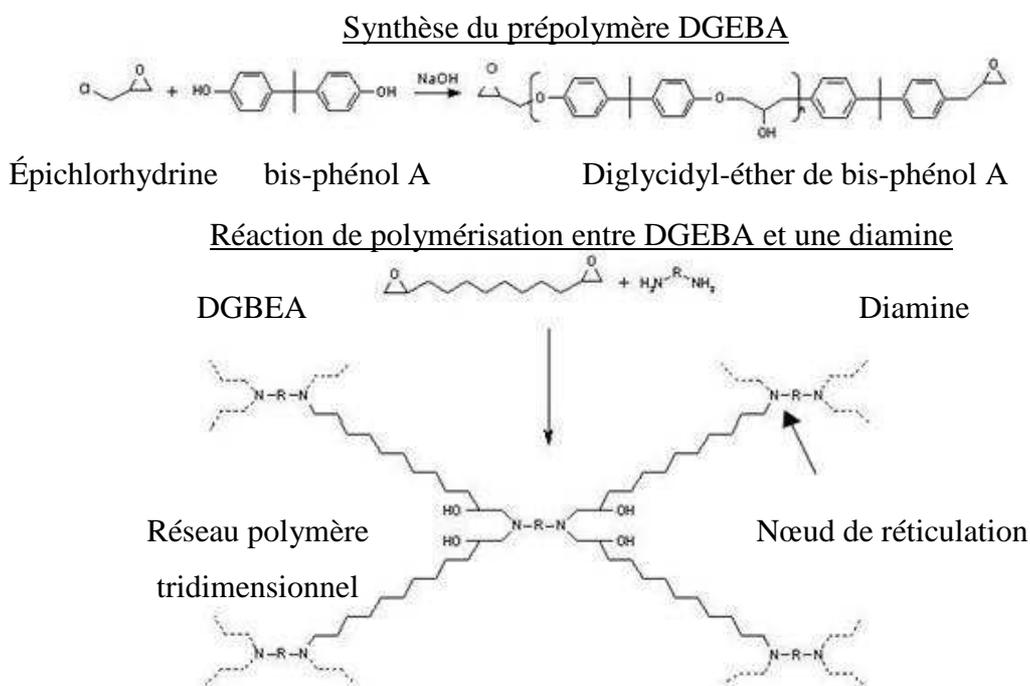


Figure I-22 : Synthèse de DGEBA et réaction de polymérisation pour les colles époxydes (DGEBA+diamine).

➤ **Les polyuréthanes**

Les polyuréthanes constituent d'excellents adhésifs structuraux, avec une bonne tenue au pelage et à la déchirure. Ils sont obtenus par polyaddition entre un isocyanate et des polyesters ou des polyéthers branchés comprenant plusieurs groupements hydroxyles. La réticulation est catalysée par l'humidité ambiante, les polyuréthanes passant d'un état pâteux à un état élastique. Ils sont utilisés pour des collages mixtes entre substrats rigide/souple comme les assemblages métal/plastique. Les polyuréthanes se caractérisent par une élasticité et une souplesse importantes même à basse température, et possèdent une bonne adhérence et une résistance aux phénomènes de vieillissement. Leur prise est en général moins rapide que celle des époxydes. Leur résistance au cisaillement est plus faible que celle des autres colles structurales et leur mise en œuvre technique est très lourde (étalement difficile). Des polyuréthanes ont été développés, incluant des activateurs pour accélérer la polymérisation.

➤ **Les acryliques**

Il existe de nombreuses colles à base acrylique, les plus courantes étant les cyanoacrylates et les méthacrylates. Elles sont obtenues par polymérisation anionique (cas des cyanoacrylates) ou par polymérisation radicalaire (cas des méthacrylates).

Ces adhésifs étaient réservés initialement aux assemblages métal/caoutchouc, mais leur usage s'est étendu aux collages de matériaux poreux et aux assemblages de précision ou de petites pièces. La mise en œuvre se fait par compression d'un film mince de monomères, qui peut adhérer à tous types de surfaces (même le téflon) sans utilisation d'un primaire d'adhésion. Les joints obtenus possèdent une résistance mécanique élevée et une bonne tenue aux solvants, mais leur résistance aux chocs et aux températures élevées est médiocre. On développe donc des 'acryliques modifiés' par adjonction d'un radical uréthane et d'un peroxyde activateur pour gagner en résistance au cisaillement et élargir la plage des températures d'utilisation.

➤ **Les polyimides**

Les polyimides sont des colles insolubles et infusibles, qui présentent l'avantage par rapport aux colles précédentes de résister aux très hautes températures. La réaction de réticulation se fait par polycondensation intermoléculaire entre un anhydride et une diamine secondaire, puis par polycondensation intramoléculaire, ce qui nécessite des températures élevées et de fortes pressions. La mise en œuvre des polyimides est donc très délicate.

➤ **Les silicones**

Les silicones sont une famille particulièrement diversifiée d'adhésifs et de produits d'étanchéité. Ils peuvent se présenter sous forme de pâtes, de liquides ou même d'adhésifs doubles faces. Leur mode de polymérisation est également très variable et ils peuvent se présenter sous forme de mono-composants ou de bi-composants. La base chimique de la plupart des adhésifs silicones est un polydiméthylsiloxane (PDMS).

Il existe d'autres familles d'adhésifs tels les polysulfures qui comme les silicones, sont plutôt des mastics d'étanchéité et les thermofusibles qui se présentent sous forme solide soit en blocs cylindriques, soit en granulés et dont le principe de fonctionnement est le suivant : la matière solide est fondue dans un pistolet chauffant ou dans une cuve chauffante, puis injectée sous pression à travers une buse chauffante. Ils sont utilisés le plus souvent dans le domaine de l'emballage.

I-5-3.3 Applications des adhésifs structuraux

De tous les adhésifs présentés jusque là, les colles époxydes sont celles qui présentent les meilleures caractéristiques :

- excellente adhérence sur tous les substrats,
- bonnes propriétés mécaniques (rigidité et/ou contrainte à la rupture élevées),
- résistance aux agressions chimiques et prise en eau modérée,
- bonne tenue en température.

Cet ensemble de propriétés justifie la prédominance des résines époxydes dans le domaine du collage structural, quel que soit le matériau de construction (Tableau I-4).

	Béton				
Béton	Ep, Ps, Pu, Si	Bois			
Bois	Ep, Pu	Ep, Pu, Th	Métaux		
Métaux	Ep, Ps, Si	Ep, Ps, Pu	Ac, An, Cy, Ep, Ps	PVC	
PVC	Pu	Ep, Th	Ep	Th	Verre
Verre	Ep, Si	Ep, Si	Pu, Ac, Ep, Si	Ep, Th	Ac, Ep, Si

Tableau I-4 : Compatibilité colle/matériau pour plusieurs matériaux de construction [CET06].

Ac = Acrylique modifiée

Ps = Polysulfure

An = Acrylique anaérobie

Pu = Polyuréthane

Cy = Cyanoacrylate

Si = Silicone

Ep = Epoxyde

Th = Thermofusible

I-5-3.4 Mise en œuvre du collage structural

La grande diversité dans la formulation des adhésifs et dans la nature des substrats à assembler justifie la multiplicité des méthodes de mise en œuvre. Les techniques utilisées dans l'industrie peuvent comporter certains traitements spécifiques destinés à améliorer les performances des assemblages (préparation de la surface des substrats, utilisation de primaires d'adhésion, etc...). Nous décrirons ici les principales étapes de la mise en œuvre d'un collage, et présenterons les techniques particulières que l'on peut rencontrer.

➤ Préparation des surfaces

L'étude bibliographique sur les modèles de l'adhésion a montré que l'ancrage mécanique lié à la pénétration de la colle dans les aspérités du substrat permet d'augmenter le niveau d'adhérence. Pour optimiser cette adhésion mécanique, il peut être intéressant :

- d'augmenter la rugosité du substrat pour favoriser l'accrochage de l'adhésif,
- d'améliorer le mouillage du substrat par la colle,

C'est pourquoi il est souvent nécessaire de recourir à des traitements de surface du substrat pour améliorer la qualité du collage. De nombreuses méthodes de préparation de surface sont disponibles (traitements chimiques, mécaniques, électrochimiques, plasmas, etc...).

Les traitements les plus utilisés dans le milieu industriel sont les suivants:

➤ Les traitements mécaniques

- Le sablage : il se fait par projection d'une poudre abrasive (oxydes durs, corindons ou alumine) à grande vitesse sur la surface à encoller. On recouvre ensuite la surface traitée par un film protecteur (papier ou polyéthylène) ou par les premières enductions de colle pour éviter qu'elle ne soit endommagée ou contaminée.
- L'abrasion par ponçage : elle consiste à poncer la surface à encoller au moyen de revêtements abrasifs. Il faut ensuite prendre soin de nettoyer la surface pour se débarrasser des particules abrasives qui peuvent se déposer pendant l'opération. Les

inclusions peuvent être éliminées par nettoyage chimique. Le traitement par ponçage est déconseillé dans le cas des surfaces métalliques.

➤ **Les traitements chimiques (cas des métaux)**

- Le dégraissage aux solvants : on utilise généralement des dérivés d'hydrocarbures ou de chlore, en fonction de la nature des contaminants à éliminer et de celle du substrat. On se sert tout simplement de chiffons propres imprégnés de solvant, mais on peut également réaliser le traitement par immersion, par aspersion ou encore en phase vapeur.
- Le dégraissage par saponification : on effectue une réaction chimique appelée saponification (réaction d'hydrolyse des fonctions esters en milieu basique) qui va transformer les graisses animales et végétales en glycérine et en savon, qui sont ensuite éliminés par rinçage.
- Le dégraissage par émulsion : ce dégraissage consiste à émulsionner les contaminants non-saponifiables pour les faire passer en suspension en utilisant des produits de type 'sels de sodium' (silicates, tétraborates, ...). Un traitement de ce type dure habituellement une dizaine de minutes à 90°C, et se termine par un rinçage à l'eau.
- Le décapage chimique : il sert à éliminer la couche d'oxyde des métaux. On effectue un traitement acide sur le fer et ses alliages. En ce qui concerne le cuivre et ses alliages, le traitement est plus délicat car il est réalisé à base de chlorure ferrique dans l'acide chlorhydrique ou nitrique, ou à base de permanganate d'ammonium ou encore de mélange sulfochromique. Il doit alors être suivi immédiatement par le collage. Dans le cas des alliages d'aluminium, on peut également compléter le décapage chimique par un décapage électrochimique.

D'une manière générale, le traitement de surface doit être choisi en fonction des substrats à encoller et de l'adhésif à mettre en œuvre, mais également en fonction des contraintes du chantier.

➤ **Primaires d'adhésion**

Une fois les surfaces préparées, il peut être nécessaire d'appliquer des primaires d'adhésion. Ces composés remplissent deux rôles :

- un rôle de protection des surfaces traitées pour éviter toute nouvelle souillure avant le collage (absorption d'eau, de gaz, de poussières) qui diminuerait les propriétés adhésives,
- un rôle d'agent de couplage entre la colle et le substrat.

Dans le cadre de cette thèse aucun primaire ne sera utilisé. En effet, nous avons pour objectif de regarder si une solution brute est techniquement viable.

➤ **Réaction de prise**

Lorsque les substrats ont été correctement préparés, le collage peut être réalisé. Il a souvent lieu en deux étapes :

- Une étape d'encollage, rendue plus ou moins délicate par la viscosité de la colle et par la nécessité de préparer le mélange résine/durcisseur dans le cas des bicomposants,
- Une étape d'assemblage et de durcissement, pendant laquelle le maintien des éléments à assembler doit être assuré. Il peut également être nécessaire d'exercer un contrôle de la pression, de la température et de l'épaisseur du joint pendant cette phase.

Les techniques à mettre en œuvre pour effectuer ces deux étapes dépendent du type de colle ou de substrat utilisés.

I-5-4 Comportements mécaniques des joints collés

Les assemblages collés sont d'une très grande efficacité. Ils permettent de distribuer les efforts transférés sur une plus grande surface. Nous parlerons alors de mode continu de transfert de charge. Ces assemblages collés sont tels que le joint de colle travaille en cisaillement dans son plan. Les géométries de base sont le recouvrement simple (Figure I-23.a) ou le recouvrement double (Figure I-23.b).



Figure I-23 : (a) : Liaison simple recouvrement (single-lap joint), (b) : Liaison double recouvrement (double-lap joint).

I-5-4.1 Approches analytiques

Les premiers calculs ont été effectués par Aronljjevic en 1909 pour des colles qui travaillent élastiquement et en cisaillement [GIR80]. Deux types d'analyse se dégagent ensuite : les analyses uniaxiales et les analyses biaxiales.

Nous présentons alors les principales analyses qui permettent d'aboutir à la répartition des contraintes dans la couche de colle. Nous nous appuyerons sur la géométrie du joint à simple recouvrement avec les notations suivantes (Figure I-24).

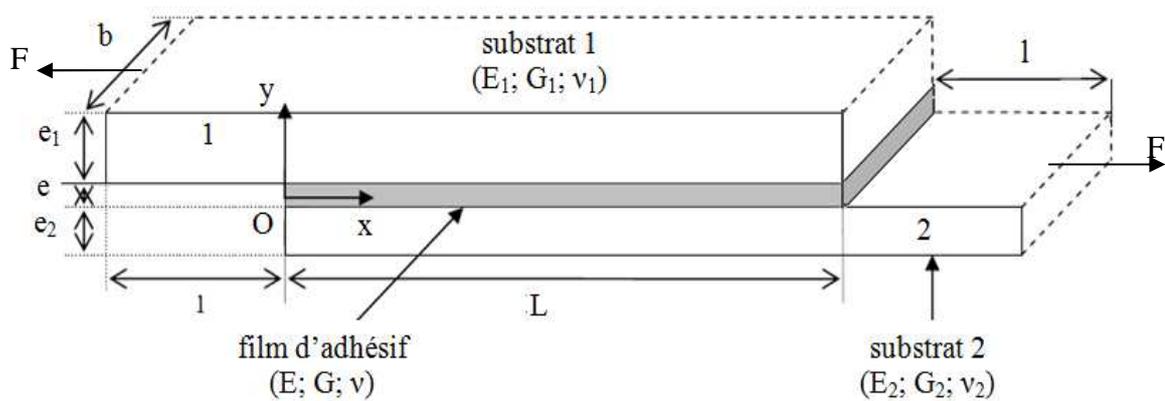


Figure I-24 : Géométrie du joint en simple recouvrement

La jonction est chargée par un effort de traction F aux deux extrémités. L'origine du repère O est prise au début du substrat 2, sur la ligne moyenne. Nous indiquons par j les paramètres mécaniques ou géométriques ayant trait au substrat j . Pour l'adhésif, aucun indice ne sera employé, pour ces mêmes paramètres. Nous notons respectivement N_0 , V_0 et M_0 les efforts normaux, efforts tranchants et moments dans le substrat j . Nous notons respectivement S (i.e. : σ_{yy}) et T (i.e. : τ_{xy}) les contraintes de pelage et de cisaillement dans l'adhésif. Une telle jonction sera dite équilibrée quand : $E_1 = E_2$ et $e_1 = e_2$ et déséquilibrée dans le cas contraire.

➤ Analyse uniaxiale

Volkersen dans son analyse en 1938 [VOL38] sur l'état de contrainte dans un joint collé à simple recouvrement considère que l'adhésif et les adhérents sont parfaitement élastiques. Il néglige les contraintes de cisaillement dues à la flexion des adhérents et s'intéresse à la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche de colle. Il montre alors que la contrainte de cisaillement est maximale au bord du joint et minimale au centre (Figure I-25) :

$$T_{xy}(x) = 0,5\eta \frac{\cosh(\eta(0,5L - x))}{b \sinh(0,5\eta L)} f \quad (I-28)$$

où

$$\eta = \sqrt{\frac{2G}{e \cdot e_1 \cdot E_1}} \quad (I-29)$$

En notant T_{moy} , la contrainte de cisaillement moyenne appliquée, la contrainte maximale T_{max} s'écrit :

$$T_{max} = \frac{\eta L}{2 \tanh(\eta L)} T_{moy} \quad (I-30)$$

où

$$T_{moy} = \frac{f}{bL} \quad (I-31)$$

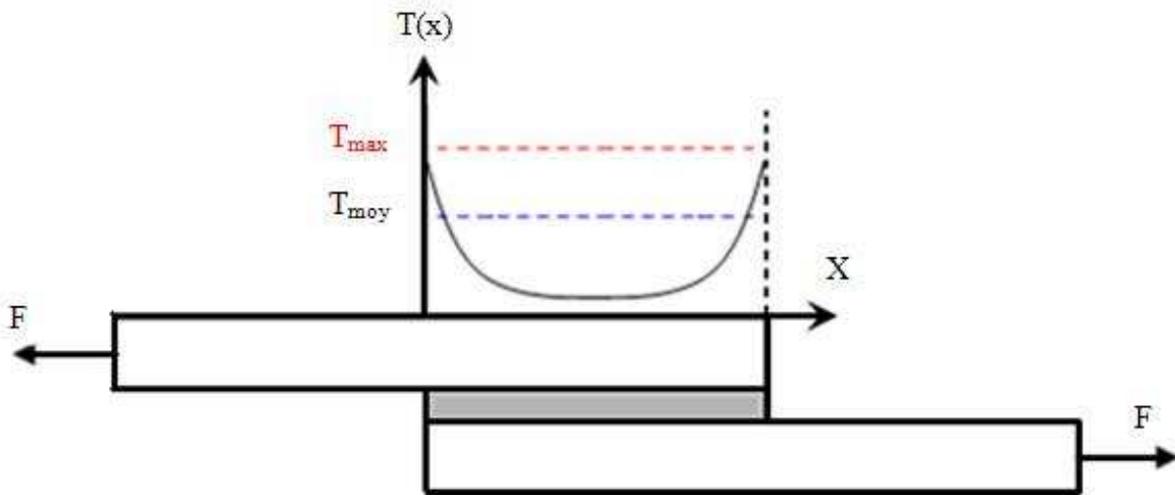


Figure I-25 : Répartition de la contrainte de cisaillement

Il faut donc remarquer que $\eta L \ll 1$ implique

$$\begin{cases} f_{critique} = bLT_{moy} \\ T_{max} = T_{moy} \end{cases} \quad (I-32)$$

$\eta L \gg 1$ implique

$$\begin{cases} T_{max} = \frac{\eta L}{2} T_{moy} \\ f_{critique} = \frac{2b}{\eta} T_{moy} \end{cases} \quad (I-33)$$

Par conséquent pour $\eta L \gg 1$ la charge critique ne dépend plus de la longueur de recouvrement et il existe donc une longueur optimale, L_{opt} telle que :

$$L_{opt} = 2/\eta \quad (I-34)$$

Cette analyse néglige le fait que pour un joint à simple recouvrement, le chargement est excentrique et qu'il existe donc un moment fléchissant, qui a pour effet de faire tourner le joint. Cette rotation est à l'origine de l'apparition de contraintes normales dans le joint en plus des contraintes de cisaillement.

➤ **Analyses biaxiales**

Elles présentent les travaux existants qui prennent en compte la flexion des substrats du fait de l'excentricité du chargement (Figure I-26). Un moment de flexion en bord de joint M_0 sera alors introduit. L'adhésif est représenté par une infinité de ressorts travaillant en cisaillement et une infinité de ressorts travaillant en traction-compression. Les substrats sont considérés comme des plaques dans la plupart des cas.

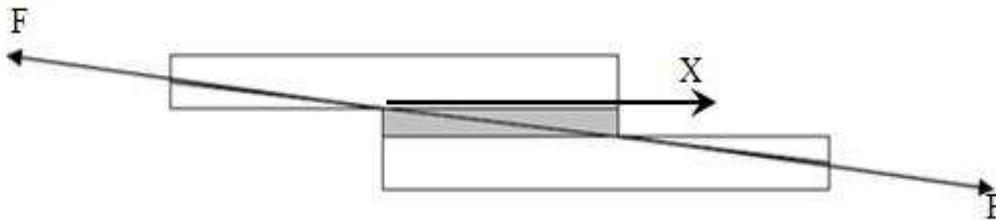


Figure I-26 : Excentricité du chargement

Goland et Reissner tiennent compte du moment de flexion dans leur analyse [GOL44], Ils supposent que l'adhésif et les adhérents sont parfaitement élastiques et que la profondeur est grande devant les épaisseurs des adhérents. De cette sorte ils positionnent le problème en contraintes planes. Ils supposent de plus que les contraintes normales dans la colle sont négligeables. De même la contrainte normale dans la colle dans la direction x (Figure I-26) est négligeable et la contrainte de cisaillement T ne varie pas dans l'épaisseur. Ils procèdent en deux étapes ; en déterminant dans un premier temps la répartition du chargement sur la section rectangulaire du joint puis dans un second temps les contraintes dans la colle. Pour cela, ils considèrent les substrats et l'adhésif comme un seul bloc. Ils obtiennent des solutions pour deux cas particuliers (cas limite) :

- la couche de colle est fine et de rigidité similaire aux substrats, ce qui se traduit par la relation $e/E \ll e_1/E_1$.

- La couche de colle est fine et ses déformations ne sont pas négligeables ce qui se traduit par la relation $e/E \gg e_1/E_1$.

C'est ce dernier cas qui s'applique aux assemblages métal/colle/métal.

Ils définissent un facteur de moment fléchissant K_{GR} qui relie le moment de flexion M_0 à la charge de traction F appliquée à l'assemblage et un facteur de force k' pour relier l'effort tranchant V_0 en fin de recouvrement à cette même charge de traction.

L'assemblage est équilibré, afin de tenir compte de la flexibilité des substrats et de l'adhésif.

$$M_0 = 0,5 K_{GR} e_1 F \quad (I-35)$$

$$V_0 = f K_{GR} \sqrt{\frac{3(1 - V_1^2) F}{b E_1 e_1}} = 2 K' \frac{e_1}{L} \quad (I-36)$$

où

$$K' = 0,5 \frac{L}{e_1} \sqrt{\frac{3(1 - V_1^2)}{E_1 e_1 b}} K_{GR} \quad (I-37)$$

Ils obtiennent ainsi dans le second cas limite :

$$\tau(x) = -\frac{1}{4bL} \left[(1 + 3K) \frac{\beta L}{2e_1} \frac{\cosh\left(\frac{\beta x}{e_1}\right)}{\sinh\left(0,5 \frac{\beta x}{e_1}\right)} + 3(1 - K_{GR}) \right] F \quad (I-38)$$

où

$$\beta^2 = 8 \frac{G e_1}{E_1 e} \quad (I-35)$$

Les contraintes maximales se situent aux extrémités du joint et ont pour valeur :

$$\tau_{\max} = \left(\frac{1 + 3K_{GR}}{4} \eta L \coth(\eta L) + \frac{3(1 - K)}{4} \right) T_{\text{moy}} \quad (I-40)$$

Dans le cas de substrats indéformables ($K_{GR} = 1$), la contrainte de cisaillement maximale est deux fois plus importante que la valeur prévue par Volkersen ; d'où l'importance de tenir compte de la rotation du joint.

Hart-Smith [HAR85] a fourni un travail volumineux sur les jonctions collées à simple recouvrement, à double recouvrement, en escalier et biseautées. Ses solutions analytiques incorporent les effets thermiques, les effets de déséquilibre de rigidité. De plus, Hart-Smith s'intéresse au comportement non linéaire de l'adhésif et a développé une approche plastique.

Il considère la colle comme un matériau élastique puis parfaitement plastique au delà d'une déformation critique (Figure I-27).

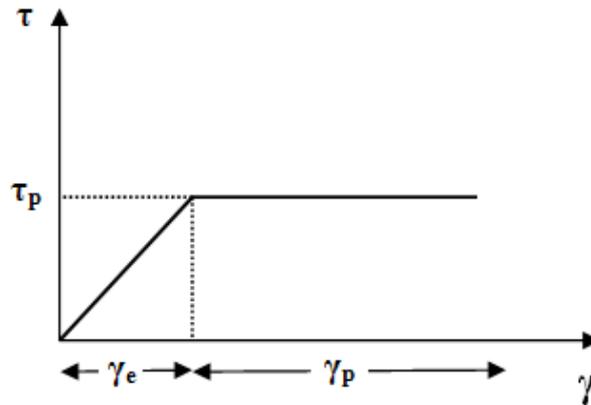


Figure I-27 : Matériau à comportement élastique parfaitement plastique.

Les approches analytiques fournissent des expressions prêtes à l'emploi. L'exactitude de ces formules doit être reliée à la validité des hypothèses simplificatrices faites, vis-à-vis du problème posé. Les facteurs influençant la tenue mécanique d'un assemblage collé en simple recouvrement sollicité au cisaillement sont :

➤ **La surface de collage**

D'une manière générale, la résistance de l'assemblage collé augmente en fonction de la surface de collage. Toutefois, cette progression ne se fait pas d'une manière linéaire et nous avons vu qu'il existait de fortes concentrations de contraintes aux deux extrémités du recouvrement. Ce sont ces concentrations qui gouvernent la résistance mécanique de l'assemblage. Il y a donc lieu d'optimiser les dimensions de l'assemblage pour diminuer les concentrations et ainsi améliorer la tenue mécanique du joint. Deux paramètres conditionnent la surface de collage :

- **La longueur de recouvrement** : en pratique la résistance à la rupture du joint croît avec la longueur de recouvrement ; linéairement pour les faibles valeurs de recouvrement, puis de moins en moins rapidement jusqu'à atteindre une valeur

optimale. Cette longueur optimale dépend directement de l'épaisseur moyenne des matériaux à assembler.

- **La largeur de recouvrement** : pour un assemblage plan, il n'existe pas d'effets de bords dans le sens de la largeur, la résistance augmente donc proportionnellement à la largeur de recouvrement.

Hart-Smith [HAR85] montre que la capacité de chargement augmente avec la longueur de recouvrement et est constante au-delà d'une certaine longueur. Au dessus de cette longueur, aucune charge plus importante ne peut être transférée. La charge est essentiellement transférée dans deux zones ; celles proches des deux extrémités du joint de colle.

La charge transférée dans la zone intermédiaire, où la colle est élastique, est faible. L'extension des deux zones aux extrémités de la jonction est limitée, et au-delà d'une certaine longueur de recouvrement, cette longueur ne dépend plus de la longueur de recouvrement. La contrainte moyenne est alors définie par :

$$T_{\text{moy}} = \left[\left(1 - \frac{d}{L}\right) + \frac{\tanh(0,5\eta_{\text{HS}} d)}{0,5\eta_{\text{HS}} L} \right] \tau_p, \quad (\text{I-41})$$

avec

$$\eta_{\text{HS}} = \sqrt{\frac{G}{e} \left(\frac{1}{e_1 E_1} + \frac{1}{e_2 E_2} \right)}, \quad (\text{I-42})$$

et

$$[0,5\eta_{\text{HS}} (L - d) + \tanh(0,5\eta_{\text{HS}} d)]^2 = \tanh^2(0,5\eta_{\text{HS}} d) + 2 \frac{\gamma_p}{\gamma_e}. \quad (\text{I-43})$$

En faisant l'hypothèse d'un long recouvrement, il vient :

$$(L - d) = \frac{2}{\eta_{\text{HS}}} \sqrt{\tau_p e \left(\frac{\gamma_e}{2} + \gamma_p \right)} \quad (\text{I-44})$$

La longueur limite de plastification ne dépend donc plus que des caractéristiques mécaniques des matériaux. Plus précisément, la longueur de recouvrement limite au-delà de laquelle il existe une zone élastique est donnée par :

$$(0,5 \eta_{HS} L)_{\text{transition}} = \sqrt{2 \frac{\gamma_p}{\gamma_e}} \quad (\text{I-45})$$

D'où en considérant les cas où l'adhésif est totalement élastique ou totalement plastique :

- Dans le cas totalement élastique ($0,5\eta_{HS} L \rightarrow \infty$ et $\gamma_p = 0$), il apparaît $T_{\text{moy}}(0,5\eta_{HS} L) \rightarrow \tau_p$ ce qui conduit à la solution de Volskersen (puisque $\eta_{HS} L \gg 1$);
- Dans le cas totalement plastique ($0,5\eta_{HS} L \rightarrow 0$), $\tau_0 \rightarrow \tau_p$

Les approches analytiques fournissent de nombreuses expressions qui demandent la validation des hypothèses simplificatrices, comme par exemple les hypothèses de contraintes qui, dans l'épaisseur du film adhésif, sont constantes ou varient linéairement, ou la prise en compte ou non de la rotation de la jonction. Les approches numériques permettent d'éviter certaines de ces hypothèses simplificatrices. Cependant, vu les gradients de déformations élevés, un maillage fin est nécessaire. Par conséquent, l'approche numérique demande vite des temps de calcul importants et faire une étude paramétrique devient fastidieux.

➤ **L'épaisseur du joint collé**

Les propriétés mécaniques de l'adhésif peuvent varier beaucoup entre un état massif et un film d'adhésif dans un joint collé, analytiquement les effets de l'épaisseur sur la tenue mécanique du joint collé restent inexplicables, d'où l'intérêt des études expérimentales.

O. Mario [MAR06], a étudié l'effet de l'épaisseur sur les caractéristiques mécaniques de l'adhésif et a trouvé pour un adhésif donné qu'au-delà d'une certaine épaisseur les propriétés élastiques de l'adhésif chutent brutalement.

D'après le guide du collage [CET06], Il existe une épaisseur de colle optimale qui fournit la résistance la plus importante, cet optimum varie selon la famille chimique de l'adhésif. Par exemple l'épaisseur optimale de l'époxy se situe entre 0,1 à 0,5 mm.

I-5-4.2 Approches numériques

➤ **Analyse de Harris et Adams**

Harris et Adams [HAR84], se sont intéressés aux modes de rupture d'une jonction à simple recouvrement, en prenant en compte la rotation de la jonction quand elle est chargée. Ils montrent que les facteurs de moment fléchissant de Goland et Reissner [GOL44] ne

correspondent pas à ceux trouvés numériquement et ils attribuent les écarts aux hypothèses simplificatrices prises dans ces méthodes analytiques. De plus, ils ont introduit un comportement non linéaire des matériaux. Ils montrent alors qu'un faible degré de plastification des substrats augmente la résistance de la jonction, dans le sens où sa rotation est diminuée et que par conséquent, les contraintes adhésives le sont aussi. Cependant, une plus grande plastification des substrats entraîne une concentration de contrainte plus importante au bord du bourrelet de colle, qui peut être à l'origine d'une rupture prématurée de la jonction. Deux types de rupture sont alors mis en évidence au niveau du bourrelet ou entre le substrat et l'adhésif en bord de joint, selon la limite élastique des substrats. Ils montrent de plus que si l'adhésif plastifie, la résistance de la jonction augmente puisque la distribution de contrainte tend à s'uniformiser le long du recouvrement.

➤ **Analyse de Tsai et Morton**

Tsai et Morton [TSA94], proposent une analyse par éléments finis tridimensionnelle linéaire, incluant les grands déplacements et la présence d'un bourrelet en bord de joint. Par comparaison avec un modèle éléments finis bidimensionnel et le modèle de Goland et Reissner [GOL44], ils montrent que si la contrainte de cisaillement n'est pas sensible au passage à la troisième dimension, il n'en est pas de même pour la contrainte de pelage. Ils révèlent également qu'une analyse bidimensionnelle en déformation plane est valable pour connaître la distribution de contrainte loin des surfaces libres ($2x/L > 0,1$). Ils confirment de plus que la présence du bourrelet diminue les contraintes maximales de cisaillement et de pelage.

➤ **Utilisation d'éléments finis spéciaux**

Amijima et Fujii [AMI87], présentent un programme informatique qui permet d'étudier les contraintes développées au sein de la jonction collée dans le cas biaxial et élastique. Les substrats sont supposés élastiques et les auteurs se placent dans le cadre de la théorie des poutres. Les auteurs divisent la structure substrat-adhésif-substrat en éléments finis à quatre nœuds, soit douze degrés de liberté par élément. Les déplacements nodaux sont interpolés par des fonctions classiques et la matrice de rigidité est calculée. L'effet de la température est introduit en termes d'efforts nodaux. L'exemple de la jonction à simple recouvrement est traité et les résultats sont en accord avec les résultats de Goland et Reissner [GOL44].

Adams et Mallick [ADA92], développent une méthode pour le calcul des contraintes au sein de la jonction collée dans la configuration de simple ou double recouvrement sous un chargement normal. Les substrats sont élastiques mais leurs épaisseurs ne sont pas forcément

égales. L'adhésif est hyperélastique ou élastoplastique. De plus, ils ajoutent les déformations hygrothermiques dans les substrats et l'adhésif. Leur solution satisfait la condition des contraintes de cisaillement nulles en bord libre. Elle est basée sur la méthode des éléments finis, afin de profiter de manière aisée de la précision de cette méthode.

Carpenter et Barsoum [CAR89], développent deux éléments finis spéciaux à deux ou quatre nœuds, selon le type d'hypothèses retenues sur le joint, pour simuler l'adhésif. Les substrats sont considérés comme étant des éléments poutre. Les nœuds des éléments poutre et des éléments spéciaux coïncident, puisque les auteurs ont utilisé des nœuds à offset pour leurs éléments spéciaux. La matrice de rigidité des éléments spéciaux est calculée. Ils montrent que leur solution donne le même résultat que celui de Delale et Erdogan [¹DEL81].

Yadagiri, Papi Reddy et Sanjeeva Reddy [YAD87], proposent un élément quadratique à six nœuds pour la formulation viscoélastique des éléments de la couche adhésive. Des éléments quadratiques à huit nœuds sont utilisés pour les substrats. Un modèle de Zener modifié est utilisé pour l'adhésif. Ils retrouvent les résultats de Delale et Erdogan [¹DEL81].

Némès [NEM04], pour la modélisation 3D par Eléments Finis d'assemblages collés, utilise deux types d'éléments : des éléments quadrangles de degré 2 (10 éléments dans l'épaisseur sont recommandés) et des éléments d'interface de degré 2. Il montre que les distributions des contraintes sont quasi identiques ; elles diffèrent cependant en deux points :

- les éléments d'interface ne permettent pas de donner une contrainte de cisaillement nulle en bord libre ;
- le temps de calcul est bien plus rapide par l'utilisation des éléments d'interface que par l'utilisation des éléments quadrangles.

Kilic, Madenci et Ambur [KIL04], utilisent un élément global (spécial) couplé à des éléments finis traditionnels. Cet élément global tient compte des singularités de comportement à l'interface entre substrat et adhésif, dues aux discontinuités géométriques et mécaniques. Des éléments globaux sont disposés dans les zones sensibles en bord de jonction entre les substrats et l'adhésif. Ailleurs, ce sont des éléments traditionnels. La matrice de rigidité de cet élément est établie comme pour les éléments classiques ; seules les fonctions d'interpolation diffèrent et sont calculées à partir des champs de contraintes et de déplacements dans la zone concernée. Cette approche permet de ne plus raffiner le maillage en bord de jonction.

Farhad Tahmasebi [FAR99] propose une approche numérique par éléments finis développée pour un modèle d'un joint collé (Figure I-28). Des exemples traités par cette

approche numérique ont montré une bonne concordance avec les solutions classiques. Pour modéliser l'épaisseur de l'adhésif, La méthode utilise deux éléments rigides et trois éléments ressort de longueur nulle. Les ressorts relient les deux éléments rigides par les deux nœuds coïncidents. Par mesure de clarification, l'auteur a fait séparer les deux nœuds rigides.

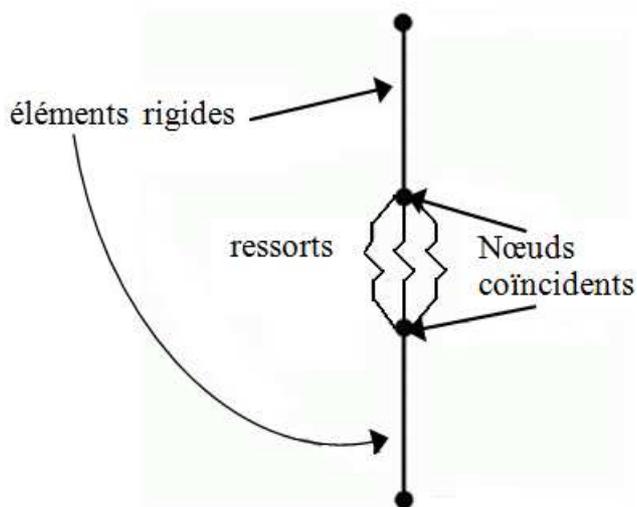


Figure I- 28 : Modèle du joint collé utilisant des ressorts pour l'adhésif.

I-5-4.3 Synthèse

Les travaux de Goland et Reissner et de Hart-Smith apparaissent comme étant des travaux références. En effet, Goland et Reissner sont les premiers à prendre en compte la flexion des substrats, tandis que Hart-Smith, sur la base des travaux de Goland et Reissner, analyse les assemblages collés sous toutes leurs configurations. Par conséquent, ces travaux offrent assez simplement, la possibilité d'être considérés comme référant à d'autres analyses.

De ces analyses nous pouvons dégager l'influence sur le comportement général des paramètres suivants : la longueur de recouvrement ; la rigidité (épaisseur et module d'élasticité) des substrats et de l'adhésif ; le comportement mécanique de l'adhésif.

➤ La longueur de recouvrement

La contrainte maximale en bord de joint augmente quand la longueur de recouvrement augmente ; l'effort se transfère préférentiellement aux extrémités du joint. La charge moyenne à la rupture augmente avec la longueur de recouvrement jusqu'à atteindre un plateau ; d'où l'existence d'une valeur optimale de recouvrement. Celle-ci donne la longueur de recouvrement qui permet de supporter un effort maximal pour une surface collée minimale.

➤ **La rigidité des substrats**

L'augmentation de l'épaisseur des substrats diminue la concentration de contrainte de cisaillement et augmente la concentration de contrainte de pelage [BRU44].

L'augmentation de la rigidité de flexion permet de diminuer la concentration des contraintes de cisaillement aux extrémités du joint en augmentant la rigidité des substrats par une augmentation de leur épaisseur ou de leur module d'Young. Un facteur important est le rapport de la rigidité relative du substrat sur la rigidité relative de la colle : $R = \frac{E_i e}{e_i E}$

Plus ce rapport sera élevé, plus les contraintes de pelage seront faibles.

➤ **La rigidité de l'adhésif**

Théoriquement, la résistance du joint collé augmente avec l'épaisseur de l'adhésif, pourtant, les résultats expérimentaux montrent que la charge moyenne à la rupture augmente puis décroît au-delà d'une certaine épaisseur jusqu'à une certaine limite. Ceci est expliqué par le développement des contraintes d'arrachement aux extrémités du joint, croissant avec l'épaisseur de l'adhésif, ce qui entraîne une diminution de la résistance au cisaillement [GIR80]. Cette étude met en évidence qu'aux extrémités du joint, il existe des zones à très fort gradient de contraintes de pelage, accompagnant l'annulation des contraintes de cisaillement aux bords libres. Il apparaît par ailleurs que les ruptures du joint de colle tendent à être adhésives et non cohésives quand l'épaisseur augmente. Aussi, la résistance au cisaillement diminue lorsque le module de cisaillement de l'adhésif augmente, ce qui peut être expliqué par une augmentation de la fragilité des adhésifs quand leur module augmente.

➤ **Le comportement mécanique des adhésifs**

Sous les hypothèses simplificatrices prises par Hart-Smith, il est montré que la prise en compte du comportement plastique de l'adhésif permet d'accorder résultats théoriques et expérimentaux. Cela montre donc l'importance du comportement adhésif considéré. De plus, cela indique que des modélisations, pour lesquelles l'adhésif est simulé par des ressorts agissant dans le plan et hors plan, sont suffisantes même si l'état de contrainte nulle en bord libre n'est pas vérifié. La prise en compte du comportement visqueux des adhésifs permet de traduire l'évolution au cours du temps des assemblages collés [²DEL81].

I-5-5 Analyse mécanique des joints collés

Les paramètres déterminant la force et l'efficacité d'un collage sont extrêmement nombreux puisqu'il faut tenir compte des matériaux, des préparations de surface, de la durée de vie, des effets de fatigue et du vieillissement. Généralement, la performance d'un assemblage collé est soit obtenue par la détermination des caractéristiques de la colle, soit par des tests menés sur le joint jusqu'à la rupture, soit par les deux ensembles. Dans l'analyse d'un joint collé, il est fortement recommandé de déterminer le module élastique, le module de cisaillement, le coefficient de Poisson, la déformation et la contrainte de cisaillement ultime. La résistance à la rupture d'un joint collé dépend, en partie, de la nature de l'environnement et des efforts qu'il subit sous sollicitation. Les quatre principaux types de chargement auxquels il peut être soumis sont : la traction, le cisaillement, le clivage et le pelage (Figure I-29).

I-5-5.1 Essai de cisaillement par traction

Dans le cas d'un joint travaillant sous tension (Figure I-29.a), les contraintes sont perpendiculaires au plan du joint et les forces sont ainsi distribuées uniformément sur l'intégralité de la surface. L'application des contraintes de cisaillement a également pour effet une répartition uniforme des forces sur la totalité de la surface du joint, mais dans ce cas, elles s'exercent parallèlement au plan du joint. Ainsi tout l'adhésif contribue à la résistance de la structure collée.

Le joint à simple recouvrement constitue un type d'essai normalisé qui demeure un outil de comparaison entre les adhésifs puisque la distribution des contraintes n'est pas uniforme le long de recouvrement et à travers l'épaisseur de l'adhésif [ADA84] et [MOR90]. Par ailleurs, plusieurs facteurs ont une influence sur la résistance en cisaillement par traction de cet assemblage. En plus des méthodes de mise en œuvre, de préparation des surfaces et des caractéristiques physico-chimiques de l'adhésif, la résistance du joint dépend d'autres variables liées aux dimensions de l'assemblage et à l'épaisseur du joint collé.

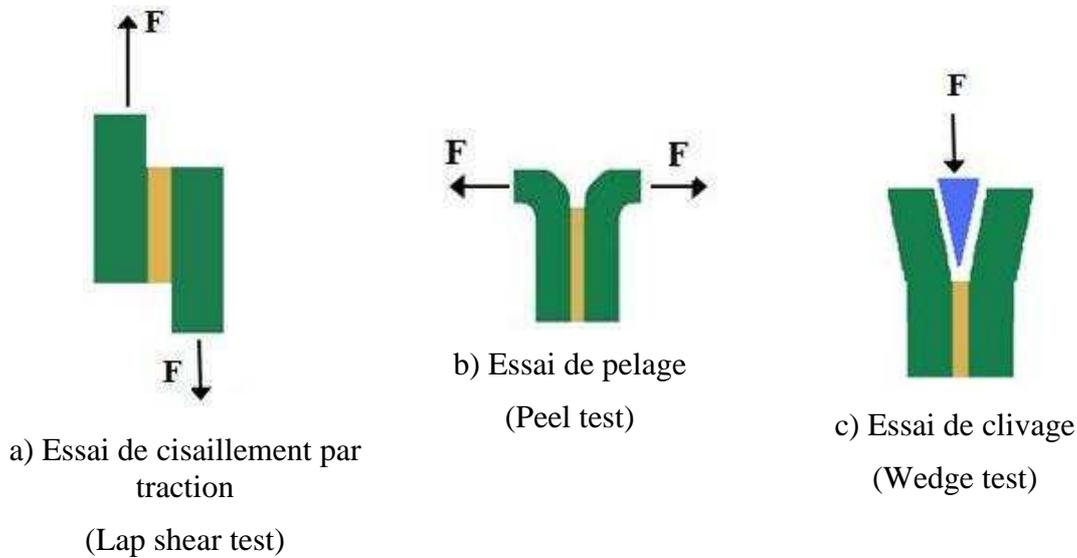


Figure I- 29 : Essais expérimentaux sur des joints collés : a) cisaillement par traction, b) pelage, c) clivage

I-5-5.2 Essai de pelage

Plusieurs formes de pelage existent pour déterminer la performance des adhésifs structuraux. L'essai de pelage en T est le plus utilisé. Comme le clivage, le pelage favorise la concentration de contraintes sur une mince ligne d'adhésif et ainsi seule une faible partie de celui-ci supporte la charge, le reste ne supportant aucun effort [LEE07]. Il représente ainsi l'essai le plus utilisé pour prédire la durabilité des assemblages collés et pour contrôler la qualité des traitements de surface (Figure I-29.b).

I-5-5.3 Essai de clivage

Ce type d'essai qui consiste en l'introduction d'un coin entre les substrats de sorte de générer une ouverture. L'essai de clivage par insertion d'un coin, connu sous le nom « Boeing wedge Test » simule d'une manière quantitative les forces et les effets d'environnement d'un joint collé à l'interface substrat-adhésif. Cependant, il est plus pratique de tester l'adhésif en clivage pour déterminer sa résistance à supporter des contraintes d'arrachement et sa durabilité avant l'assemblage final (Figure I-29.c), [ADA90]. L'intérêt du test de clivage est surtout, par son caractère sévère, de discriminer les couples adhésifs structuraux / traitements de surface avant et après vieillissement.

I-5-5.4 Essai de cisaillement par torsion

Dans l'essai de cisaillement en torsion (Figure I-30), le joint est soumis à une contrainte de cisaillement pure, sans les complications apportées par des contraintes bi-axiale et tri-axiales

additionnelles. En effet, le spécimen ne subit pas de chargements dimensionnels engendrés par des déformations différentes du substrat et de l'adhésif et par l'effet de Poisson. Le joint annulaire bout à bout est considéré comme le plus précis pour déterminer la résistance et la rigidité en cisaillement d'adhésifs structuraux. Pour des raisons pratiques, le joint tubulaire est appelé à un grand développement dans le domaine du Génie Civil car il permet de remplacer les techniques de liaison de tubes de distribution de fluides telles que le brasage, le soudage ou le soudo-brasage [ORE90] [GIL81]. Plusieurs ouvrages techniques ont été consacrés à l'étude de ce type de joint. Entre autres, Lubkin et al. [LUB56], Adams et al. [ADA77] sont parmi les premiers à étudier le joint tubulaire en torsion. Les contraintes ont été analysées de la même manière que celles d'un joint à simple recouvrement.

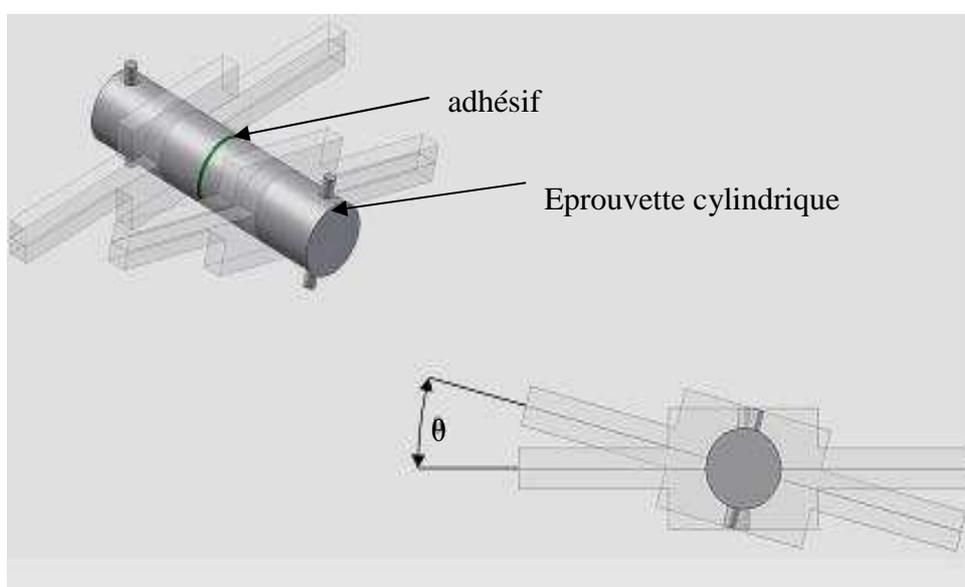


Figure I-30 : Dispositif de mesure de l'angle de torsion sur les éprouvettes cylindriques.

I-5-6 Collage structural dans l'industrie

Vers les années 1970 et particulièrement dans l'industrie aéronautique, le collage structural a été caractérisé en employant des adhésifs de très haute résistance dans des applications de films minces. Ce type d'adhésif désigné habituellement sous le nom « structural », a remplacé l'adhésif phénolique (utilisé depuis les années 1940) dans l'industrie. L'utilisation accrue de ces adhésifs a mis en évidence quelques inconvénients primordiaux comme la fragilité de comportement à l'impact. Des tentatives d'amélioration ont été effectuées pour les adhésifs époxy [BUR06] (ajout de particules élastomériques notamment type CTBN, etc...). En 1960 le mastic silicone a commencé à être employé dans la construction des façades en verre, où il a montré une bonne résistance aux conditions environnementales sévères comme les UV, et où il a également fait preuve d'une bonne stabilité thermique, assurant élasticité et

adhérence entre les panneaux de verre et les armatures. En 1964, un autre développement clé a commencé dans l'industrie automobile aux USA afin de répondre aux normes de sécurité sur les pare-brise lors d'un accident.

Le développement de la technologie de liaison de pare-brise a ouvert le chemin d'une autre application, le collage direct ou « direct glazing » des vitrages sur caisse. Lors de cette période, le glaçage direct a été réalisé en utilisant un matériau mou comme mastic. Cet adhésif élastomère a présenté les bonnes propriétés d'adhérence entre les substrats en verre et en acier après des préparations extérieures appropriées. C'était le premier adhésif flexible de liaison.

Cette perception a changé après l'introduction du glaçage direct dans l'industrie automobile européenne sur l'AUDI 100 en 1978. Tous les autres fabricants d'automobiles ont alors présenté cette technologie, par étapes successives pour la conception des nouveaux modèles de leur gamme. La raison était non seulement de répondre aux normes de sécurité des Etats Unis d'Amérique, mais les ingénieurs ont constaté que le collage direct des vitrages sur caisse augmentait de manière significative la rigidité de torsion d'une voiture sans aucun coût additionnel. Les fabricants d'adhésifs ont alors compris que cette technologie pourrait également être employée pour les applications semblables dans les autobus, les camions ou les trains. La demande de cette technique souple innovatrice de liaison a permis le développement de la technologie de Sikaflex[®] (introduite par Sika industries) basée sur des mastics polyuréthanes.

La première utilisation des adhésifs de collage des composants dans la fabrication des autobus remonte au début des années 80. L'industrie moderne d'autobus dépend maintenant des adhésifs élastiques pour une gamme entière des applications d'attache.

En 1992, Bombardier, autrefois Schindler Waggon, a fabriqué un train régional en utilisant des produits Sikaflex[®]. La carlingue avant était collée sur le train et les vitres étaient placées directement sur la carlingue (Figure I-31).

Depuis le 1er janvier 2003 et après sa mise en circulation officielle, le train à suspension magnétique « Transrapid » a relié le centre Shanghai à l'aéroport. Le Transrapid est conçu pour des vitesses de 430 km/h et parcourt une distance de 60 kilomètres en environ 8 minutes. Les adhésifs hautes performances utilisés, fonctionnent correctement.

Une combinaison optimale entre les conditions aérodynamiques et le poids a été réalisée pour le 'Transrapid' par des méthodes hybrides modulaires de construction. Par exemple, le module du front avant en plastique renforcé par des fibres verre (GRP) qui est conçu pour maintenir la pression aérodynamique aussi bien que pour la stabilité sous des forces de vent en

travers de 500 km/h. est collée sur la structure en aluminium des locomotives avec les produits Sikaflex®.

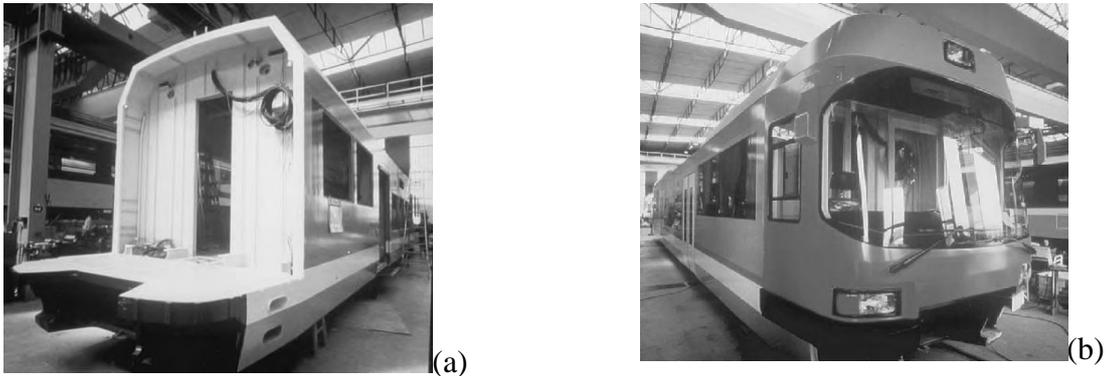


Figure I-31 : Trains modernes, une combinaison de verre, plastique et métaux légers assemblés par adhésifs. (a) : Front avant de la cabine ; (b) : front avant collé sur le train.

La technologie de l'adhésif élastique est utilisée dans d'autres secteurs de l'industrie, comme l'agro alimentaire, l'électroménager, le nautisme, le bâtiment et bien d'autres applications. Aujourd'hui, La nécessité de démonter et séparer les pièces collées sans difficulté devient une exigence de plus en plus importante.

I-6 Comparaisons entre les assemblages ponctuels et le collage structural

A cet instant de notre travail, nous avons envisagé de comparer ces deux techniques d'assemblage. Pour cela nous avons choisi de donner les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles dans le but de justifier ou non de la réalisation d'un assemblage structural en substitution d'un assemblage ponctuel.

I-6-1 Avantages et inconvénients du collage

I-6-1.1 Avantages

- Le collage est une technique d'assemblage performante et les avantages sont nombreux. Cette technique est utilisée par de nombreuses industries : automobile, bâtiment, électroménager, électronique, loisirs, aéronautique, mécanique ...
- Le collage est une technique universelle puisqu'à priori il est possible de tout coller, si nous conditionnons convenablement les surfaces à assembler. Le collage altère peu les substrats puisque seul le traitement de surface des substrats intervient (dans le sens où le décapage dégrade la surface mais moins que le perçage).

- Le collage permet d'obtenir une meilleure répartition des contraintes, due au transfert de charge continu (Figure I-32). Ceci implique une meilleure tenue aux chocs, aux vibrations.
- Le collage permet d'assembler des matériaux composites, sans en rompre les fibres.
- Le collage diminue le risque de corrosion galvanique entre deux métaux différents.
- Le collage permet de réduire le poids de la structure assemblée (comparée à une structure boulonnée).
- Le collage peut avoir en plus de sa fonction d'assemblage un rôle d'étanchéité (mastic).
- Le collage permet d'obtenir des structures lisses (avantage aérodynamique).
- Le collage permet d'assembler entre eux des matériaux différents sans précaution particulière (corrosion).

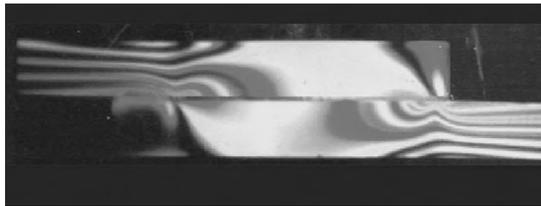


Figure I- 32 : Photo élasticité du joint collé [BUR06].

I-6-1.2 Inconvénients

- Les colles ont une tenue limitée en température. Dans le cas du ferroviaire, l'intervalle de température de travail est -50°C $+70^{\circ}\text{C}$.
- Le collage résiste parfois mal au vieillissement humide. L'humidité diminue l'adhésion en s'infiltrant aux interfaces ; elle dégrade aussi la résine et diminue ses performances mécaniques. Il convient donc d'isoler la zone collée par un joint étanche.
- Le collage exige une préparation des surfaces soignée et précise, ce qui peut être contraignant dans une chaîne d'assemblage.
- Le temps de prise des colles peut être incompatible avec les cadences industrielles.
- Le collage ne permet pas un démontage aisé des structures assemblées. Les techniques utilisées (chauffage, refroidissement, utilisation de solvant, cisaillement) peuvent altérer les substrats.
- Les colles possèdent une mauvaise conductivité électrique pour évacuer les courants de Foucault sur avion.

- L'épaisseur de colle doit être maîtrisée au niveau de l'assemblage, afin d'augmenter la tenue de l'assemblage obtenu. Cette maîtrise représente une contrainte industrielle supplémentaire.

I-6-2 Avantages et inconvénients des assemblages ponctuels

I-6-2.1 Avantages

- L'assemblage ponctuel est une technique d'assemblage rapide et précise, du moins quand il est bien maîtrisé.
- Il permet un contrôle aisé et maîtrisé des structures assemblées.
- Il permet d'assembler tout type de matériaux.
- L'assemblage ponctuel autorise un transfert de charge élevé, pour des substrats épais.
- Il permet d'obtenir un assemblage de bonne conductivité électrique.

I-6-2-2 Inconvénients

- L'assemblage ponctuel altère les substrats, du fait du perçage. Il y a concentration de contraintes au niveau du trou, ce qui augmente les risques de fissures (Figure I-33). Le repérage de ces fissures n'est possible qu'une fois leur taille dépassant la tête de vis.
- Il ne permet pas d'obtenir des joints étanches, d'où la nécessité d'ajouter, par exemple, du mastic.
- L'obtention de surfaces lisses, n'est possible qu'avec des éléments spécifiques, telles les vis à têtes fraisées.



Figure I- 33 : Photo-élasticité d'une liaison boulonnée [BUR06].

I-7 Récapitulatifs et conclusions

Dans ce chapitre et à travers la recherche bibliographique dans les domaines des assemblages structuraux et les techniques d'assemblages pratiquées dans l'industrie, nous avons essayé d'éclairer le travail à réaliser dans le cadre de cette thèse. En partant de l'objectif principal qui concerne l'optimisation des assemblages des coffres de traction nous avons essayé

dans un premier temps de comprendre les différentes techniques d'assemblages traditionnellement utilisées dans les ateliers de fabrication d'ALSTOM Transport à Tarbes.

Dans presque toutes les études qui ont été réalisées dans ce domaine, nous avons remarqué que la configuration en simple recouvrement des joints était la plus utilisée autant pour les essais de caractérisation que pour la modélisation numérique. Cette configuration est d'autant plus intéressante que les joints en simple recouvrement sont sollicités à la fois en cisaillement et en pelage ce qui représente un bon moyen pour évaluer nos études.

Chapitre II : Assemblages ponctuels

II-1 Introduction

La structure du coffre de traction (figure II-1), qui est un ensemble de pièces métalliques, est assemblée actuellement par la technologie d'assemblage ponctuel, en utilisant des éléments de fixation mécanique, des boulons (vis + écrou) et des rivets (tige + bague sertie).

Ce chapitre sera consacré à l'étude du comportement mécanique de ces différents types d'assemblages. Pour cela nous nous situerons à l'échelle d'une liaison mécanique élémentaire représentative des liaisons présentes dans le coffre. Cette liaison sera constituée de deux plaques du même matériau que celui du coffre et d'un élément de fixation, le tout constituant un pas de fixation. Nous présenterons dans ce chapitre une approche expérimentale de la liaison et une approche numérique basée sur une modélisation par éléments finis.

Afin de mieux comprendre le comportement de la liaison, il est nécessaire de commencer par étudier le comportement du matériau utilisé dans la fabrication du coffre. Nous pourrons alors par la suite, analyser le comportement en statique et en dynamique de la liaison élémentaire à travers des éprouvettes standardisées et de dimensions inspirées des liaisons du coffre.

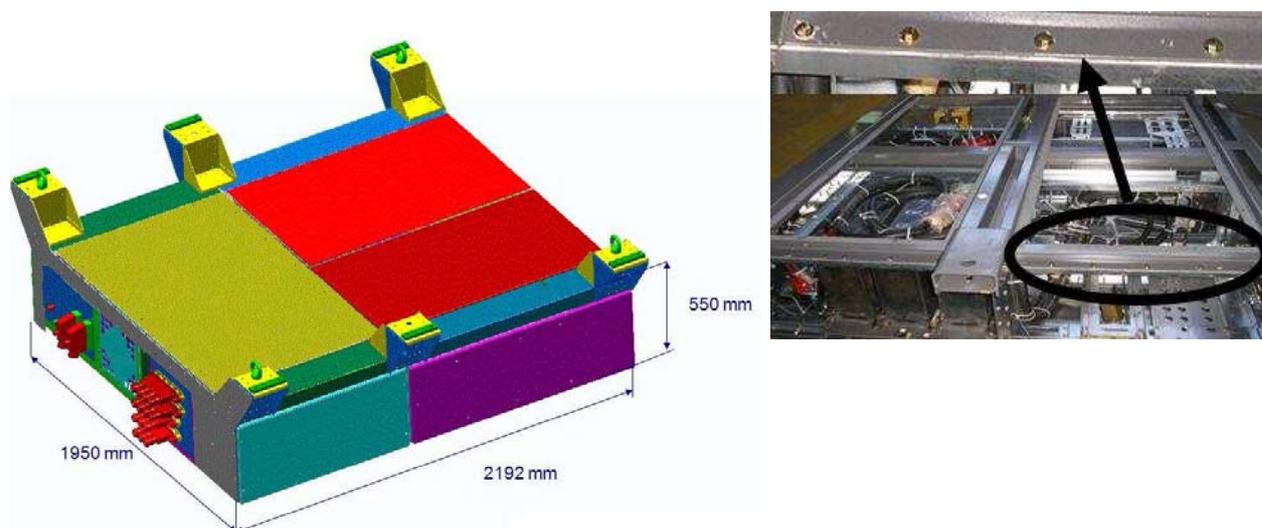


Figure II-1 : Coffre de traction d'un AGV (Automotrice Grande Vitesse).

Les multiples objectifs de ce chapitre sont les suivants :

- effectuer des campagnes d'essais quasi-statiques et dynamiques rapides en sollicitant des assemblages ponctuels unitaires en traction et en traction-cisaillement, afin d'en extraire les niveaux d'efforts, de déplacements, et de déformations plastiques, ainsi que les modes de ruine associés et les seuils de vitesse de déformation.

- simuler les sollicitations et valider ainsi les lois de comportement identifiées jusqu'à la rupture pour les deux types de sollicitation.
- extraire les informations nécessaires à l'alimentation des modèles macro-géométriques utilisés pour la simulation de structures industrielles (Figure II-2) lorsque les modèles seront validés.
- exploiter les résultats numériques et expérimentaux pour déterminer les rigidités des liaisons, et les comparer avec celles calculées à partir des formules (issues de la littérature) présentées dans le chapitre I.

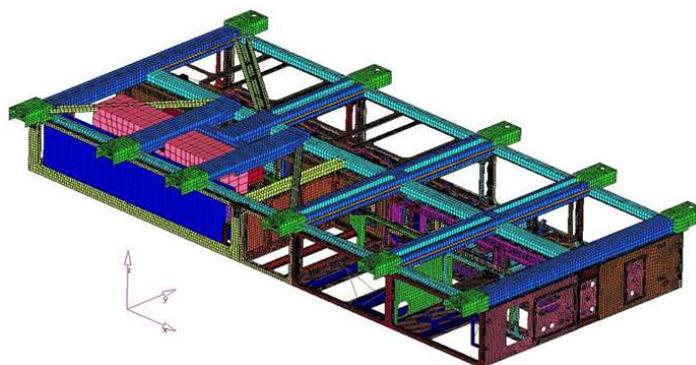


Figure II-2 : Coffre de traction (modèle numérique).

II-2 Les différents types d'éléments de fixation utilisés

L'assemblage actuel d'un coffre de traction se fait à l'aide de vis ou de rivets. Les différentes technologies utilisées sont les vis autorouleuses ou autoformeuses et les rivets avec bague à sertir. Les spécificités de chacune de ces technologies sont présentées en suivant.

II-2-1 Vis autorouleuse

Lors de l'opération de pose, la vis autorouleuse réalise par déformation plastique et sans découper la matière, son taraudage dans une des deux tôles à associer (Figure II-3). De ce fait ce processus d'assemblage nécessite la préparation des tôles à assembler. Elles sont en effet percées avec deux diamètres différents, 7 mm pour la tôle du côté de la tête de vis et 5,3 mm pour la tôle dans laquelle la vis vient s'autotarauder. Ces dimensions sont imposées pour une utilisation de vis M6. En principe la vis autorouleuse est utilisée sans écrou car la tenue mécanique est assurée par le taraudage formé dans l'une des tôles à assembler. Le coffre en service supportant des sollicitations de vibration et de choc, un écrou est ajouté pour donner plus de rigidité et sécuriser ainsi la liaison. Le vissage est effectué à l'aide d'un pistolet relié à un

compresseur hydraulique qui fournit une pression d'utilisation de 400 bars. Le couple de serrage est contrôlé par clé dynamométrique.

Comme le coffre de traction est une structure qui accueille des composants électroniques et électriques, il est nécessaire d'ajouter un film de colle entre les deux tôles, afin d'assurer l'étanchéité et de ne pas laisser l'eau s'infiltrer à travers les éléments de fixation. Actuellement une colle polyuréthane, présentant de faibles caractéristiques mécaniques, est utilisée.

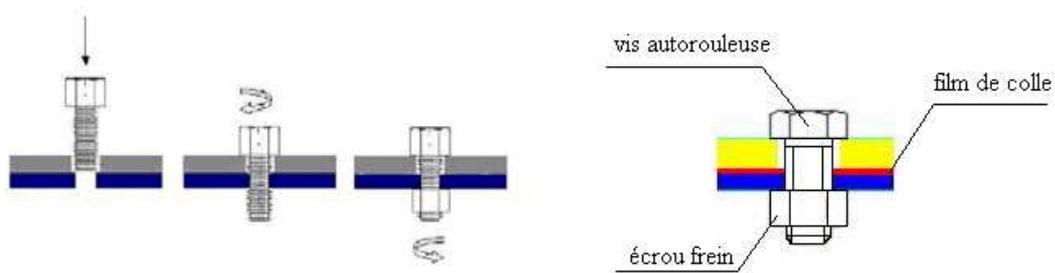


Figure II-3 : Vis autorouleuse et processus du montage.

II-2-2 Rivet avec bague à sertir (Magna-grip®)

La deuxième technologie utilisée pour assurer l'assemblage de certains coffres de traction est le rivetage. Dans notre cas, nous utilisons un rivet à bague à sertir possédant le nom commercial Magna-grip® (Figure II-4).

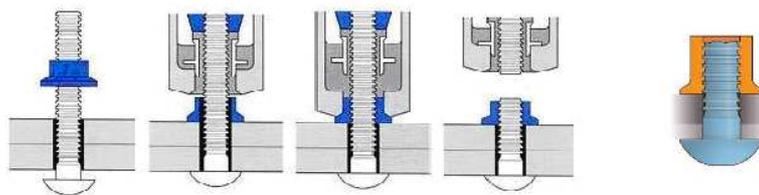


Figure II-4 : Rivet Magna-grip®.

Ce système de fixation propose une plage de serrage beaucoup plus large que les fixations standards pour la réalisation rapide d'assemblages résistants aux vibrations. La tige à bague de sertissage Magna-grip® remplit la bague de fermeture et se rompt sans dépassement de la bague. Les tôles assemblées avec cette technique sont trouées avec le même diamètre, soit 6,2 mm pour un rivet de diamètre 6.

II-3 Comportement des matériaux utilisés

Le matériau utilisé actuellement dans la construction de la charpente du coffre de traction est le galfan[®] (Acier revêtement zinc 95 %, 5% aluminium). Sa désignation est D X 52D + ZA / 1.0350 + ZA. Le galfan[®] est couvert par une couche organique « Easyfilm[®] S » lors de sa fabrication pour éviter l'apparition de rouille blanche pendant le stockage [ARC08]. Dans le tableau II-1 ci-dessous sont présentées les caractéristiques fournisseur des tôles du galfan[®] utilisé :

Module d'Young E (GPa)	Coefficient de Poisson ν	Limite élastique Re (MPa)	Résistance à la rupture Rm (MPa)	Épaisseur (mm)
200	0,3	220	270 → 420	2 et 3

Tableau II-1 : Caractéristiques mécaniques du galfan[®].

Afin d'identifier le comportement du galfan[®] dans les domaines élastique et plastique nous avons effectué des essais de traction sur des éprouvettes rectangulaires de dimensions 50x20x2 mm³. Ces essais ont été réalisés sur une machine de traction INSTRON 5500 R pilotée en déplacement à la vitesse de 2 mm/min. La mesure de la déformation a été réalisée par extensométrie dans le domaine élastique et par stéréo-corrélation d'images dans le domaine plastique [TOU96].

II-3-1 La corrélation d'images

La corrélation d'images provenant d'une seule caméra, permet la mesure de champs de déplacements d'une surface plane. Après enregistrement d'une séquence d'images d'un objet qui subit des déformations planes, les déplacements des points à la surface de l'objet sont calculés sur le principe suivant. Étant données deux images correspondant à deux états de déformation d'un objet (Figure II-5-2), pour déterminer le correspondant d'un pixel de la première image dans la seconde, on mesure la ressemblance entre deux pixels en calculant un score de corrélation (critère de ressemblance) déterminé sur leur voisinage. L'appariement d'images acquises par une seule caméra, à des instants différents, sur un objet qui se déforme est appelé appariement temporel, de suivi de pixel ou de tracking. De par son principe, la technique de corrélation ne peut fonctionner correctement qu'avec des objets présentant une surface avec une texture suffisamment aléatoire. Si l'objet n'est pas naturellement texturé ou si sa texture n'est pas suffisamment discriminante, différentes techniques existent pour permettre l'utilisation de la corrélation dont la projection de peinture (technique dite du mouchetis).

Une caméra CCD permet d'acquérir des images numériques avec une définition de 1280 par 1024 pixels. Ces images sont ensuite traitées avec le logiciel ARAMIS (GOM France). Avec ce dispositif, il est possible de mesurer les déplacements et les déformations à la surface d'un objet avec une résolution de 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ en déformations. Le logiciel Aramis est capable de reconnaître les points d'une image par analyse des niveaux de gris. Cela est rendu possible grâce à l'application sur l'objet à mesurer de peintures blanche et noire qui forment des niveaux de gris variables sur la surface de l'objet. A chaque pixel des capteurs CCD correspond une valeur de niveau de gris codée sur 8 ou 12 bits. Une suite de plusieurs pixels pris sur une même ligne forme une séquence de niveaux de gris appelée distribution de niveaux de gris. Le principe fondamental réside dans le fait que les distributions ne varient pas au cours de la déformation de l'objet. Il suffit donc de suivre ces distributions de niveaux de gris dans leur mouvement pour avoir les déplacements de l'objet. En pratique, cela est rendu possible grâce à des domaines de corrélation qui sont des zones regroupant $n \times n$ pixels.

Sur la figure ci-dessous (Figure II-5-2) nous avons 4 images qui présentent l'évolution du champ de déplacement au milieu de la plaque jusqu'à la rupture (d).

Le comportement du matériau est présenté par une courbe contrainte-déformation, pour laquelle, les charges appliquées sont enregistrées directement via la machine de traction alors que les déformations correspondantes sont celles du point le plus chargé sur l'axe X.

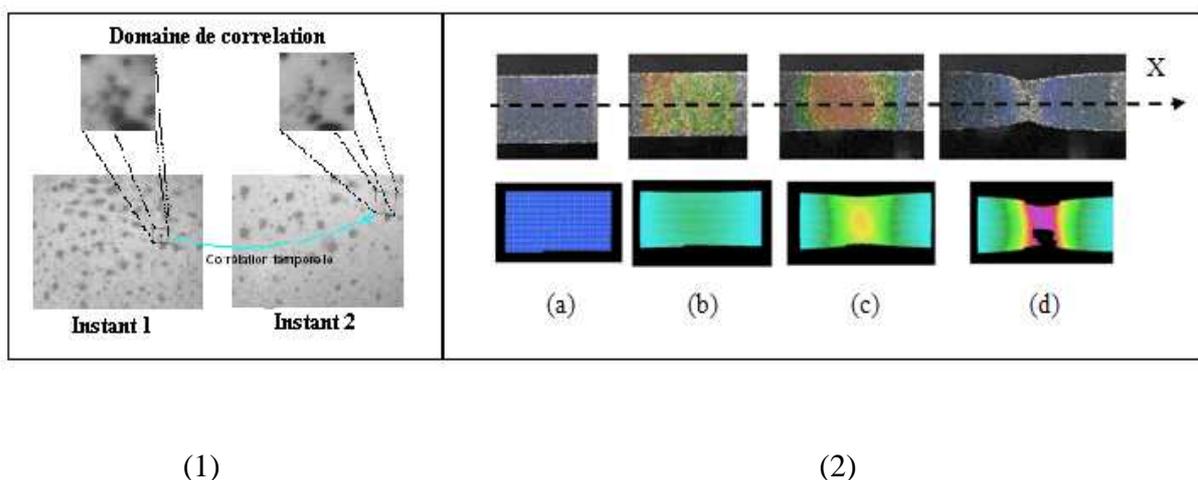


Figure II-5 : (1) : Corrélation d'images; (2) : champs des déformations au milieu de la plaque.

II-3-2 Résultats

Les courbes ci-dessous (Figure II-6) présentent le résultat expérimental validé par un modèle éléments finis réalisé à l'aide du code de calculs ABAQUS 6.5. Pour cette modélisation

numérique la géométrie et les caractéristiques matériaux sont bien entendu celles de l'éprouvette, les conditions aux limites celles de l'essai et le chargement est suffisant pour reproduire le même comportement que lors de l'essai de traction. L'intérêt de cette modélisation numérique est de permettre, par la suite, de valider la loi adoptée pour le galfan[®] lors de la modélisation des différents assemblages. La loi de comportement utilisée dans les modèles numériques est une loi élastoplastique implémentée de la manière suivante :

- la partie linéaire de la loi est alimentée par le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν (tableau II-2).
- La partie non linéaire est alimentée par les contraintes vraies et les déformations plastiques (Figure II-6, courbe plastique) sous forme d'un tableau téléchargé à partir d'un fichier texte. Les contraintes et les déformations plastiques sont calculées à partir des contraintes et des déformations nominales obtenues en expérimentation (Figure II6, courbe EXP-nominale) en utilisant les formules suivantes :

$$\sigma_{\text{vraie}} = \sigma_{\text{nom}} (1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (\text{II-1})$$

$$\varepsilon_{\text{vraie}} = \ln (1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (\text{II-2})$$

$$\varepsilon^{\text{pl}} = \varepsilon^{\text{total}} - \sigma_{\text{vraie}} / E \quad (\text{II-3})$$

Nous pouvons voir sur la Figure II-6 que les deux courbes sont très proches, ce qui nous permet de valider notre modélisation numérique du galfan[®], et ainsi d'envisager le passage vers la modélisation de l'assemblage. Nous pouvons alors alimenter le code de calcul de valeurs caractéristiques de notre matériau qui rendront compte des changements de caractère et de comportement.

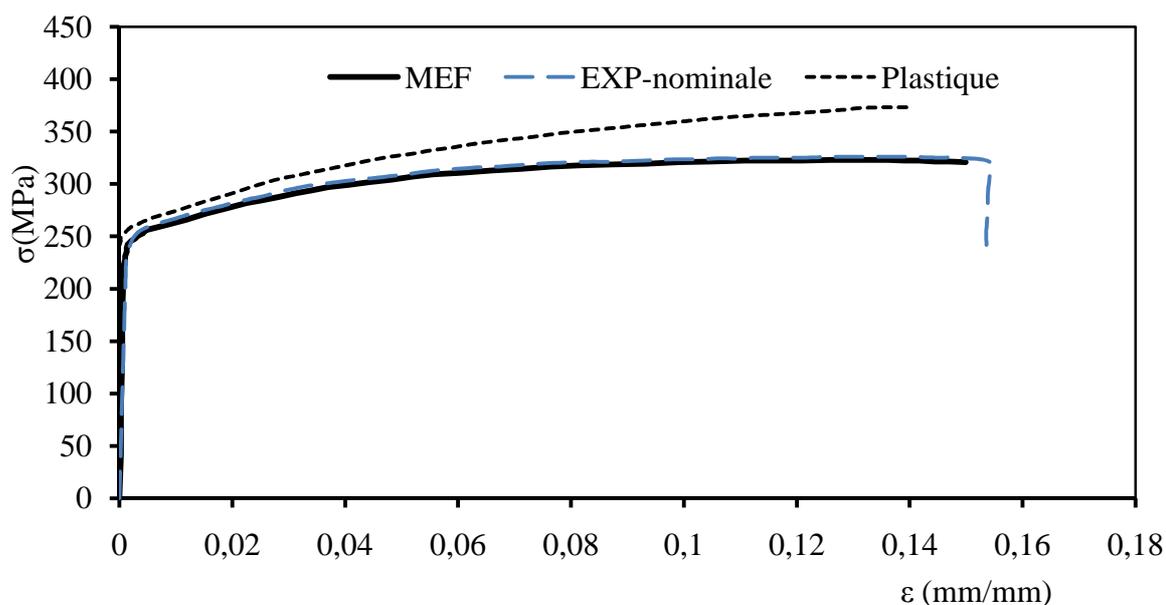


Figure II-6 : Courbes contrainte-déformation expérimentale et numérique.

Le tableau II-2 présente les différentes caractéristiques obtenues expérimentalement.

Module d'Young E (GPa)	Coefficient de Poisson ν	Limite élastique Re (MPa)	Contrainte à la rupture Rm (MPa)
195 ± 5	0,3	240 ± 5	318 ± 10

Tableau II-2 : Caractéristiques du galfan[®] obtenues par essais expérimentaux.

II-4 Approches expérimentale et numérique en statique

L'étude statique a pour but d'identifier le comportement de la liaison dans les domaines élastique et plastique et jusqu'à la rupture. Or, dans le milieu ferroviaire, les assemblages sont principalement soumis à deux sollicitations : le cisaillement et la traction par rapport à l'élément de fixation. Pour chacune de ces sollicitations des essais ont été menés afin d'identifier les processus et les modes de ruine des assemblages.

Nous avons alors du définir deux géométries d'éprouvette ; une, adaptée au cisaillement de l'élément de fixation et l'autre, adaptée à la traction de l'élément de fixation. Cette étape est nécessaire pour pouvoir comparer les différentes technologies et pour ensuite optimiser le processus d'assemblage. Les essais ont été menés sur des éprouvettes assemblées en utilisant les deux technologies présentées en début de chapitre, soit : la vis autorouleuse et le rivet magna grip[®].

L'étude numérique a pour but de retranscrire au plus près le comportement en traction et en cisaillement de la liaison élémentaire. L'objectif est de pouvoir ensuite étendre cette

modélisation à des liaisons multi éléments et de réaliser ainsi un système d'aide à la conception utilisable au bureau d'étude.

II-4-1 Étude expérimentale

II-4-1.1 Objectifs

Afin d'étudier les comportements mécaniques des liaisons ponctuelles de joints en double plaques, nous avons réalisé une campagne d'essais statiques sur des joints sollicités en cisaillement et en traction. Ces essais seront utilisés pour valider les modèles numériques en 3D créés sur le logiciel ABAQUS 6.5 directement sur son interface graphique CAE.

L'objectif de ces essais est de déterminer les limites mécaniques de l'utilisation de ces types de liaisons à l'échelle unitaire afin de mieux maîtriser et d'optimiser la structure complète à l'échelle du coffre de traction. Il est en effet très intéressant de connaître pour chacun des deux types de sollicitation les limites élastiques de la liaison pour concevoir les structures de façon sécuritaire. Pour pouvoir recalibrer par la suite les modèles numériques que nous développerons, nous avons eu comme objectif de générer une base de données expérimentale.

II-4-1.2 Géométrie et mise en œuvre

Les essais ont été effectués sur des joints à simple recouvrement (Figure II-7). Ces joints sont assemblés par des éléments de fixation dans une configuration qui confère à l'assemblage un comportement mixte d'assemblage boulonné et d'assemblage vissé (cas de l'assemblage par vis autorouleuse et écrou frein), et dans une configuration de rivetage par des rivets Magna-grip[®] à bagues à sertir. La géométrie des éprouvettes testées figure en annexe 1.

L'installation des joints en traction sur la machine d'essai est faite à travers deux supports (Figure II-7-a) qui assurent la continuité de l'application de la charge sur la liaison. Les éprouvettes en U sont fixées sur ces supports par deux boulons M10. Les joints en cisaillement sont équipés de talons afin de rattraper les épaisseurs des plaques de chaque côté (Figure II-7-b) et atténuer ainsi l'apparition de sollicitation parasite en flexion. Afin de représenter au mieux les conditions d'utilisation industrielle, les deux types d'éprouvettes sont assemblés par des éléments de fixations M6 avec un même couple de serrage (6 N.m) pour les vis autorouleuses et par des rivets de diamètre 6 mm pour les Magna-grip[®].

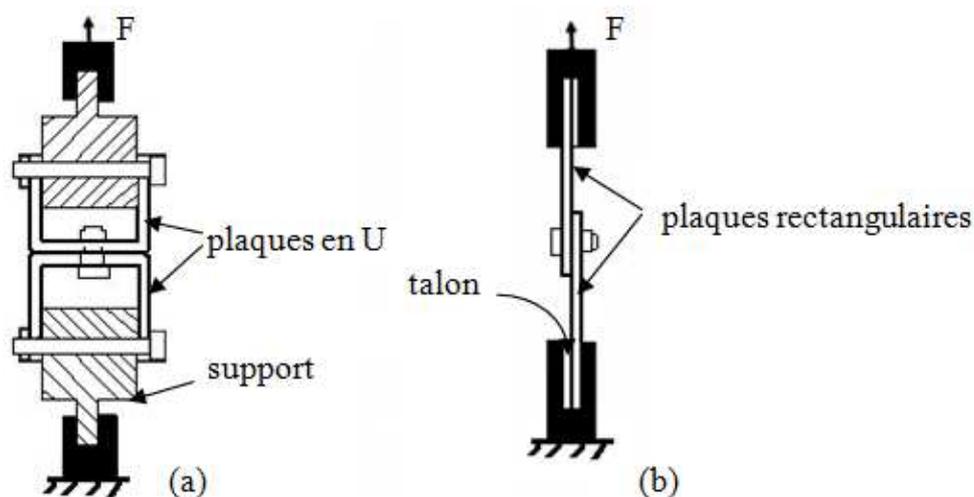


Figure II-7 : Sollicitation de l'élément de fixation : (a) en traction; (b) en cisaillement.

II-4-1.3 Conditions d'essais

Les essais ont été réalisés sur une machine de traction INSTRON 5500 R pilotée en déplacement avec une vitesse de 2 mm/min. Cette vitesse lente a été choisie pour bien observer les différentes étapes durant les essais. Avant le lancement de chaque essai il faut assurer l'alignement de l'éprouvette par rapport aux mors de la machine de traction, et le serrage des mors sur les supports (éprouvette en traction), et sur l'ensemble plaques-talons (éprouvette en cisaillement) afin d'éviter les glissements de l'éprouvette dans les mors.

II-4-1.4 Essais statiques

II-4-1.4.1 Essais préliminaires sur différents assemblages utilisant la vis autorouleuse

L'assemblage utilisant les vis autorouleuses met en jeu différents éléments : la vis, l'écrou et la colle. La colle utilisée dans l'assemblage du coffre de traction est une colle polyuréthane fabriquée par la société Sika Industry[®] et commercialisée sous le nom « sikaflex 221 ». Ses caractéristiques sont présentées en annexe 2. Même si l'utilisation d'un écrou n'est, de l'avis du constructeur pas nécessaire, nous avons estimé utile de le conserver car il rigidifie l'assemblage et le sécurise. Par contre, le film de colle a pour vocation première d'assurer l'étanchéité de l'assemblage, mais qu'en est-il de son influence sur le comportement mécanique ?

Nous avons alors entrepris d'effectuer une étude comparative de différentes éprouvettes assemblées par ce procédé. Trois types d'éprouvettes ont été réalisés et sollicités en cisaillement. Ces trois types sont :

Type 1 : Assemblage avec vis autorouleuse et écrou frein

Type 2 : Assemblage avec vis autorouleuse, écrou frein et film Sikaflex 221

Type 3 : Assemblage avec film Sikaflex 221.

Le tableau II-3 ci-dessous résume la procédure expérimentale :

Type d'assemblage	Essai	code	Nombre d'essais
Vis +Erou (type 1)	Cisaillement	MVEC	5
Vis + Erou + Colle (type 2)	Cisaillement	MVECC	5
Colle (type 3)	Cisaillement	MCC	5

Tableau II-3 : Type et codage des assemblages.

Les résultats des essais réalisés sur ces différentes éprouvettes sont présentés sur la figure II-8. Nous pouvons constater très rapidement que le Sikaflex 221 a une influence négligeable sur le comportement en cisaillement de l'assemblage. En effet les éprouvettes de Type 3 supportent une charge maximale d'environ 1,8 kN bien plus faible que celle atteinte par les éprouvettes Type 1 et Type 2.

Il ressort alors de cette étude comparative que le système vis-écrou est l'élément prépondérant dans la tenue en cisaillement de notre assemblage. Pour la suite, nous ne prendrons pas en compte le film Sikaflex 221 pour l'étude du comportement de nos assemblages.

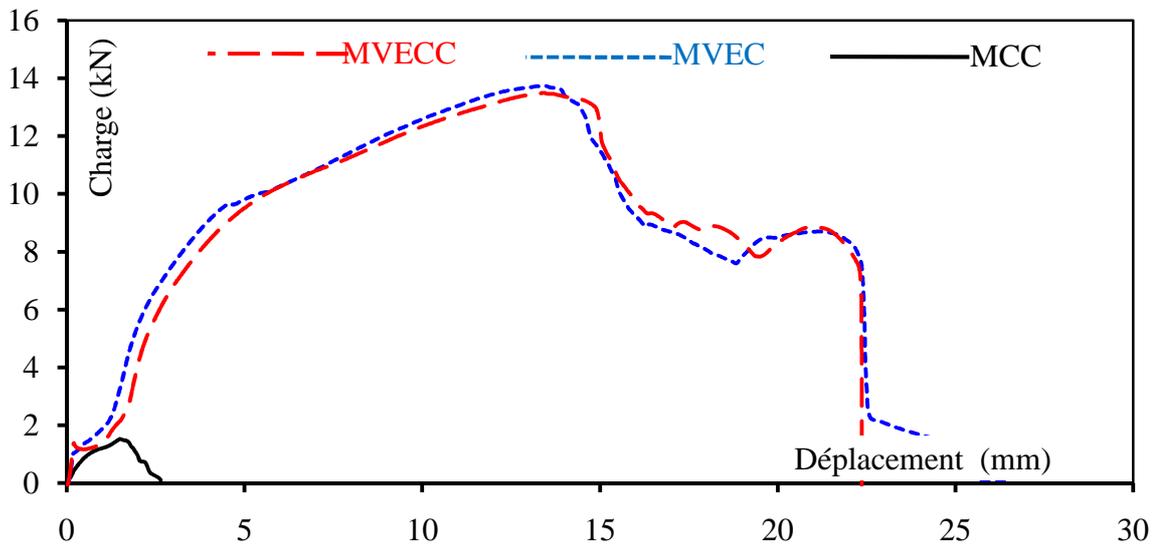


Figure II-8 : Etude comparative des assemblages par vis autorouleuse en cisaillement.

II-4-1.4.2 Essais statiques sur joints assemblés par vis autorouleuse

L'étude expérimentale préliminaire nous a permis de comprendre l'influence des différents composants de la liaison dans sa tenue mécanique. Nos éprouvettes seront maintenant composées de deux tôles, une vis et un écrou. L'objectif est maintenant de comprendre le rôle des différents composants lors des essais de cisaillement et de traction. Enfin, nous comparerons cette technique d'assemblage avec le rivetage (rivet magna- grip®).

A- Sollicitation en cisaillement

Le tableau II-4 présente le comportement du joint en cisaillement pour différents niveaux de charge. On peut ainsi retrouver les phases présentées précédemment (chapitre I, § I-4-5.1) essais mécaniques sur des joints boulonnés ou rivetés) avec l'adaptation de la liaison par glissement des plaques, le transfert de charge par élément de fixation et la flexion secondaire des plaques traduite par la rotation de l'élément de fixation.

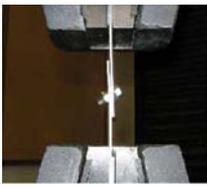
Charge (kN) / Déplacement (mm)	4 / 0.5	8 / 2	13.5 / 12 (la rupture)
Configuration			
Essai			

Tableau II-4 : Essai de cisaillement.

L'analyse des courbes de cisaillement (Figure II-9) montre une bonne reproductibilité de comportement et on peut à nouveau identifier les différentes phases présentées précédemment. Ainsi on retrouve dans la zone 1 le glissement des plaques et le transfert de charge sur l'élément de fixation et sur la zone 2 l'arrachement de l'élément de fixation. Lors de la réalisation de ces essais, nous n'avons jamais obtenu de rupture de l'élément de fixation. Dans tous les cas la tôle s'est déchirée et la rupture est survenue dans la partie dans laquelle la vis s'était autotaraudée. Il faut noter que la fin de l'essai se résume à arracher l'élément de fixation. La section de contact sous l'écrou étant plus faible que sous la tête de la vis, ce résultat est parfaitement logique. Nous observons une déformation très importante des tôles autour de la perforation.

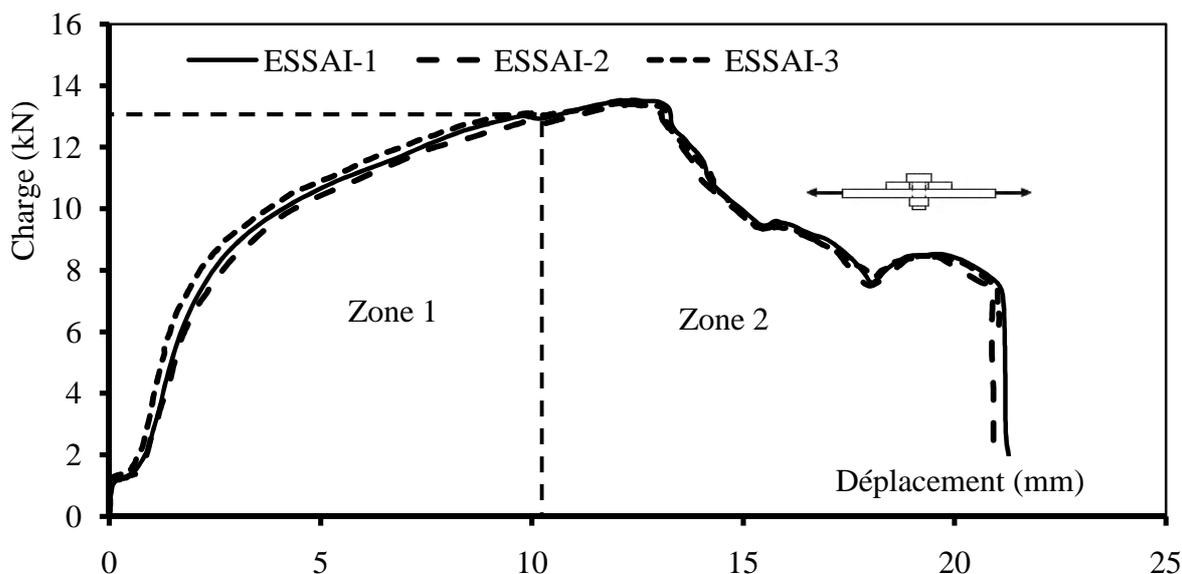


Figure II-9 : Courbes charge-déplacement obtenues en cisaillement.

B- Sollicitation en traction

Le tableau II-5 montre le comportement de l'assemblage pour différents niveaux de sollicitation en traction. On peut voir lors de ces essais (Figure II-10) une très grande déformation des tôles et la rupture de la liaison se fait par déboutonnage de l'écrou. L'élément de fixation ne semble jamais endommagé.

Nous avons également pu constater que sous ce type de sollicitation la rupture apparaît encore dans la partie dans laquelle la vis s'est autotaraudée, ce qui peut toujours être associé au fait que la section de contact sous l'écrou est plus faible que sous la tête de la vis. Une propagation de fissure activée par une discontinuité géométrique importante dans la base de l'écrou au contact de la tôle conduit à l'arrachement d'une couronne circulaire autour de la perforation de la tôle lors du déboutonnage.

Charge (kN)	2	3.5	10.7 (la rupture)
Déplacement (mm)	0.78	1.8	31
Essai			

Tableau II-5 : Essai de traction.

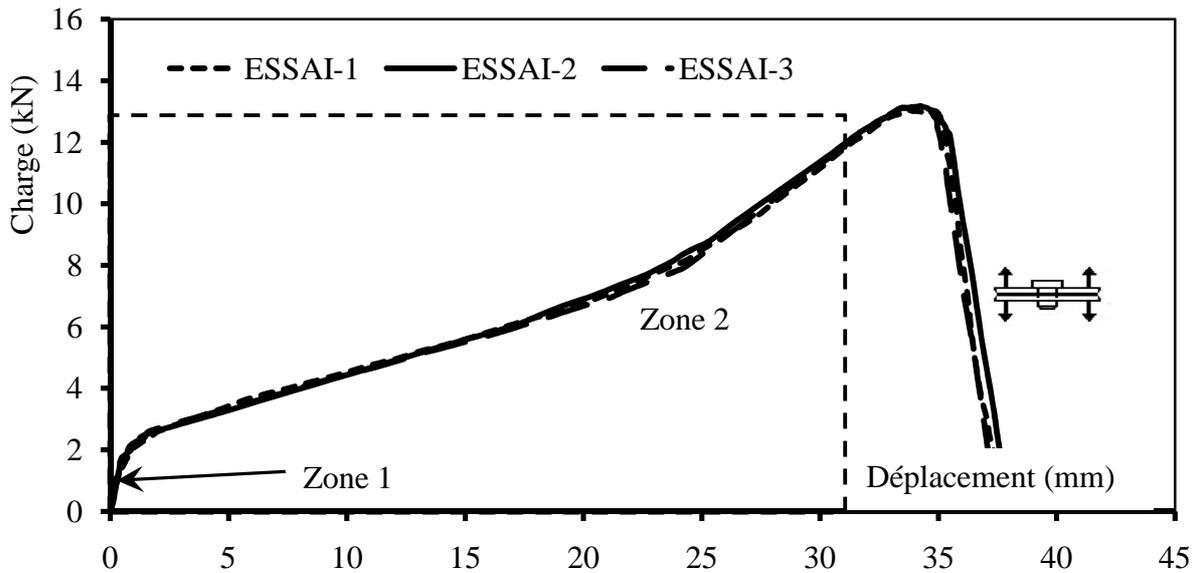


Figure II-10 : Courbes charge-déplacement obtenues en traction.

Nous noterons sur la figure II-10, la bonne reproductibilité des essais et l'identification de 2 zones, une première correspondant en quelque sorte à la partie élastique de l'assemblage, la deuxième correspondant à la fissuration de tôles sous les effets de la traction jusqu'à l'arrachement de l'élément de fixation.

II-4-1.4.2 Etude expérimentale comparative : vissage/boulonnage et rivetage.

Maintenant que nous avons traité expérimentalement la technique d'assemblage par vis autorouleuse et écrou frein, nous avons choisi de comparer son comportement en statique avec la technique d'assemblage par rivetage (rivet magna-grip®). Les courbes ci-dessous (Figure II-11 et Figure II-12) présentent les réponses effort-déplacement des assemblages riveté et boulonné.

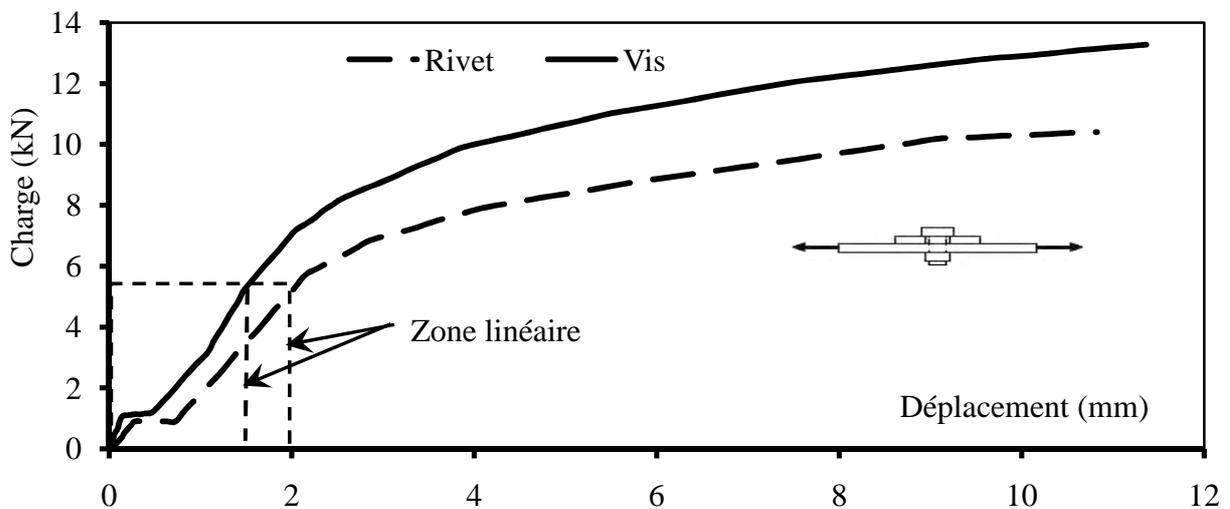


Figure II-11 : Courbes effort-déplacement en cisaillement.

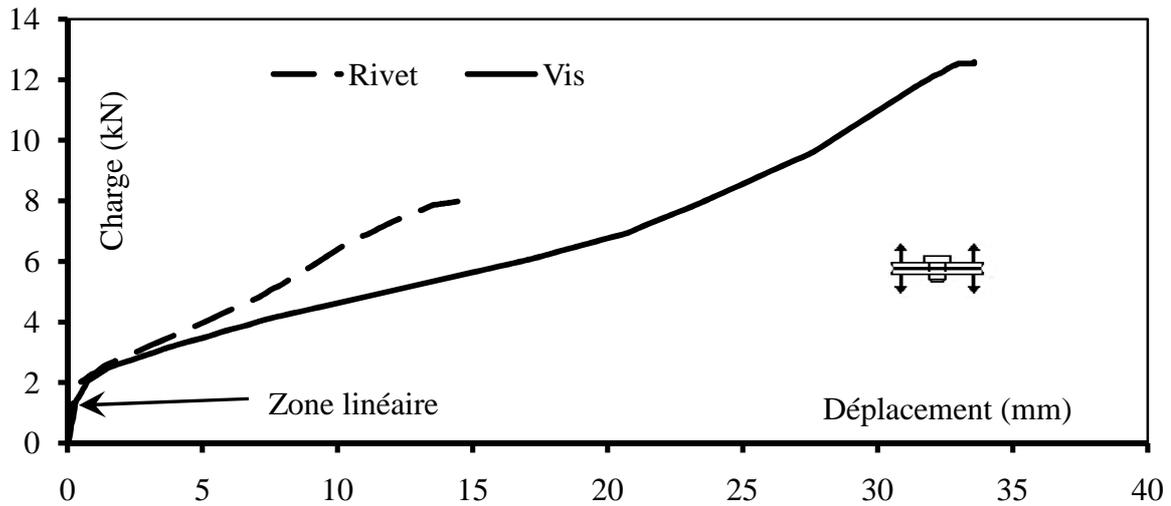


Figure II-12 : Courbes effort-déplacement en traction.

Nous pouvons remarquer sur ces deux courbes un comportement assez analogue pour les deux solutions d'assemblage, notamment dans la zone linéaire identifiée sur chacune des courbes. Tant pour la solution boulonnée que pour la solution rivetée nous pouvons remarquer en cisaillement une première zone de mise en place de la liaison dans laquelle les tôles ont un glissement relatif jusqu'à la mise en contact de l'élément de fixation. Suit ensuite une réponse linéaire correspondant à la reprise des sollicitations par les tôles, d'où des pentes de courbes voisines et enfin l'arrachage de la liaison. La solution rivetée est alors en dessous du fait de dimensions de tête plus faibles donc de section « travaillante » moins importante.

De même pour l'essai de traction, le début d'essai est le même, ce qui est expliqué par le fait que ce sont les tôles qui travaillent, ensuite il y a divergence de comportement toujours en raison des dimensions différentes des éléments de fixation mais également du fait du procédé d'assemblage qui précontraint la solution rivetée.

Dans tous les cas, la zone d'étude nous intéressant est la partie linéaire des courbes de comportement. En effet il n'est pas envisageable pour une liaison en service de sortir de cette zone car la plastification (irréversible) de la liaison n'est pas tolérable.

II-4-2 Étude numérique

Des modélisations numériques par des éléments finis pour les joints boulonnés ont été développées. Leur but est de permettre de définir le comportement local de ces types de jonction et en particulier d'accéder aux surcontraintes situées au bord du trou. De ce fait, nous pourrions affiner et vérifier les approches analytiques et mieux comprendre les résultats expérimentaux. Du fait du comportement analogue entre la solution vis et écrou et la solution rivet magna-grip[®] nous

avons choisi de nous focaliser sur la première qui est la plus utilisée par notre partenaire industriel.

II-4-2.1 Objectif

L'objectif est de recalculer un modèle numérique afin d'accéder d'une manière plus rapide à différentes informations sur l'assemblage telles que:

- Les contraintes et déformations en tout point de la liaison pour tout niveau de charge
- La limite élastique de l'assemblage
- L'endommagement jusqu'à la rupture

Nous voulons ainsi créer un modèle de « vis numérique » pouvant être utilisé pour d'autres configurations d'assemblage et ainsi nous affranchir d'autres campagnes expérimentales.

Le calcul est réalisé en analyse non linéaire (géométrie et matériau) à l'aide du code de calculs par éléments finis ABAQUS 6.5. L'objectif de cette analyse est de reproduire et de comprendre le comportement observé dans l'étude expérimentale. Nous avons, dans la construction des modèles numériques, utilisé les mêmes caractéristiques géométriques et matériaux des éprouvettes utilisées pour l'étude expérimentale.

II-4-2.2 Modélisation actuelle du coffre de traction

La simulation actuelle du coffre de traction réalisée par le bureau d'études d'ALSTOM est un modèle 2D linéaire développé sur le code des calculs ANSYS. Les tôles sont modélisées en coques Shell 63 [ANS05] et les éléments des fixations (boulons ou rivets) en éléments poutres, Beam4 ou Pipe16. La modélisation de la liaison est réalisée selon les codes d'ANSYS en couplant plusieurs nœuds sur une superficie équivalente à la surface de la tête de rivet ou de la vis (Figure II-13).

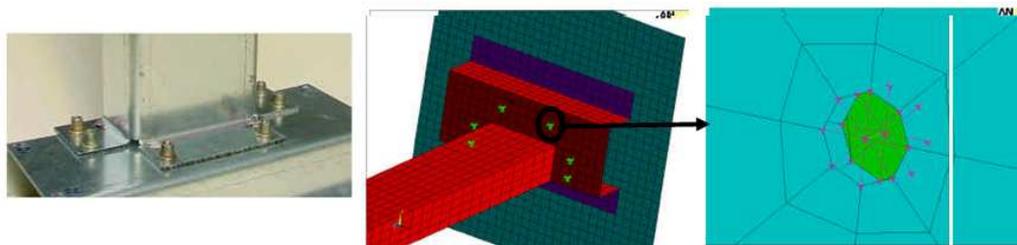


Figure II-13 : Modélisation de l'élément de fixation en 2D.

Ce modèle 2D du coffre où l'élément de fixation est représenté par un simple élément poutre ne donne pas toujours un résultat cohérent avec les résultats expérimentaux réalisés en vibrations et chocs selon la norme EN 61373 [RAI99]. C'est de cette constatation qu'est venu l'intérêt de créer des modèles non linéaires en 3D qui peuvent nous aider à dévoiler toutes les problématiques de la modélisation d'un élément de fixation et d'améliorer par la suite le modèle 2D à l'échelle du coffre de traction.

II-4-2.3 Modèles 3D non linéaires

Deux modèles ont été créés sur ABAQUS/CAE. L'un représente la modélisation de l'essai de cisaillement, l'autre la modélisation de l'essai de traction. Le module de CAO intégré permet de créer facilement les différentes pièces des modèles. ABAQUS/CAE permet également, à la fin de la création des modèles, la récupération de fichiers pré-processeur à l'extension .INP et offre la possibilité de modifier ou d'ajouter d'autres fonctionnalités particulières à nos modèles. Ces modèles ont été créés avec ces hypothèses :

- Modèles non linéaires statiques
- Large déplacement
- Contact avec frottement

II-4-2.3.1 Position du problème

La complexité de ces modèles est due à l'ensemble des phénomènes impliqués dans leur fonctionnement :

Les transferts de charge à l'endroit des contacts entre 2 milieux continus génèrent des déplacements. Les mouvements relatifs entre éléments font que ces contacts s'accompagnent de frictions (cas du cisaillement). Nous avons ainsi identifié 5 zones dans lesquelles le contact doit être considéré de manière différente (Figure II-14-a).

- Contact 1 : plan du joint
- Contact 2 : face interne de la tête de la vis
- Contact 3 : alésage
- Contact 4 : face interne de l'écrou
- Contact 5 : surface moyenne du filetage dans l'écrou.

Afin de simplifier la gestion des contacts et la construction des pièces, nous avons choisi de regrouper la vis et l'écrou dans une seule pièce (Figure II-14-b). Les éléments de contacts entre chaque couple de surfaces ont besoin de définir la surface maître (master, **M**) et la surface

esclave (slave, **S**) (Figure II.14-a), afin de décider la pénétration de la surface maître dans la surface esclave. En général, le matériau le plus rigide pénètre dans le matériau le moins rigide, ainsi dans notre cas c'est l'ensemble vis et écrou qui est le plus rigide [SAR06] [GUN08].

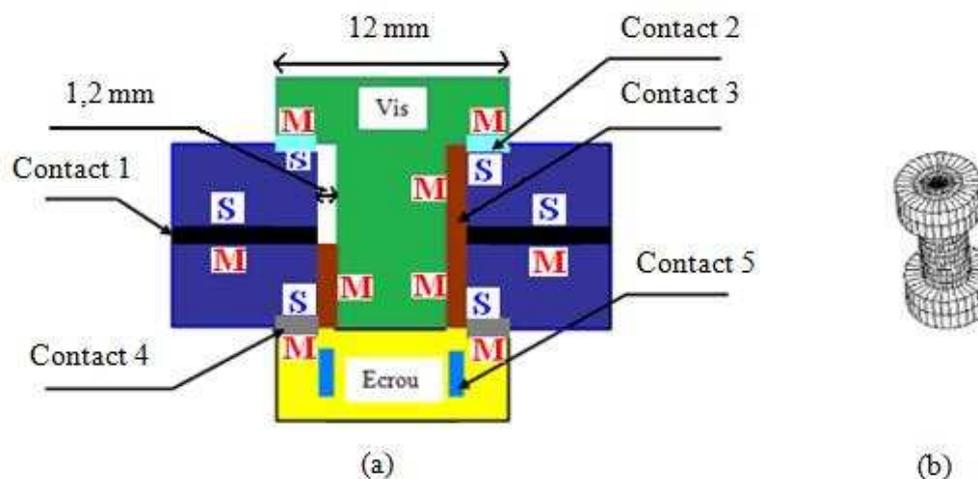


Figure II-14: (a) : Les différents contacts dans la liaison, (b) : l'ensemble vis écrou.

II-4-2.3.2 Caractéristiques des matériaux

La loi de comportement utilisée dans les modèles numériques est la loi élastoplastique déterminée à partir des essais réalisés précédemment, et où les données contraintes/déformations pour la partie plastique sont relevés par couple (contrainte ; déformation plastique). Le critère de plasticité choisi est le critère de Von Mises.

II-4-2.3.3 Le maillage.

Le maillage est présenté dans la figure II-15. Il est réalisé à l'aide d'éléments volumiques quadratiques à 8 nœuds avec intégration réduite C3D8R [ABA07].

La mise au point du maillage résulte de plusieurs itérations entre essais-calculs et l'optimisation de la densité de maillage. De ce fait, la zone située autour de l'élément de fixation se trouve affinée.

Nous avons alors pour le modèle de cisaillement 9252 éléments et pour le modèle de traction et 12545 éléments.

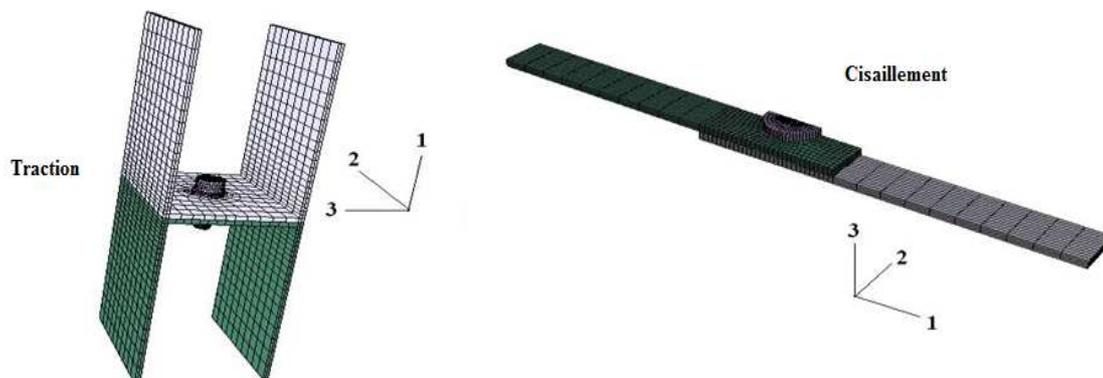


Figure II- 15 : Maillage des joints en traction, et en cisaillement.

II-4-2.3.4 Conditions aux limites.

Les conditions aux limites pour l'éprouvette en cisaillement sont reproduites de la manière suivante (Fig. II.16) :

- Encastrement de la face supérieure à une extrémité,
- Liaison glissière et chargement en traction à l'autre extrémité.

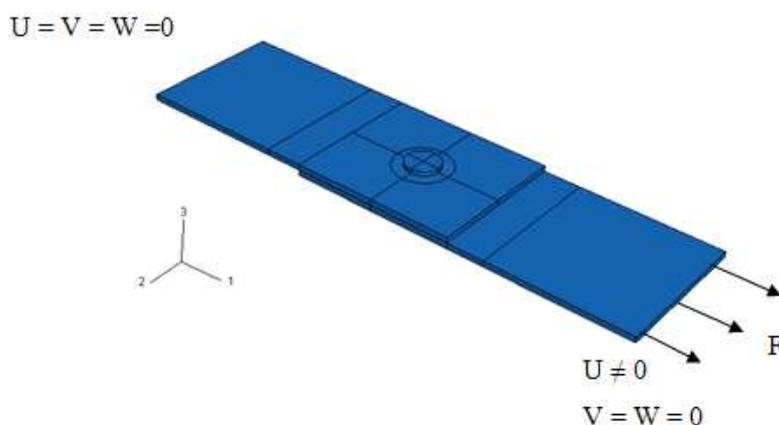


Figure II-16 : Modèle de l'éprouvette de cisaillement.

Ce type d'assemblage requiert de générer des contacts entre les différents éléments en accord avec les conditions de contact identifiées précédemment. Les conditions aux limites pour l'éprouvette en traction sont reproduites de la manière suivante (Figure II-17) :

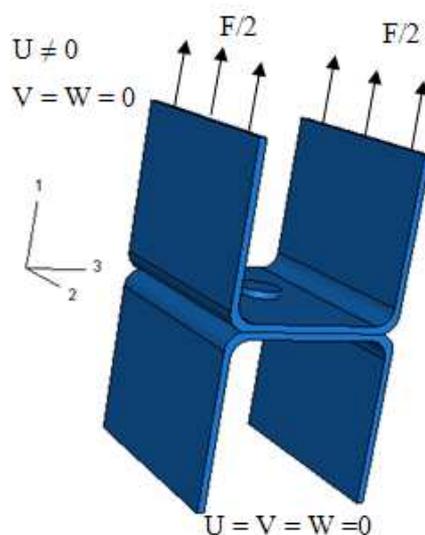


Figure II-17 : Modèle de l'éprouvette de Traction.

II-4-2.3.5 Caractéristiques des matériaux et prise en compte des conditions de montage

Nous n'avons jamais constaté de rupture de l'élément de fixation lors des essais. De ce fait, pour être cohérent avec ce résultat, il faut considérer une grande rigidité pour la vis par rapport aux tôles. Pour cela nous lui avons arbitrairement donné un module de Young mille fois plus grand que celui des plaques.

De plus, lors de la mise en œuvre de l'assemblage, les vis sont montées avec un couple de serrage de 7 N.m, qui fait que l'élément de fixation est alors précontraint en traction. Pour prendre en compte cette précontrainte, nous avons utilisé une méthode thermique qui consiste à abaisser la température dans l'élément de fixation par rapport à l'assemblage. Les tôles sont alors en compression, l'élément de fixation en traction. Pour prendre en compte cette précontrainte, nous avons dû définir deux étapes pour le calcul. La première permet d'appliquer la précontrainte, la deuxième traduit l'application des sollicitations sur les plaques.

II-4-2.4 Corrélation des résultats statiques et numériques

II-4-2.4.1 Résultats en Cisaillement

Les résultats obtenus en cisaillement sont présentés sur la figure II-18. Nous retrouvons le comportement global présenté au chapitre I, c'est-à-dire que nous identifions les différentes phases associées au transfert de charge entre les différents protagonistes de la liaison. Ainsi nous retrouvons dans la zone (1) les phases frottement et glissement, dans la zone (2) la phase du transfert élastique (phase du matage), dans la zone (3) la phase du transfert plastique (phase de flexion secondaire), et dans la zone (4) la phase de la rupture (zone hors domaine de l'étude).

Les zones (1) et (2) représentent les zones exploitables de nos études, dans lesquelles nous pouvons déterminer la rigidité K de la liaison vissée. La limite élastique du joint vaut 6 kN, ce qui représente 40 % de la charge totale à la rupture qui est 13,5 kN.

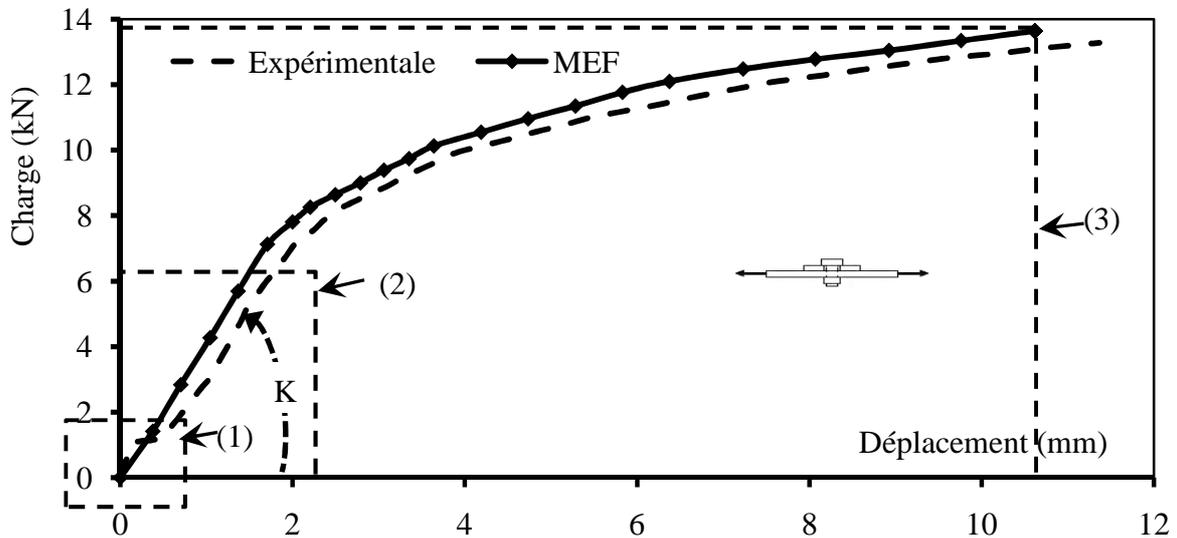


Figure II-18 : Courbes effort-déplacement en cisaillement.

La figure II-19 fait le parallèle entre les différentes étapes du comportement, d'un point de vue expérimental et d'un point de vue numérique. Notre modèle est donc réellement représentatif du comportement réel de la liaison sous charge car il fait apparaître, l'étape 1 de matage des tôles au voisinage du trou, l'étape 2 durant laquelle la vis commence à tourner et à exercer une contrainte sur les plaques, et l'étape 3 où la vis déchire les plaques.

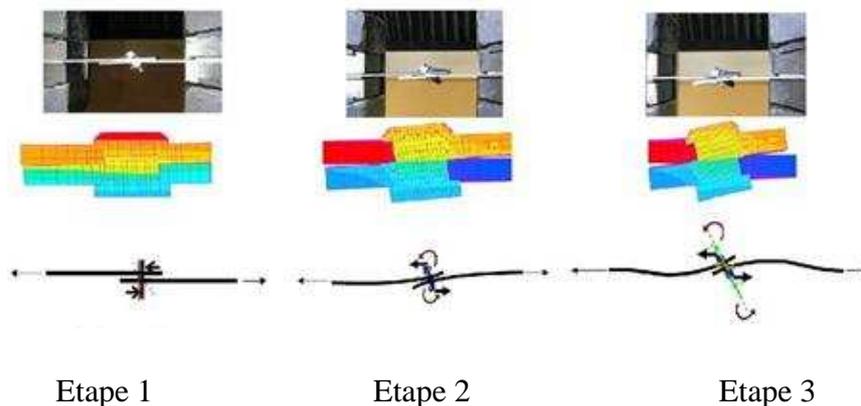


Figure II-19 : Etapes d'évolution du joint cisailé en numérique et en expérimental.

II-4-2.4.2 Résultats en traction

De même que pour les résultats en cisaillement, nous voyons apparaître sur les courbes de traction (Figure II-20) des zones caractéristiques d'une évolution du comportement de notre assemblage. La zone (1) représente la partie élastique, durant laquelle la charge se transfère à

travers la tête de la vis et l'écrou, c'est la zone exploitable de nos études. La zone (2) correspond à la zone plastique, elle représente la déformation plastique des plaques accompagnée de l'arrachage de la vis. Enfin la zone (3) traduit le délogement de l'élément de fixation ; l'assemblage n'a plus aucune tenue mécanique.

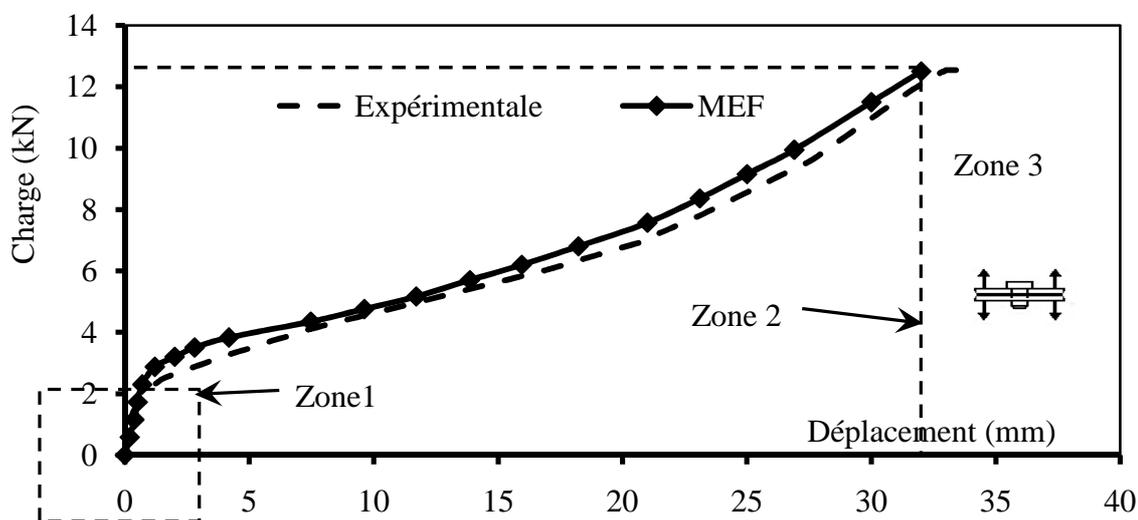


Figure II-20 : Courbes effort-déplacement en traction.

Une nouvelle fois, le parallèle mené entre l'étude expérimentale et l'étude numérique montre très bien la validité du modèle que nous avons développé (Figure II-21). Les hypothèses posées et les lois introduites dans le code de calcul sont donc relativement bien adaptées à ce type de modélisation.

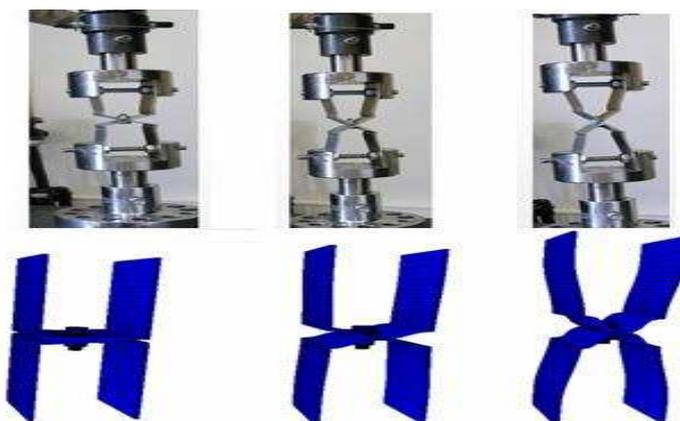


Figure II-21 : Etapes d'évolution du joint en traction en numérique et en expérimental

La cohérence des résultats expérimentaux et numériques, nous permet d'envisager l'utilisation des éléments des modèles numériques et notamment la vis numérique dans d'autres études plus générales. Ces résultats nous ont aussi permis de comprendre le comportement du joint dans le domaine élastique ce qui va s'avérer utile pour les prochaines approches en fatigue.

Il faut noter que lors de la mise au point du modèle éléments finis, une étude paramétrique a permis de déterminer que le paramètre prépondérant permettant de retrouver le comportement expérimental était la gestion du contact entre l'élément de fixation et les plaques.

II-4-3 Exploitations ALSTOM

II-4-3.1 Préparation à la modélisation Ansys®

Les approches expérimentales et numériques ayant été menées sur les joints vissés et rivetés il nous a fallu maintenant songer à transférer ces travaux vers notre partenaire en les adaptant à son outil de calcul, soit ANSYS version 11 qui est utilisé en pré-dimensionnement en 1D et en 2D. Il nous est apparu judicieux d'exploiter nos résultats en essayant de faire l'analogie avec les calculs des rigidités présentés dans le premier chapitre de cet ouvrage. Les formules pour calculer la rigidité d'un point de fixation en simple cisaillement sont :

- Formule de Gore [GOR90] :

$$C = \frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} + \frac{t_1 + t_2}{t_1 \cdot t_2 \cdot E_f} + \frac{4 \cdot (t_1 + t_2)}{5 \cdot G_f \cdot A_f} + \frac{(t_1^3 + 5t_2^2 \cdot t_1 + 5t_1^2 \cdot t_2 + t_2^3)}{40 \cdot E_f \cdot I_f} \quad (\text{II-5})$$

- Formule de Tate et S.J. Rosenfeld [TAT64] :

$$C = \frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} + \frac{1}{t_1 \cdot E_f} + \frac{1}{t_2 \cdot E_f} + \frac{32 \cdot (t_1 + t_2)(1 + \nu)}{9 \cdot E_f \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{8 \cdot (t_1^3 + 5t_2^2 \cdot t_1 + 5t_1^2 \cdot t_2 + t_2^3)}{5 \cdot E_f \cdot \pi \cdot d^4} \quad (\text{II-4})$$

- Formule de Boeing [BOE00] :

$$C = \frac{2 \left(\frac{t_1}{d}\right)^{0,85}}{t_1} \left(\frac{1}{E_f} + \frac{3}{8E_f}\right) + \frac{2 \left(\frac{t_2}{d}\right)^{0,85}}{t_2} \left(\frac{1}{E_2} + \frac{3}{8E_f}\right) \quad (\text{II-6})$$

- Formule de Heimo Huth [HUT86] :

$$C = \left(\frac{t_1 + t_2}{2 \cdot d}\right)^a \cdot \frac{b}{n} \cdot \left[\frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} + \frac{1}{2t_1 \cdot E_f} + \frac{1}{2n \cdot t_2 \cdot E_f}\right] \quad (\text{II-7})$$

A l'aide de ces formules, nous pouvons calculer théoriquement la rigidité des éléments de fixation avec une configuration en simple cisaillement. Par la suite, nous comparerons la rigidité théorique avec celle obtenue en statique qui est la pente du courbe effort-déplacement (Figure II-18) dans la zone élastique. Les différents paramètres intervenants dans ces formules sont recensés dans le tableau II-6.

Symbole	Signification	Valeur
C	Flexibilité des fixations, l'inverse de la rigidité (K)	à calculer
t_1, t_2	Epaisseurs des plaques	2 mm
d	Diamètre de l'élément fixation	6 mm
E_1, E_2	Module d'Young des plaques	200 GPa
E_f	Module d'Young de l'élément de fixation	200 GPa
G_f	Module de cisaillement de l'élément de fixation	73 GPa
A_f	Section de l'élément de fixation	28,26 mm ²
I_f	Moment quadratique de l'élément de fixation	63,58 mm ⁴
a, b	Coefficients dépendant du matériau et de la technologie d'assemblage utilisée	assemblage métallique : boulonné : a = 0,66 ; b = 3 riveté : a = 0,4 ; b = 2,2
n	Coefficient permettant de faire la différence entre le simple et le double cisaillement	Simple cisaillement : n=1 Double cisaillement : n=2

Tableau II-6 : Paramètres utilisés dans le calcul de la rigidité.

Afin de mieux identifier expérimentalement la rigidité, nous avons fait quelques essais statiques cycliques, en utilisant la machine de traction INSTRON, en restant en dessous de la limite élastique (Figure II-22).

Lors de la réalisation de ces essais sur les joints vissés nous avons fait varier la charge entre 800 et 3000 N, alors que pour les joints rivetés la plage de chargement a varié de 800 à 2800 N. Afin de nous affranchir de l'influence du signal d'essai sur le comportement du joint nous avons dans un premier temps piloté la machine en déplacement imposé (2mm/min), ce qui a conduit au même résultat.

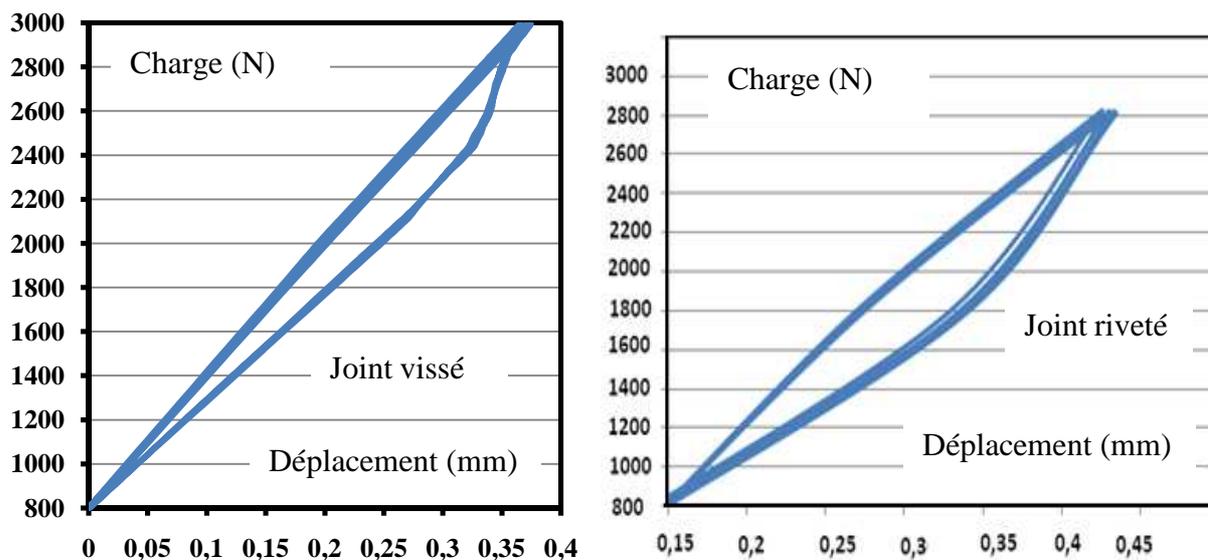


Figure II-22 : Essais cycliques en simple cisaillement sur des joints vissés et rivetés.

A partir des essais traduits par ces deux courbes nous pouvons calculer les rigidités de chaque type d'assemblage. Le tableau II-7 ci-dessous présente différentes valeurs des rigidités K théoriques et expérimentales :

Méthode	K (N/mm)
Formule de Tate	90920
Formule de Gore	85757
Formule de Boeing	85033
Formule de Huth	91773
Essai statique (joint vissé)	5966
Essai statique (joint riveté)	4091

Tableau II-7 : Valeurs de la rigidité théoriques et expérimentales.

Nous pouvons constater immédiatement que les rigidités expérimentales sont bien plus faibles que les rigidités théoriques. Il faut noter que les formules permettant de les calculer sont adaptées à l'étude des assemblages boulonnés et par conséquent, les rigidités fournies par ces formules sont supérieures à celles correspondant à nos assemblages. Malgré cela nous ne pouvons nous satisfaire de tels résultats et force est de constater que ces formules ne sont pas applicables à la modélisation de nos assemblages. Le calcul de la rigidité de la fixation doit nous permettre de modéliser au mieux l'élément de fixation dans le modèle 1D. L'ajustement des

paramètres des relations en fonction des résultats expérimentaux est nécessaire sachant que nous ne pouvons pas sur : l'épaisseur des plaques, le diamètre de l'élément de fixation, les matériaux des pièces utilisées dans la jonction ainsi que la nature du joint, simple ou double recouvrement.

Nous nous sommes alors orientés vers les travaux de Raul Zaharia [ZAH02], qui a identifié une formule adaptée à ses applications et qui semble utilisable dans notre étude :

$$K = 6,8 \frac{\sqrt{d}}{\left(\frac{5}{t_1} + \frac{5}{t_2} - 1\right)} \quad (\text{II-8})$$

En effet cette formule est adaptée à l'étude des joints en simple recouvrement mettant en jeu des plaques d'épaisseur comprise entre 2 et 4 mm, assemblées par un élément de fixation de diamètre compris entre 6 et 16 mm. Les caractéristiques de nos assemblages vont, de plus, permettre de simplifier cette formule, puisque les tôles à assembler sont de même épaisseur ($t_1 = t_2$) et de même module d'élasticité ($E_1 = E_2$). Nous trouvons alors par l'application de cette formule une rigidité K de 4160 N/mm. Cette valeur de la rigidité est très proche des valeurs de rigidité mesurées lors des essais de traction.

II-4-3 .2 Modèle numérique 2D

L'objectif final de l'étude statique des assemblages par éléments de fixation est de modéliser globalement le coffre de traction. Le modèle numérique du coffre de traction doit rendre compte d'un ensemble composé d'un grand nombre de plaques métalliques assemblées par des éléments de fixation. Ce modèle 2D utilise des éléments coques pour discrétiser les tôles et un élément poutre pour réaliser la connexion représentative de chaque élément de fixation.

Cette modélisation devant être linéaire dans le domaine d'application, il nous a alors été nécessaire de vérifier la rigidité de l'élément poutre utilisé actuellement chez notre partenaire ALSTOM Transport, pour la comparer avec celle obtenue de façons analytique et expérimentale.

Pour cela, nous avons créé un modèle 2D linéaire sur le code de calcul ANSYS, puisque c'est le logiciel qui est utilisé actuellement dans les bureaux d'études d'ALSTOM Transport. Ce modèle représentatif d'une liaison élémentaire est un joint en simple recouvrement, dans les mêmes conditions géométriques et mêmes conditions aux limites que celle du modèle 3D non linéaire présenté précédemment.

Les plaques du joint en simple recouvrement sont modélisées par des éléments coque type shell63 utilisés par les codes des calculs ANSYS [ANS05]. Pour les éléments de fixation nous avons utilisé deux types d'éléments poutre ; Beam4 ou Pipe16.

➤ L'élément BEAM4 (Figure II-23-a) a été choisi car déjà utilisé dans des études précédemment réalisées pour un autre assemblage vissé de la société. Il s'agit d'un élément uniaxial. Il suffit de modéliser uniquement son axe puis de rentrer ses caractéristiques. La vis ayant un diamètre de 6mm, nous choisissons donc une base carrée avec une dimension de 6mm. Cet élément a des capacités de tension, compression, torsion et flexion. Il possède six degrés de liberté à chaque nœud (3 translations et 3 rotations) [KIM07].

➤ L'élément PIPE16 (Figure II-23-b) nous a paru intéressant car sa géométrie est la plus proche d'une vis. Du fait d'une géométrie standard et d'une symétrie axiale, il est de plus simplifiable, ce qui n'est pas négligeable dans la modélisation des structures complexes. Il suffit de modéliser son axe et d'indiquer son diamètre (6 mm) et son épaisseur intérieure (3 mm), de manière à obtenir un tube plein.

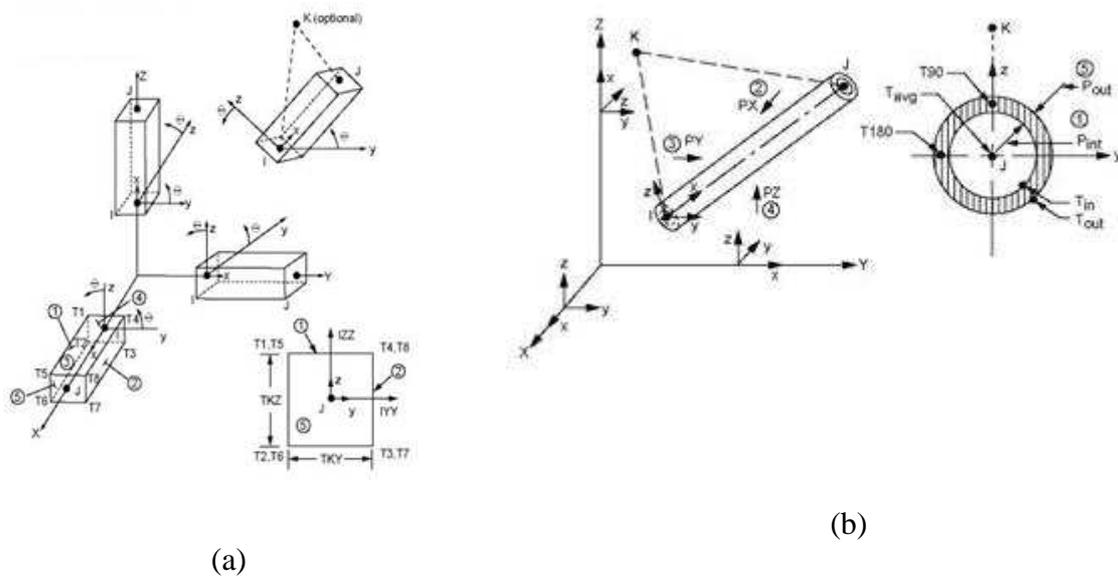


Figure II-23 : Géométrie des éléments poutre : (a) : BEAM4 ; (b) PIPE16 [ANS05].

Les deux nœuds représentant les deux extrémités de la vis sont couplés avec les nœuds des plaques afin de décrire au mieux les mouvements de la vis dans son logement (Figure II-24-a). Un effort de 2000 N est alors appliqué sur la surface modélisant la liaison complète avec le mors mobile. Cette surface étant discrétisée par 9 éléments et 16 nœuds. La force appliquée par nœud est de 125 N (Figure II-24-b).

L'influence du perçage sur le comportement du joint a été estimée en réalisant en parallèle deux modèles avec et sans perçage pour les types d'élément poutre. Nous avons alors pour cela 4 modèles créés avec les mêmes conditions aux limites :

- Deux modèles avec l'élément Beam4
- Deux modèles avec l'élément Pipe16

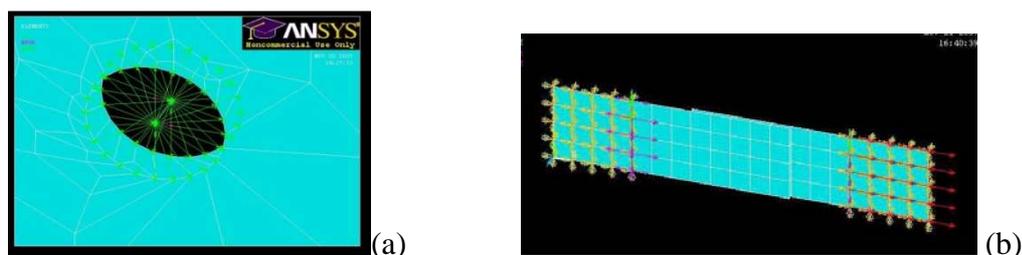


Figure II-24 : (a) : Couplage entre l'élément poutre et les deux plaques ; (b) : Conditions aux limites sur le modèle en simple recouvrement.

La rigidité K , obtenue pour chacun de ces 4 modèles en 2D, est présentée dans le tableau suivant (Tableau II-8).

Modèle	K (N/mm)
Beam4 sans perçage	5660
Beam4 avec perçage	5950
Pipe16 sans perçage	6200
Pipe16 avec perçage	6450

Tableau II-8 : Influence du perçage sur la rigidité.

La première chose à constater, est que la rigidité K ne varie pas beaucoup en fonction du modèle utilisé que ce soit avec élément Beam4 ou Pipe16, avec ou sans perçage. Les valeurs obtenues sont très proches des valeurs expérimentales ce qui va nous permettre de valider l'utilisation de ces éléments dans la structure du coffre de traction.

II-5 Approche expérimentale en dynamique

L'approche statique étant maintenant aboutie, nous avons décidé de valider nos assemblages sous sollicitations répétées. Une campagne d'essais de fatigue a alors été entreprise sur des assemblages vissés et rivetés. Comme lors de l'étude statique, nous avons choisi de nous

rapprocher au mieux des sollicitations réelles que voient nos assemblages et donc de solliciter l'élément de fixation en cisaillement et en traction.

Ces essais ont été réalisés, au sein de laboratoire LGP de l'ENIT de Tarbes, sur une machine de fatigue INSTRON 1542 dans le but de montrer la fiabilité des assemblages actuels et de donner des indications sur leur comportement dans le temps.

II-5-1 But des essais de fatigue et conséquences

Le but global des essais de fatigue est de montrer qu'un assemblage vissé ou riveté peut avoir une durée de vie au moins aussi bonne que la durée de vie du coffre de traction. Plus précisément, il s'agit de trouver la limite d'endurance de la liaison c'est-à-dire la charge maximale applicable n'induisant pas de rupture durant le cycle de vie de la liaison, soit 30 ans dans le domaine ferroviaire.

II-5-2 Méthode et conditions d'essai

Les essais de fatigue ont tous été conduits en charge contrôlée avec des niveaux de sollicitations situés dans ou légèrement au dessus du domaine élastique des assemblages, donc guidés par les résultats obtenus durant l'approche statique. Les sollicitations sont sinusoïdales avec un rapport de contrainte $R = 0,1$. Ce rapport de contrainte qui est le rapport entre la charge minimale et la charge maximale lors de l'essai [LEM92] est le plus représentatif du chargement réel dans le coffre de traction. En effet pour ce qui concerne la sollicitation en traction de l'élément de fixation, nos boulons comme nos rivets ne peuvent pas voir de compression. De même pour le cas du cisaillement de l'élément de fixation, un changement de signe de la charge impliquerait seulement un changement de surfaces de contact actives mais ne générerait en rien une sur-contrainte dans l'élément. La fréquence de sollicitation lors des essais est de 30 Hz ; c'est la fréquence à laquelle le coffre est le plus sollicité et c'est la fréquence utilisée dans des études internes chez ALSTOM Transport.

Les tests seront limités en durée grâce à la censure. Il s'agit, en réalité, du nombre de cycle au-delà duquel le phénomène de fatigue est considéré comme n'intervenant plus. Le nombre de cycle durant la période de service d'un train avoisine les 5×10^9 cycles ; résultat obtenu par la norme CEI 61373 [CEI99] qui définit les essais vibratoires que doivent supporter les coffres. Dans notre cas, pour limiter la durée des essais tout en conservant un lien étroit avec le comportement réel, nous avons en accord avec notre partenaire, choisi une censure de 4×10^6 cycles, censure déjà utilisée dans des études internes chez ALSTOM Transport pour caractériser les assemblages vissés/collés et rivetés. La méthode de recherche de la limite de

fatigue devait être, dans un premier temps, la méthode de l'escalier (aussi appelé Staircase method) [DIX48] [POP68]. Mais c'est une méthode qui, même si elle donne des résultats relativement précis, demande un nombre important d'éprouvettes et un temps d'essai relativement grand. Nous avons donc choisi, pour réduire le temps et le nombre des essais, une méthode par dichotomie, qui permet de réaliser une courbe de Wöhler [URB03] (Figure II-25), avec comme résultat final la charge maximale pour laquelle il n'y a pas rupture en fatigue de l'éprouvette.

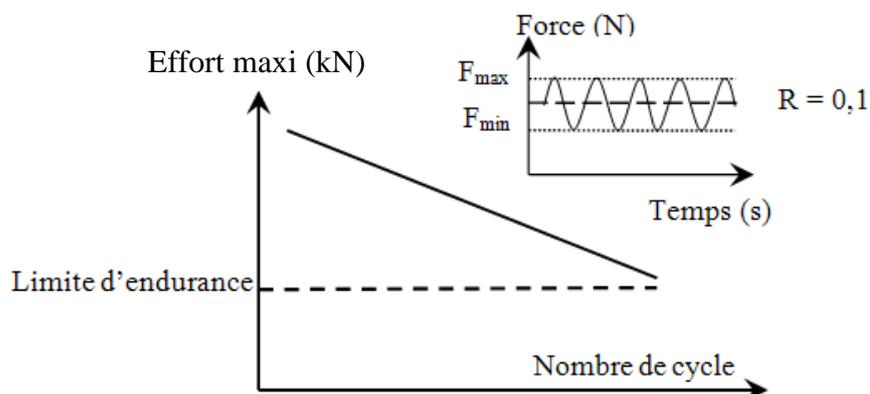


Figure II-25 : Construction d'une courbe de Wöhler.

II-5-3 Résultats des essais dynamiques.

II-5-3.1 Sollicitations en traction

Le tableau II-9 recense les résultats des essais menés sur les deux types d'assemblages de notre étude en sollicitant en traction l'élément de fixation. Nous retrouvons dans ce tableau les conditions de chargement par le biais de la charge maximale appliquée. Les résultats présentés sont des résultats moyens, car les essais ont été multipliés pour les différents niveaux de charge afin de nous affranchir des dispersions inhérentes aux essais de fatigue.

N°éprouvette	Force Maximale (N)	Vis + écrou		Rivet	
		Rupture	Nombre de cycles	Rupture	Nombre de cycles
1	3000	oui	400 000	oui	200 000
2	2500	oui	1200 000	oui	600 000
4	2000	oui	2000 000	oui	1200 000
5	1500	non	4 10 ⁶	non	4 10 ⁶

Tableau II-9 : Résultats des essais de fatigue en traction.

À partir des résultats présentés dans le tableau II-9, nous avons pu tracer les courbes de Wöhler. Ces courbes visibles sur la figure II-26 font apparaître une limite d'endurance très proche pour les deux types d'assemblage. Cette limite d'endurance est située autour de 1500 N.

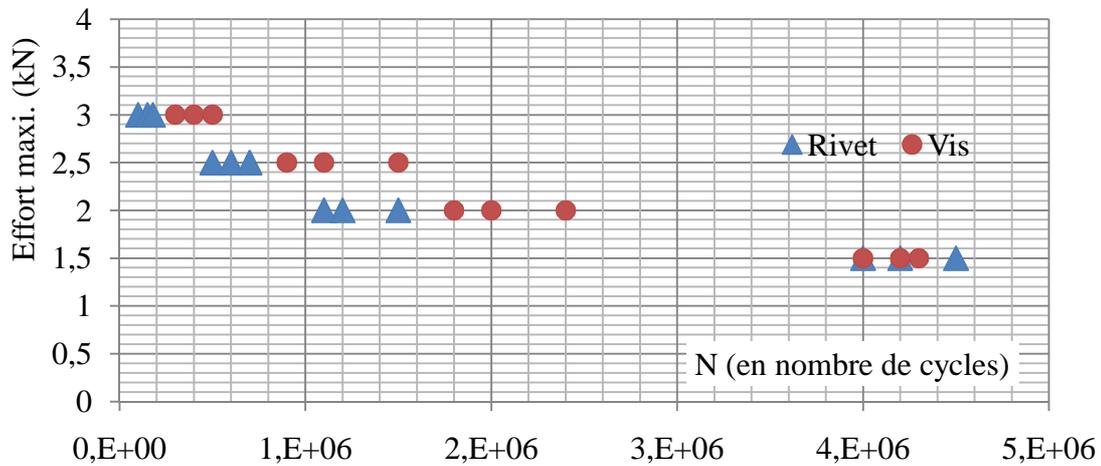


Figure II-26 : Courbes de Wöhler sous sollicitation de traction.

Liaison	Effort maxi.	Observations	Facès de rupture
Vis + Ecrou	4 kN	La rupture est du côté du filetage de la vis, avec l'arrachement de l'écrou sur la tôle. Avant rupture de l'assemblage, on constate la déformation de la pièce par la formation d'un « toit »	
Vis + Ecrou	2 kN	La rupture de l'assemblage est au niveau de la tôle, et non au niveau de la visserie	
Rivet	4 kN	Arrachement du côté de l'écrou, les tôles se déchirent autour des trous	

Tableau II-10 : Modes de rupture des liaisons en traction.

II-5-3.2 Sollicitations en cisaillement

Le tableau II-11 présente les résultats des essais menés sur les deux types d'assemblages de notre étude en sollicitant l'élément de fixation en cisaillement. Nous retrouvons de nouveau dans ce tableau les conditions de chargement par le biais de la charge maximale appliquée et les résultats présentés sont ici aussi des résultats moyens, les essais ayant été multipliés pour les

différents niveaux de charge afin de nous affranchir des phénomènes de dispersion. Comme pour le cas de la traction, nous avons ainsi pu tracer les courbes de Wöhler de nos assemblages. Ces courbes présentées sur la figure II-27 font apparaître une limite d'endurance d'environ 4000 N pour les deux types d'assemblages.

N°éprouvette	Force Maximale (N)	Vis + écrou		Rivet	
		Rupture	Nombre de cycles	Rupture	Nombre de cycles
1	6000	oui	400 000	oui	200 000
2	5500	oui	1200 000	oui	400 000
4	5000	oui	2200 000	oui	1600 000
5	4500	oui	4800 000	oui	3200 000
6	4000	non	$6 \cdot 10^6$	non	$4 \cdot 10^6$

Tableau II-11 : Résultats des essais de fatigue en cisaillement.

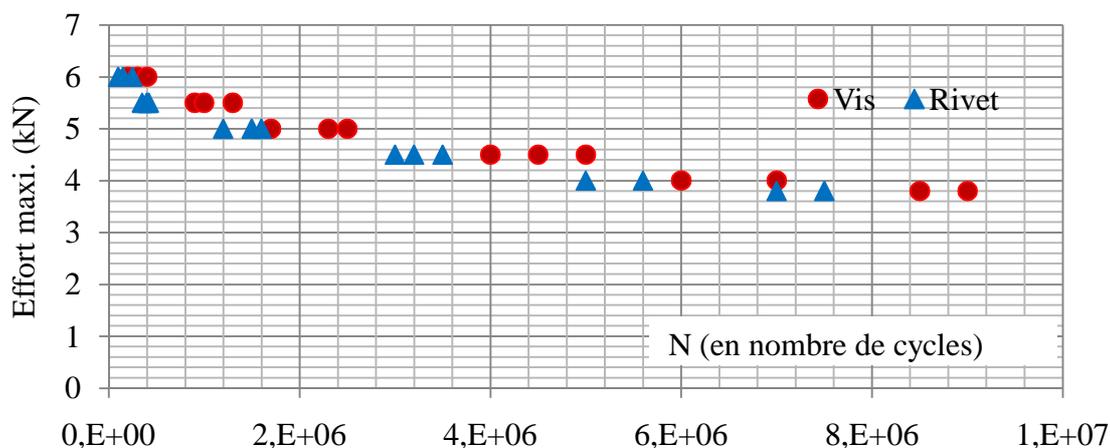


Figure II-27 : Courbes de Wöhler sous sollicitation de cisaillement.

Comme nous l'avons fait dans le cas de la traction, nous avons également examiné les faciès de rupture selon les différents niveaux de charge. Sous sollicitation de cisaillement nous n'avons, là non plus, jamais rencontré de rupture de l'élément de fixation. Nous pouvons tirer des conclusions analogues quant au processus de rupture. En effet, dans les cas les plus chargés les ruptures s'initient au voisinage du perçage et l'élément est arraché alors que dans les cas moins chargés il y a fissuration au voisinage du perçage et propagation dans la tôle perpendiculairement à l'axe de la sollicitation. Différentes observations de ces ruptures sont présentées dans le tableau II-12

Liaison	Effort maxi.	Observations	Faciès de rupture
Vis + Ecrou	8 kN	La rupture est du côté du filetage de la vis, avec l'arrachement de l'écrou sur la tôle.	
Vis + Ecrou	5 kN	La rupture de l'assemblage est au niveau de la tôle, et non au niveau de la visserie	
Rivet	8 kN	Arrachement du côté de l'écrou, les tôles se déchirent autour des perçages	
Rivet	5 kN	La rupture se situe au niveau des tôles	

Tableau II-12 : Modes de rupture des joints en cisaillement.

II-5-4 synthèse

Nous pouvons remarquer que les résultats en fatigue sont très similaires pour les deux types de sollicitation de ce, quelle que soit la technologie adoptée. Ainsi, nous savons que la limite d'endurance se situe aux alentours de 1500 N si l'élément de fixation est sollicité en traction et autour de 4000 N s'il est soumis à du cisaillement.

Les phénomènes de dégradation sont les mêmes que ceux apparaissant lors des essais statiques, c'est-à-dire que la faiblesse de la liaison se situe autour du perçage. Sous sollicitations importantes cette faiblesse génère l'apparition de fissures qui n'ont cependant pas le temps de se propager, l'élément de fixation étant arraché assez rapidement. Par contre, sous faibles sollicitations cette faiblesse est lieu d'apparition et de propagation de fissures dans la tôle qui conduisent à la rupture de la liaison. Ce type d'éprouvettes est néanmoins significatif pour caractériser l'assemblage, car l'étude générale porte bien entendu sur l'ensemble élément de fixation/tôle.

Nos objectifs étaient de connaître, comprendre et optimiser les caractéristiques en fatigue de cet ensemble. Une des solutions à ce problème serait alors de modifier la géométrie de la liaison pour améliorer cela. Cependant, et dans ce cas là, les liaisons seraient plus complexes et automatiquement plus chères à fabriquer, ce qui n'est pas possible industriellement.

II-6 Conclusion

A ce stade de notre étude notre campagne d'essais nous a permis de comprendre le fonctionnement des liaisons vissées et rivetées sous sollicitations de traction et de cisaillement, c'est-à-dire sous les sollicitations caractéristiques qu'elles rencontrent en fonctionnement.

Nous avons également pu observer les modes de ruine des assemblages, et par là avons quantifié l'effort de rupture de l'assemblage avec élément de fixation sous sollicitations statiques. Nous devons nous cantonner au domaine élastique qui lui présente des caractéristiques bien plus faibles avec une limite élastique à 2000 N et 0,5 mm d'allongement pour la traction et une limite élastique à 6000 N et 2 mm d'allongement pour le cisaillement. L'approche en dynamique nous a, quant à elle, renseigné sur la limite d'endurance de nos liaisons.

Grace aux résultats obtenus dans ce chapitre, nous pouvons tenter de substituer un assemblage par collage structural aux assemblages actuels. Nous avons suffisamment de données expérimentales pour mettre en place un cahier des charges adapté qui devra être respectée par collage. C'est l'objet du chapitre qui suit.

Chapitre III : Assemblage par collage structural

III-1 Introduction

Dans notre étude, le collage structural représente une solution alternative pour assembler les coffres de traction. Ce chapitre sera consacré à l'étude de la solution à l'échelle des joints en simple liaison à travers des études expérimentales et numériques. Le processus de l'assemblage par collage structural comprend un ensemble d'opérations : la préparation des surfaces à assembler, l'encollage et enfin la réticulation de l'adhésif.

Dans cette étude nous allons dans un premier temps commencer par définir le collage structural en tant que moyen d'assemblage et nous présenterons le cahier des charges, réalisé en collaboration avec l'entreprise ALSTOM Transport, afin de sélectionner un adhésif qui répondra au mieux aux besoins techniques et industriels de l'application.

Dans un deuxième temps, nous allons caractériser l'adhésif structural sélectionné à travers des essais et des tests sur l'adhésif dans son état massique. Par la suite, nous présenterons la campagne d'essais réalisés en statique et en dynamique sur des joints assemblés par collage structural. Les essais statiques seront utilisés pour valider les modèles numériques développés sur ABAQUS/CAE version 6.6.

Ce chapitre doit nous informer sur la possibilité, d'un point de vue de la tenue mécanique, d'utiliser le collage structural dans la construction de la structure des coffres de traction. Les effets du vieillissement seront traités ultérieurement dans le chapitre IV.

III-2 Assemblage par collage structural

III-2-1 Collage structural moderne

À la fin des années 1920, certains assemblages structuraux étaient encore irréalisables. Il a fallu attendre le développement de la chimie des polymères pour obtenir une amélioration significative des performances des adhésifs. C'est ainsi qu'à l'entre-deux-guerres, les adhésifs «synthétiques» ont connu un essor considérable. Les colles dites réactives à prise chimique offrirent à l'industrie de nouvelles possibilités [JOA07] [BRE05].

Les polymères à la base des adhésifs synthétiques sont obtenus par polymérisation de monomères suivant deux processus chimiques :

- la polymérisation par étape ou polycondensation,
- la polymérisation en chaîne ou polyaddition.

La prise chimique est assurée par la réticulation qui permet de lier de manière permanente les macromolécules entre elles. Cette phase nécessite d'utiliser un agent de réticulation également appelé durcisseur dans certains cas. Un adhésif sera dit mono-composant si l'agent de réticulation et le polymère sont conditionnés ensemble dans un mélange homogène. La réticulation des adhésifs mono-composants doit alors être activée par un procédé additionnel comme l'application de chaleur pour les systèmes thermodurcissables ou d'autres facteurs (humidité, rayonnement UV, etc.) pour les systèmes durcissables à froid, c'est à dire durcissables à température ambiante. Par opposition, la réticulation des adhésifs bi-composants est provoquée par le simple mélange, dans des proportions déterminées, entre le polymère et le durcisseur. Ces adhésifs se présentent donc sous la forme de deux produits séparés.

III-2-2 Efficacité des adhésifs structuraux

III-2-2.1 Adhésion et Cohésion

Quelle que soit son origine, l'efficacité d'une colle repose sur deux propriétés fondamentales :

- une propriété d'adhésion relative à des mécanismes d'interface,
- une propriété de cohésion au sein de l'adhésif qui rend compte des forces d'attraction entre les molécules.

Alors que la cohésion de la matière est une notion commune à tous les matériaux, l'adhésion ne subsiste qu'entre deux corps. Les mécanismes d'adhésion sont complexes et plusieurs théories ont été avancées ainsi que cela a été décrit dans le chapitre I. Ces théories relèvent en fait d'approches très différentes et dépendent des échelles d'observation. Pour les chimistes, l'adhésion est due à des interactions moléculaires entre l'adhésif et le substrat. Les physiciens considèrent davantage les dissipations d'énergie pour rendre compte des phénomènes observés.

III-2-2.2 Interfaces et préparations des surfaces

Comme indiqué au chapitre I, la qualité du collage dépend de nombreux paramètres. On doit considérer un assemblage collé comme constitué de deux substrats, d'un adhésif mais surtout de deux interfaces. Avant collage, la préparation des surfaces permet dans certains cas d'optimiser l'adhésion. Le choix du traitement est fonction des substrats, de l'adhésif et des performances recherchées.

III-2-2.3 Sollicitations mécaniques et modes de rupture

Contrairement aux modes d'assemblages ponctuels, le collage forme un joint continu sur une grande surface assurant une meilleure répartition des contraintes (Figure III-1) [BUR06].



Figure III-1 : (à gauche) : liaison collée; (à droite) : liaisons ponctuelles.

Cependant, les assemblages collés ne peuvent pas être sollicités de n'importe quelle manière (Figure III-2). Il est très important que le joint travaille préférentiellement en cisaillement afin de répartir les efforts sur la plus grande surface possible. La plupart des colles résistent également très bien en compression.

Une rupture confinée au sein d'un matériau est dite cohésive. Ce type de rupture peut bien entendu se produire au sein de l'adhésif ou dans le substrat puisqu'un collage structural doit permettre d'obtenir un assemblage « dont la solidité est comparable à celle des matériaux constitutifs ». Une rupture à l'interface colle/substrat est dite adhésive ou interfaciale. La fissure peut alterner entre ces deux types de faciès au cours d'une même sollicitation de l'assemblage. On parle alors de rupture mixte.

III-3 Cahier des charges

Le cahier des charges est un descriptif complet des spécifications de l'assemblage, reprenant les contraintes dimensionnelles, les caractéristiques intrinsèques demandées aux matériaux, les conditions d'utilisation et les contraintes subies pendant sa durée de vie, les impératifs de production et les impératifs économiques. L'adhésif qui sera sélectionné et sa mise en œuvre doivent impérativement répondre aux besoins techniques et industriels afin qu'il puisse être utilisé comme une solution alternative dans l'assemblage des coffres de traction [CET06]

III-3-1 Fonctions à assurer par le collage structural

Les fonctions demandées à l'assemblage dans notre application sont multiples. Le joint collé doit participer à la tenue mécanique ; il doit être un élément décisif dans la résistance de l'assemblage aux sollicitations mécaniques prévues au cours de son existence ; il doit assurer

l'étanchéité et l'amortissement des vibrations. En ce qui concerne la tenue mécanique, nous allons prendre comme référence les résultats obtenus avec les assemblages ponctuels et notamment les résistances mécaniques dans la zone élastique des courbes effort/déplacement. Les caractéristiques mécaniques que doit atteindre le joint collé sont répertoriées dans le tableau suivant. Même si ces valeurs ont été obtenues sur des assemblages ponctuels, elles donnent une cible pour notre solution de collage structural.

Sollicitation	Cisaillement	Traction
Effort à limite élastique (N)	6000	1550
Déplacement à limite élastique (mm)	2	0,5
Effort à rupture (N)	14000	13000

Tableau III-1 : Cahier des charges de la tenue mécanique des joints collés.

III-3-2 Conditions industrielles et mise en œuvre du collage structural

Après les contraintes mécaniques en service, ce point du cahier des charges recense les contraintes de production. Le temps de travail doit être précisé, ainsi que le temps d'immobilisation pendant lequel les deux pièces à assembler sont maintenues l'une contre l'autre en attendant que l'adhésif ait suffisamment durci. Au-delà de ce temps, l'assemblage peut être manipulé et stocké.

La température de réticulation souhaitée est l'un des paramètres les plus importants pour choisir la famille d'adhésifs structuraux. La préparation de surfaces et les équipements nécessaires pour appliquer l'adhésif sur les pièces à assembler sont également des points importants dans la sélection de l'adhésif (Tableau III-2).

La grande diversité des adhésifs présents sur le marché est une source de complexité pour le concepteur d'un assemblage par collage structural. Or cette diversité vient très souvent du fait que chaque adhésif a été formulé en fonction d'une application.

Critère	Niveau
Température de polymérisation	Température ambiante
Temps de travail	La durée du pot (30 à 90 mn)
Temps de polymérisation après pose	24 heures maxi.
Préparation de la surface	Simple dégraissage
Adhésif mono ou bi composant	Indifférent
Maintien des pièces pendant la polymérisation	Peut être assuré
Application de l'adhésif	Manuelle par une ou deux personnes
Équipement nécessaire	Le moins possible
Sécurité humaine	Adhésif non toxique.
Résistance à la corrosion	Oui
Continuité de la masse	Oui, si collage uniquement
Durée de vie	30 ans
Température de service permanent	-40°C à 85°

Tableau III-2 : Cahier des charges industrielles du collage structural.

III-3-3 Choix et validation de quelques adhésifs répondant au cahier des charges

Avant de sélectionner l'adhésif structural en prenant en compte sa résistance mécanique, nous allons interpréter le cahier des charges pour sélectionner la famille d'adhésifs qui répond le mieux à nos critères ; nous raffinerons ensuite la sélection en consultant les fiches techniques des fournisseurs de colles pour sélectionner quelques adhésifs dans un deuxième temps.

La démarche à suivre pour sélectionner le système d'assemblage par collage structural sera réalisée en plusieurs étapes :

- Choix de la famille d'adhésif
- Sélection de quelques candidats
- Test de la tenue mécanique des adhésifs sélectionnés
- Méthodes de mise en œuvre et outils de production
- Contrôle et inspection

Pour faciliter la sélection de la famille d'adhésifs structuraux, nous avons utilisé quelques critères basiques pour notre application, afin d'éliminer très vite les familles qui ne répondent pas à nos besoins. Ces critères concernent : la présentation du produit, sous forme liquide, de poudre ou de pâtes, la température de la mise en œuvre. Nous avons recensé les familles d'adhésifs structuraux connues sur le marché avec leurs caractéristiques de mise en œuvre (tableau III-3).

À partir du tableau III-3, nous avons éliminé dans un premier temps l'époxy mono-composant qui ne réticule pas à température ambiante, ainsi que les acryliques bi-composants à cause de leur temps de prise trop court (3 à 30 minutes). Il reste alors les polyuréthanes structuraux et l'époxy bi-composants qui répondent aux critères du cahier des charges de mise en œuvre. Les deux colles peuvent réticuler à température ambiante et ont un temps de prise assez important. Après consultation des fournisseurs et en accord avec notre partenaire industriel, nous sommes focalisés sur la colle époxy bi-composant qui est l'adhésif le plus utilisé comme adhésif structural dans les secteurs industriels et notamment dans le domaine du transport.

Famille d'adhésifs	Présentation	Température de mise en œuvre	Temps de prise	Remarques
Polyuréthanes structurales	Pâtes, bi-composants	Température ambiante	10 min à plusieurs h	La vitesse de prise augmente avec la température
Epoxy mono-composants	Pâtes, films	80 à 150°C	30 min à 24 h	
Epoxy bi-composants	Pâtes	Température ambiante	30 minutes à 24 heures	La vitesse de prise augmente avec la température
Acryliques bi-composants	Pâtes, bi-composants	Température ambiante	3 à 30 min	Un composant par face ou mélange avant application.

Tableau III-3 : Familles d'adhésifs structuraux et caractéristiques de mise en œuvre [CET06].

L'adhésif Époxy bi-composants excelle par sa fiabilité, particulièrement pour les composants de grandes tailles. Il dispose d'une bonne résistance chimique et thermique et est disponible en différentes viscosités. Ses domaines d'application sont multiples : ingénierie mécanique, électronique, industrie des métaux et industrie de l'ingénierie automobile.

III-3-4 Choix de l'adhésif à utiliser

Après avoir sélectionné la famille d'adhésifs structuraux, nous avons recherché plusieurs candidats. Pour simplifier notre choix, nous avons décidé de sélectionner trois adhésifs commerciaux fabriqués par la société française 3M[®], référencés 7240 B/A, 2216 B/A et DP190, (annexe 3) avec les caractéristiques du fournisseur suivantes (tableau III-4).

	7240*	2216	DP190
Température de polymérisation	20 -23 °C		
Temps de travail	45 min à T° ambiante	90 min à T° ambiante	90 min
Temps avant manipulation	6 h.	8-12 h.	4-6 h.
Température de service permanent	Entre -55°C et 85°C, baisse des performances mécaniques en fonction de la température. contraintes maxi. en cisaillement**		
	29 MPa à -40°C 6 MPa à 100°C	15 MPa à -40°C, 2,8 à 82°C	11.4 MPa à -40°C, 3.1 à 82°C
Préparation de la surface	Dégraissage		

Tableau III-4 : Tableau comparatif entre les trois types de l'adhésif sélectionné avec les conditions qui peuvent être différentes d'un adhésif à l'autre.

* adhésifs pouvant être chargés en billes de verre pour contrôler l'épaisseur du film de colle.

** les contraintes maximum au cisaillement sont obtenues à partir des essais en cisaillement sur des joints collés en simple recouvrement selon la norme NFT 76 141.

Nous avons ensuite réalisé des essais mécaniques en cisaillement et en traction des joints en simple recouvrement, pour identifier le comportement de ces adhésifs avec les substrats de nos applications. Les résultats de ces essais dans les configurations habituelles de notre étude sont présentés sur la figure III-3. Nous avons superposé sur ces courbes la réponse de la colle polyuréthane Sikaflex utilisée actuellement par ALSTOM Transport. Nous confirmons ainsi que cette colle n'est là que pour assurer l'étanchéité des coffres de traction.

D'après ces résultats, nous constatons rapidement que l'adhésif 7240 B/A est l'adhésif qui donne la meilleure résistance à la rupture (38 kN), avec une bonne flexibilité. La limite élastique F_e obtenue avec cet adhésif est également la plus élevée, environ 26 kN. Avec ces

résultats il semble préférable de choisir l'adhésif 7240 B/A de 3M, que nous désignerons par la suite 7240.

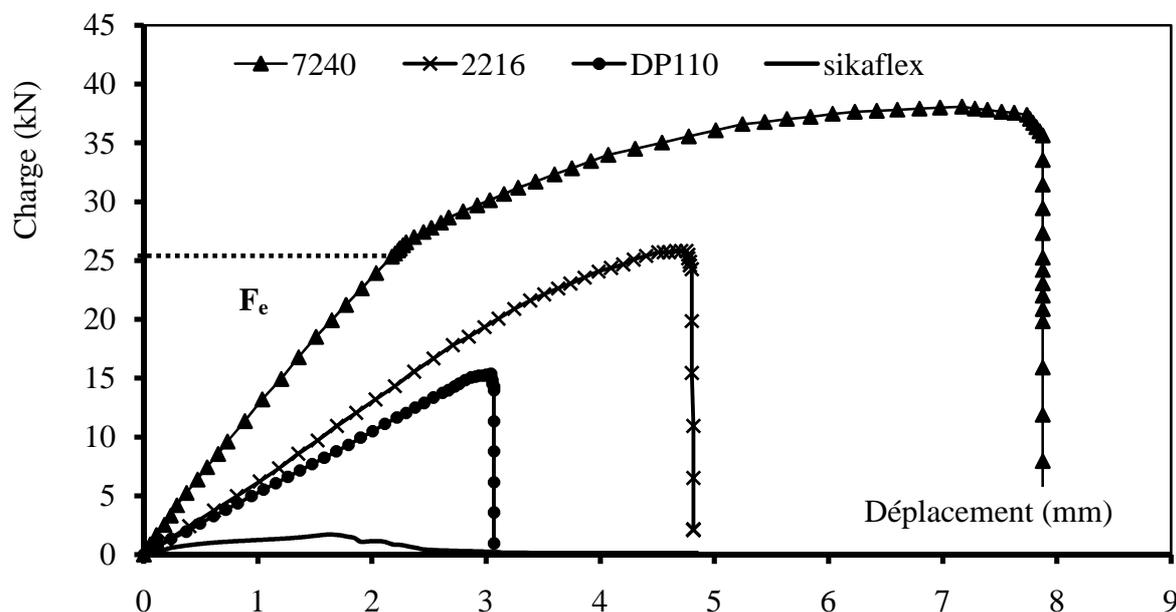


Figure III-2 : Courbes effort/déplacement en simple cisaillement pour les différents adhésifs.

III-3-5 L'adhésif époxy bi-composants 7240

L'adhésif 7240 est un adhésif structural qui peut réticuler à température ambiante, il est connu pour sa ténacité et sa durabilité. Il est possible d'accélérer sa réticulation en augmentant la température. Cet adhésif est chargé de billes de verre à environ 2 % (200 μm de diamètre), ce qui aide à contrôler et calibrer l'épaisseur du joint de colle. L'adhésif 7240 répondant au cahier des charges, nous avons poursuivi notre étude avec cet adhésif en réalisant des joints collés réticulés à température ambiante, soit à environ 23°C.

III-4 Comportement mécanique de l'adhésif sélectionné

Afin de comprendre le comportement mécanique des assemblages collés, nous nous sommes intéressés, dans un premier temps, aux propriétés intrinsèques de l'adhésif sélectionné. Pour cela, nous avons étudié les comportements élastique et plastique de l'adhésif dans son état massique. Pour réaliser cette étude nous avons commencé par des essais destructifs en traction sur des éprouvettes massives de l'adhésif 7240 afin de caractériser l'adhésif jusqu'à sa rupture. Par la suite, nous avons réalisé des mesures en utilisant la méthode de propagation d'ondes ultrasonores pour vérifier les paramètres élastiques de l'adhésif 7240.

III-4-1 Caractérisation de l'adhésif à l'état massif

La caractérisation de l'adhésif époxy 7240 a été réalisée à partir d'échantillons massifs. Nous avons fabriqué dans un premier temps des éprouvettes en se conformant à la géométrie préconisée par la norme NF EN ISO 527 (Plastiques - Détermination des propriétés en traction) (FIG. III.4). Ces éprouvettes sont utilisées ensuite pour réaliser des essais de traction en statique jusqu'à la rupture [MAR06].

Les éprouvettes ont été fabriquées à l'aide d'un moule en silicone blanc RTV2-3428[®] fabriqué par la société Rhodia[®]. Ce moule a été préparé en utilisant l'empreinte d'une éprouvette en thermoplastique existante de mêmes dimensions que l'éprouvette massique à réaliser. En principe, pour fabriquer des éprouvettes massiques isotropes et homogènes, il faut leur faire subir une opération de dégazage afin d'enlever les bulles d'air bloquées à l'intérieur de l'adhésif. L'adhésif 7240 se présentant sous forme pâteuse, cette opération n'a pas donné les résultats escomptés et a alors été abandonnée. Nous sommes donc restés sur une éprouvette présentant quelques bulles mais pour localiser la rupture dans la partie utile et non dans les mors, nous avons collé des talons en aluminium sur l'éprouvette (Figure III-4).

Le comportement mécanique intrinsèque de l'adhésif a pu être analysé à l'aide d'essais de traction sur les éprouvettes massiques sur une machine de traction INSTRON[®]. Les essais ont été réalisés à la vitesse de 0,1 mm/s. Cette vitesse de sollicitation a été retenue, après plusieurs tests effectués sur une plage de vitesse allant de 0,001 à 0,5 mm/s. Cette vitesse permet de décrire un comportement mécanique « apparent » de type élasto-plastique. Une cellule de charge de $5 \text{ kN} \pm 0,2\%$ permet de relever l'effort et l'allongement est mesuré par l'intermédiaire d'un extensomètre installé en partie utile de l'éprouvette. Une dizaine d'essais a été réalisée et seules les ruptures ayant eu lieu au centre de l'éprouvette ont été retenues.

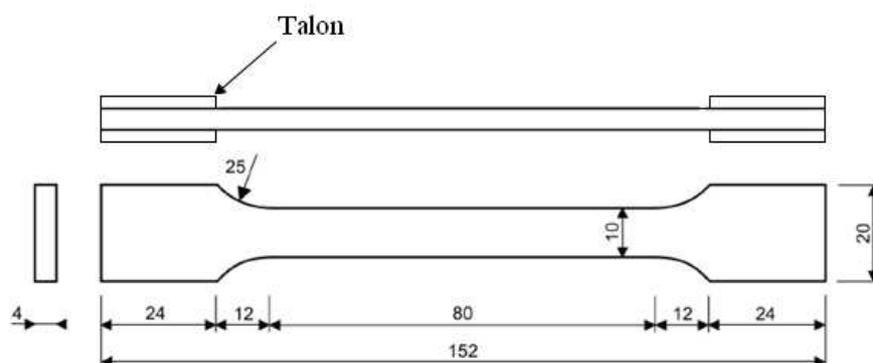


Figure III-3 : Géométrie des éprouvettes d'adhésifs selon la norme NF EN ISO 527.

Les résultats sous forme de courbes contraintes-déformations sont présentés figure III-5. De ces courbes sont déduites les valeurs du module d'Young (E_a), de la limite d'élasticité (σ_y), et de la déformation à la rupture de l'adhésif (ε_a^r) (Tableau III-5). Les valeurs du module d'Young (E_a) ont été extraites en utilisant la méthode des moindres carrés pour un niveau de déformation inférieur à 1%.

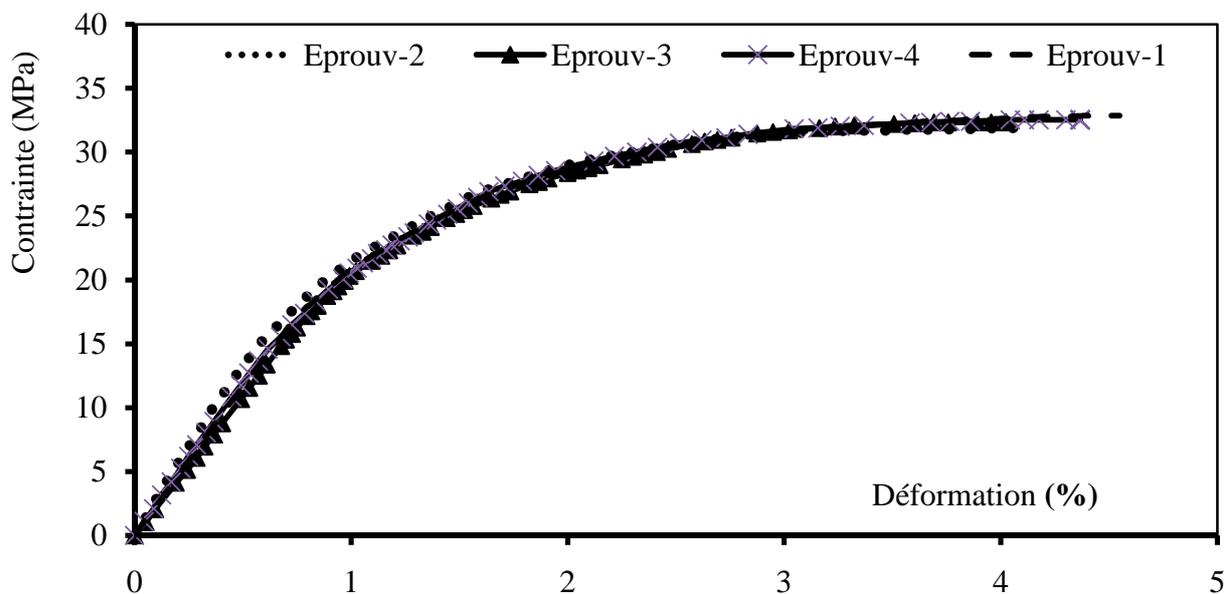


Figure III-4: Essais de traction sur éprouvettes massives.

Numéro d'éprouvette	E_a (MPa)	σ_y (MPa)	ε_a^r (%)
Eprouvette 1	2077	17	5,94
Eprouvette 2	2052	18	6,17
Eprouvette 3	2165	15,5	5,16
Eprouvette 4	2443	16	4,55
Eprouvette 5	2239	16,5	3,625
Moyenne	2195	16,6	5,09
Ecartype	157,1	0,96	1,041

Tableau III-5 : Caractéristiques mécaniques de l'adhésif 7240.

III-4-2 Caractérisation non destructive par propagation d'ondes ultrasonores

Dans le cadre des essais de traction seul le module d'Young E_a est identifié parmi les caractéristiques élastiques de l'adhésif 7240, il reste alors à trouver le coefficient de poisson ν_a , qui va nous permettre de calculer le module du cisaillement G_a à l'aide de la formule suivante :

$$G_a = \frac{E_a}{2(1 + \nu_a)} \quad (\text{III-1})$$

La technique de caractérisation par propagation d'ondes élastiques ultrasonores est retenue pour la caractérisation élastique complète de l'adhésif, car elle permet de trouver le module d'Young E_a et le coefficient de poisson ν_a . Le module d'Young mesuré avec cette méthode, peut être comparé avec celui obtenu en traction.

Pour utiliser cette méthode des échantillons d'adhésif massif d'environ 4 à 5 millimètres d'épaisseur ont été réalisés en compressant la colle entre deux plaques d'aluminium maintenues parallèles, pendant sa réticulation. Du PTFE (Teflon[®]) a été utilisé pour éviter l'adhésion entre l'adhésif et les plaques d'aluminium.

III-4-2.1 Génération d'ondes ultrasonores

Le son se propage sous forme d'ondes, qui sont des oscillations régulières du milieu transporteur. L'onde acoustique est caractérisée par le déplacement réversible car élastique et local de la matière dans les milieux solides, liquides et gazeux. Les ondes de vibration qui ont une fréquence supérieure au domaine audible (> 20 kHz) sont appelées ultrasons. La caractérisation par ultrasons fait appel à des vibrations élastiques transmises de particule à particule dans la matière. Les fréquences employées vont de quelques mégahertz à quelques dizaines de mégahertz selon l'application. Les deux principaux types d'ondes sont [PER93] :

- - Onde de volume de mode longitudinal : la direction de propagation de l'onde est identique à la direction de vibration des particules. Les ondes L, ou ondes longitudinales, ou ondes de dilatation, font intervenir des contraintes de traction-compression. Elles se propagent dans les solides, les liquides et les gaz. Ce sont des ondes de volume (Figure III-6-(a)).
- - Onde de volume de mode transversal : la direction de propagation de l'onde est perpendiculaire à la direction de vibration des particules. Les ondes T, ou ondes transversales, font intervenir des contraintes de cisaillement-torsion. Elles ne se propagent que dans les solides et les liquides très visqueux. Ce sont aussi des ondes de volume (Figure III-6-(b)).

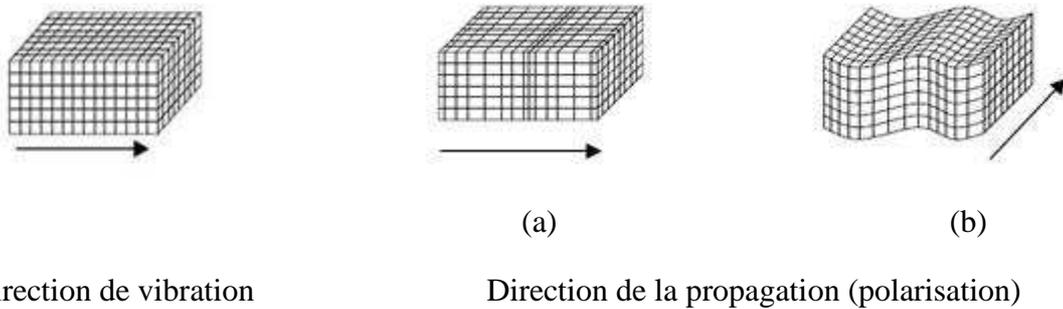


Figure III-5 : (a) : Onde de volume de mode longitudinal ;(b) : Onde de volume de mode transversal.

III-4-2.2 Dispositif de caractérisation par contact direct

Le dispositif utilisé (Figure III-7) pour la caractérisation par contact direct comprend un générateur de vibrations Panametrics Sofranel 200 MHz, un oscilloscope numérique Hewlett Packard 500 Mhz, des paires de transducteurs longitudinaux et transversaux dans un intervalle de 1 à 20 MHz. Le générateur d'impulsions est connecté au transducteur émetteur et à l'oscilloscope. Un signal de synchronisation déclenche l'horloge de l'oscilloscope. La mesure est réalisée par transmission, l'onde transmise par l'émetteur traverse l'échantillon puis est acquise par le récepteur. Les deux transducteurs sont parfaitement alignés. Le signal d'acquisition est analysé et affiché par l'oscilloscope. A partir du signal d'acquisition et du signal de synchronisation, le temps de vol est déterminé. La connaissance de la densité et de l'épaisseur de l'échantillon donne la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau. Un étalonnage préalable des transducteurs est effectué par la mesure du temps de vol sans échantillon.

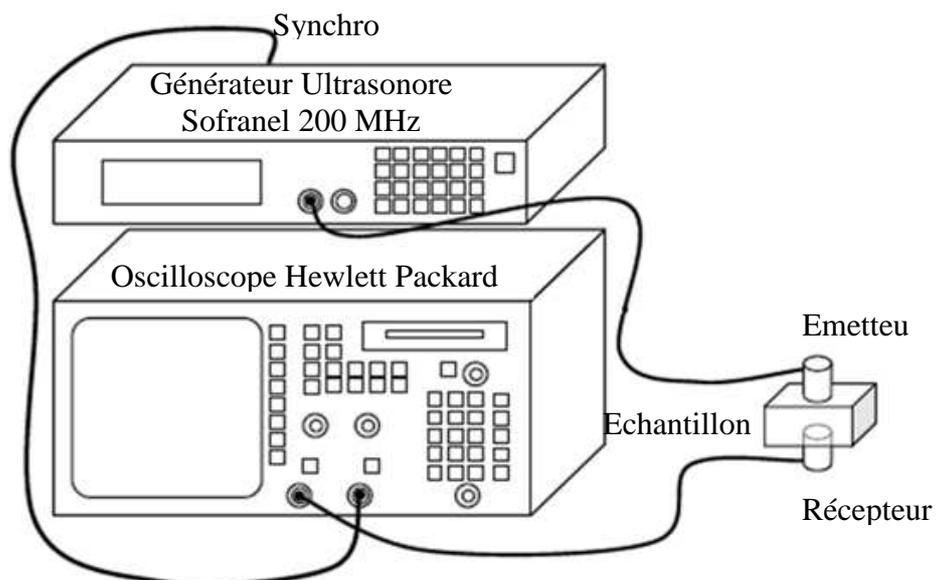


Figure III-6 : Dispositif de caractérisation par propagation d'ondes ultrasonores

Connaissant la masse volumique ρ et les vitesses de propagation des ondes longitudinales V_L et transversales V_T , les constantes élastiques sont calculées à l'aide des relations:

$$E_a = \frac{\rho_a \cdot V_T^2}{V_L^2 - V_T^2} (3V_L^2 - 4V_T^2) \quad (\text{III-2})$$

$$\nu_a = \frac{(V_L^2 - 2V_T^2)}{2(V_L^2 - V_T^2)} \quad (\text{III-3})$$

Le tableau III-6 ci-dessous récapitule les différentes valeurs du module d'Young E_a et le coefficient de Poisson ν_a , obtenus par les deux méthodes : la propagation d'ondes ultrasonores et la traction sur éprouvette massive.

	E_a (MPa)	ν_a
Propagation d'ondes ultrasonores	2315	0.34
Traction sur éprouvette massive	2195	

Tableau III-6 : Constantes élastiques de l'adhésif.

III-5 Etude expérimentale de l'assemblage collé

Après une présentation générale du collage structural et après la caractérisation de l'adhésif sélectionné sous forme massive, nous abordons dans cette partie la caractérisation en statique et en dynamique du collage structural au sein d'un assemblage. La complexité des essais a nécessité la mise en place d'une méthodologie adaptée et la réalisation d'un dispositif expérimental spécifique. L'objectif est d'identifier et de quantifier les phénomènes dissipatifs afin de mieux comprendre le comportement mécanique.

III-5-1 Configurations et géométries des essais sur les assemblages collés

De très nombreux types d'essais d'assemblages collés existent. Dans notre étude ne sont présentées que les configurations des sollicitations en cisaillement et en traction. Ces choix ont pour but de reproduire les types d'essais qui ont été réalisés avec les assemblages ponctuels, ce qui va nous permettre de faire une étude comparative entre les deux technologies d'assemblage présentant les deux grands axes de cette thèse.

Les joints collés utilisés dans les essais ont les mêmes dimensions que ceux utilisés en assemblages ponctuels. Cependant la charge entre les substrats n'est pas transférée de la même manière étant donné que maintenant seul l'adhésif va être actif et nous n'aurons plus de transfert

de charge par contact. Ce point n'est pas gênant car le point important de notre étude est de proposer une comparaison des technologies d'assemblages d'un point de vue mécanique, en utilisant les mêmes conditions d'essais et les mêmes géométries de joints.

III-5-1.1 Joints sollicités en cisaillement

Cette catégorie d'essais est une des plus importantes puisqu'un joint collé devra de préférence être sollicité en cisaillement [ADA84] [MOR90]. Pour conserver l'alignement de l'éprouvette sur la machine de traction et ainsi éviter des contraintes de traction parasites, nous devons coller sur les deux substrats deux talons de la même épaisseur que les substrats (Figure III-8).

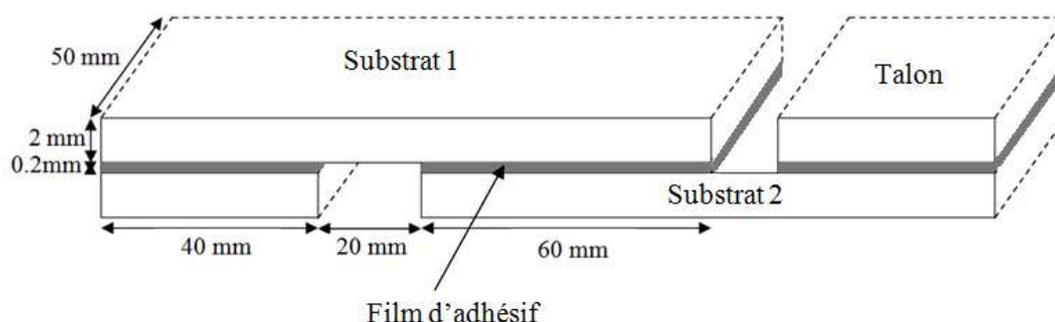


Figure III-7 : Géométrie du joint en simple recouvrement.

III-5-1.2 Joints sollicités en traction

Cette configuration d'apparence simple génère en réalité un état de contrainte multiaxial. La résistance globale en traction peut être très élevée mais est également très sensible à la qualité de l'alignement des éprouvettes et de la traction appliquée. Le moindre désalignement génère des efforts de clivage très importants qui réduisent considérablement la résistance du joint. La configuration du joint en traction se compose de deux plaques en U qui sont assemblées par un film d'adhésif (Figure III-9).

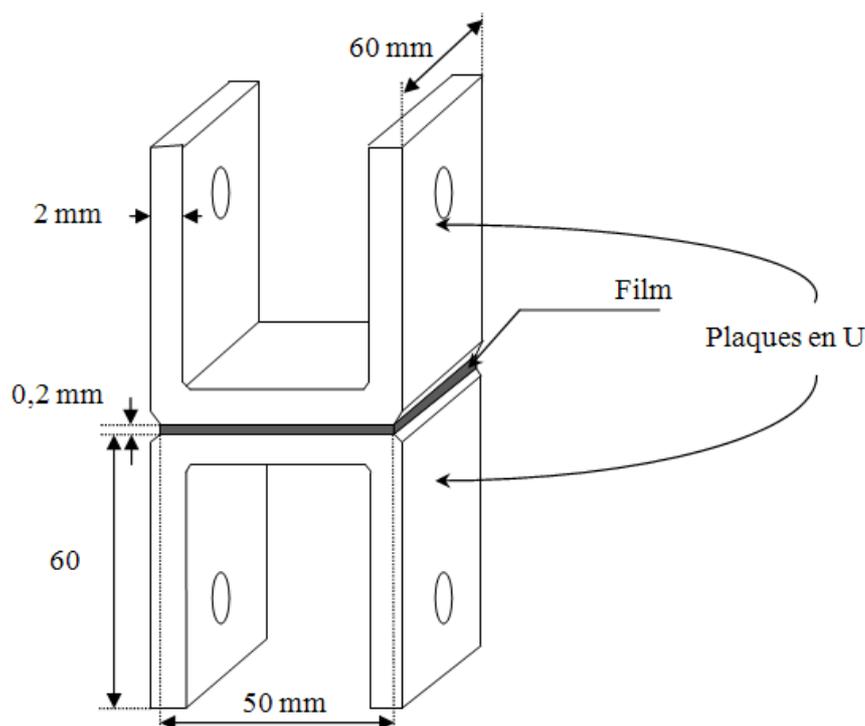


Figure III-8 : Géométrie du joint en traction.

III-5-2 Mise en œuvre et réalisation des joints collés

Afin d'obtenir des joints conformes aux configurations demandées et pour assurer la reproductibilité des essais, les éprouvettes sont toutes réalisées de la même façon, en suivant un protocole bien défini et développé ci-dessous :

- Etape de préparation des surfaces : la première chose à faire est de préparer les surfaces en les nettoyant avec une lingette propre, puis en les dégraissant avec de l'éthanol. Ceci a pour but d'éliminer l'huile utilisée pendant la fabrication des tôles en galvan et d'enlever les poussières.
- Etape de pose de l'adhésif : sur l'un des substrats, on pose l'adhésif en utilisant le pistolet pneumatique et le mélangeur des deux composants de l'adhésif. Le mélangeur est équipé d'une buse qui donne une forme circulaire au cordon de colle et qui calibre la quantité nécessaire sur toute la longueur du cordon. La vitesse de passage du pistolet doit être constante pour obtenir un cordon uniforme.
- Etape d'encollage : cette étape concerne l'assemblage des deux substrats après la pose de l'adhésif. Dans tous les cas, nous utilisons un mécanisme pour assurer l'alignement des substrats. Les détails du mécanisme d'alignement concernant les éprouvettes de cisaillement pour lesquelles il faut en même temps poser des talons, se trouvent en annexe 4. Les deux parties des joints sont assemblées et soumises à une pression pour d'écraser les cordons et d'obtenir une

épaisseur finale de 200 μm du joint d'adhésif correspondant au diamètre des billes de verre contenues dans l'adhésif.

A la fin de ces trois étapes, et après 2 heures d'encollage la pression peut être supprimée et les surplus de colle (bavures) retirés. Les joints doivent être laissés au repos au moins trois jours avant d'effectuer les essais mécaniques en statique et en dynamique. Ce temps d'attente entre la fabrication des joints et la réalisation des essais a été défini en accord avec les données du fournisseur de l'adhésif concernant la progression de la réticulation (annexe 3).

III-5-3 Essais mécaniques sur joints collés

Les essais sur joints collés vont nous permettre d'identifier le comportement de l'adhésif dans le cadre d'un collage structural, c'est à dire en prenant en compte l'effet des interfaces entre le film d'adhésif et les substrats. Dans un premier temps, nous avons réalisé des essais statiques jusqu'à la rupture des joints. Ces essais nous ont donné les caractéristiques de limite élastique nécessaires à la réalisation des essais de fatigue. Les résultats des essais seront présentés en superposant les résultats obtenus pour les joints assemblés par des éléments ponctuels. Les configurations des joints et leur installation en cisaillement et en traction sur les machines de traction sont présentés sur la figure III-10. Pour l'installation des joints en configuration de traction, les deux plaques en U sont fixées par deux boulons de 10 mm sur deux supports en acier, qui vont assurer la liaison entre le joint et les mors de la machine et éviter le rapprochement des parties verticales de l'éprouvette.

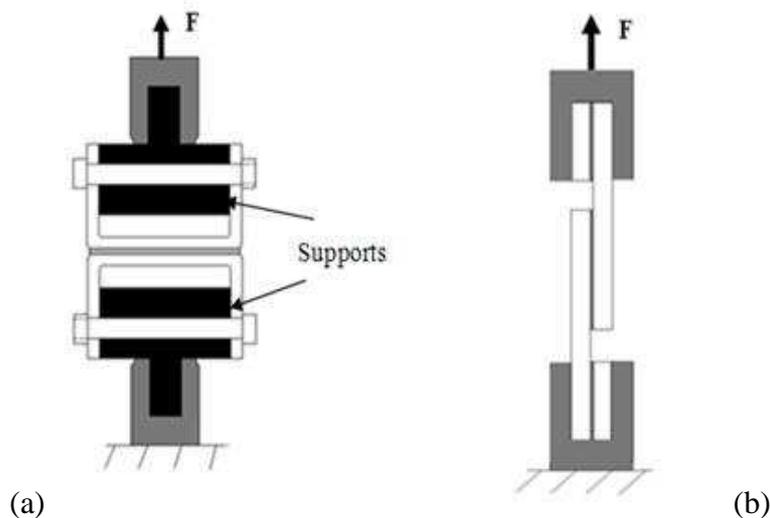


Figure III-9 : Configuration des joints (a) : en traction, (b) : en cisaillement.

III-5-3.1 Etude statique des joints collés

Les essais ont été réalisés sur une machine de traction INSTRON pilotée en déplacement à une vitesse de 2 mm/min. Nous avons testé cinq échantillons pour chaque type de joint. Les résultats des essais de cisaillement des joints en simple recouvrement sont présentés sur la figure III-11. Ces joints ont un comportement linéaire jusqu'à 26 kN et un comportement non linéaire jusqu'à la rupture à 38 kN. L'allongement total jusqu'à la rupture est de 8 mm. Les faciès de rupture montrent des ruptures cohésives ce qui traduit une bonne cohésion entre l'adhésif et les substrats (figure III-12).

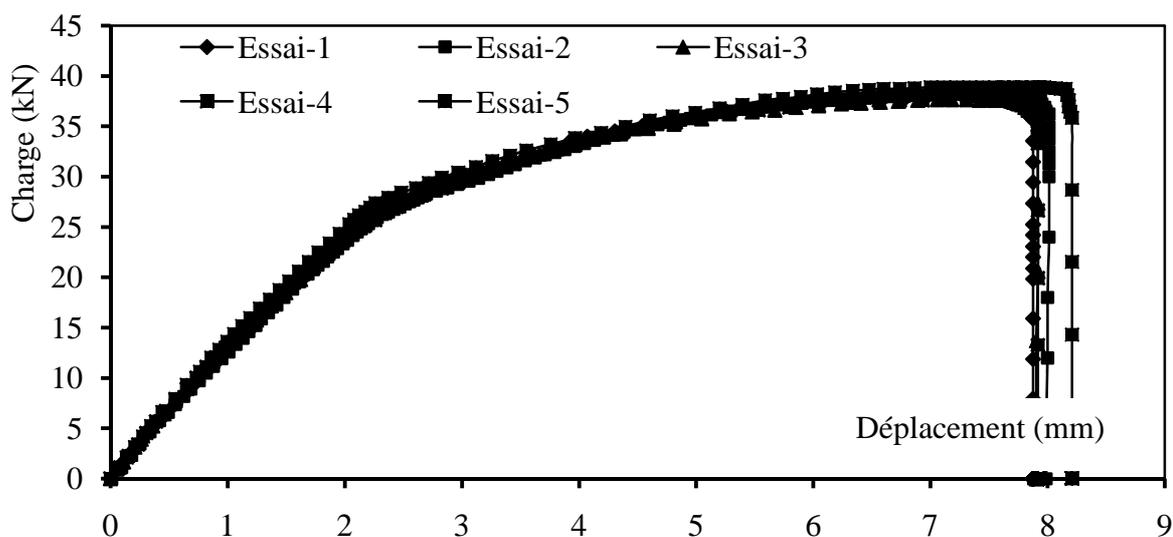


Figure III-10 : Courbes charge-déplacement des essais des joints collés obtenues en cisaillement.



Figure III-11 : Faciès de rupture en cisaillement.

Les résultats des essais des joints sollicités en traction sont présentés sur la figure III-13. La réalisation de ces essais présente une réelle difficulté au niveau de l'alignement où l'on doit s'assurer que la charge se transmet uniformément sur les deux cotés du joint, pour éviter de se retrouver dans une configuration de pelage qui tendrait à diminuer énormément la tenue mécanique du joint.

Nous pouvons constater sur ces courbes la présence de 3 zones qui traduisent la présence de 3 phénomènes lors de la traction. La première zone qui s'étend de 0 à 1 kN correspond au comportement le plus rigide de l'assemblage. En effet à cet instant de l'essai, toute la section active de l'éprouvette est sollicitée jusqu'au moment où l'adhésif casse dans une zone bien précise liée à la géométrie de l'éprouvette. Cette zone correspond aux pliages des deux parties en U de l'éprouvette où nous retrouvons un surplus d'adhésif d'où une zone de fragilité. La deuxième zone allant de 1 à 4 kN traduit la déformation des tôles toujours dans la zone des pliages du fait de la première rupture de l'adhésif. Enfin la dernière zone de 4 kN à la rupture (11 kN) correspond à la traction pure sur l'adhésif, ce qui est caractérisé par une rupture plutôt fragile du fait de la couche très fine de colle. D'un point de vue de l'allongement, nous constatons qu'il est très faible dans la première zone (0,1 mm) car seul l'adhésif est actif et il devient plus important dans les deux autres zones (déformation des tôles) avec respectivement 0,6 et 0,9 mm.

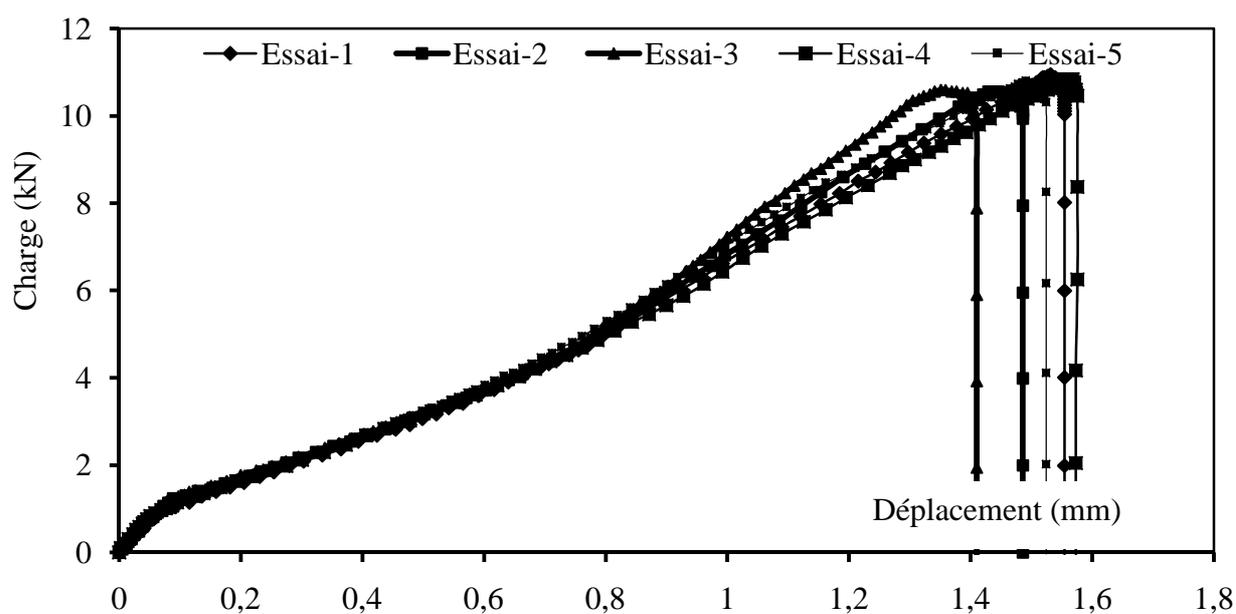


Figure III-12 : Courbes charge-déplacement des essais des joints collés obtenues en traction.

Sur la figure III-14 nous avons superposé les courbes caractéristiques du joint collé et du joint vissé sollicités en cisaillement même si les géométries n'ont pas les mêmes surfaces.

Nous pouvons alors constater que pour une même surface de recouvrement entre les deux substrats, le joint collé présente un avantage global en résistance mécanique par rapport au joint vissé. Les résultats obtenus sont largement supérieurs aux valeurs recherchées dans le cahier des charges.

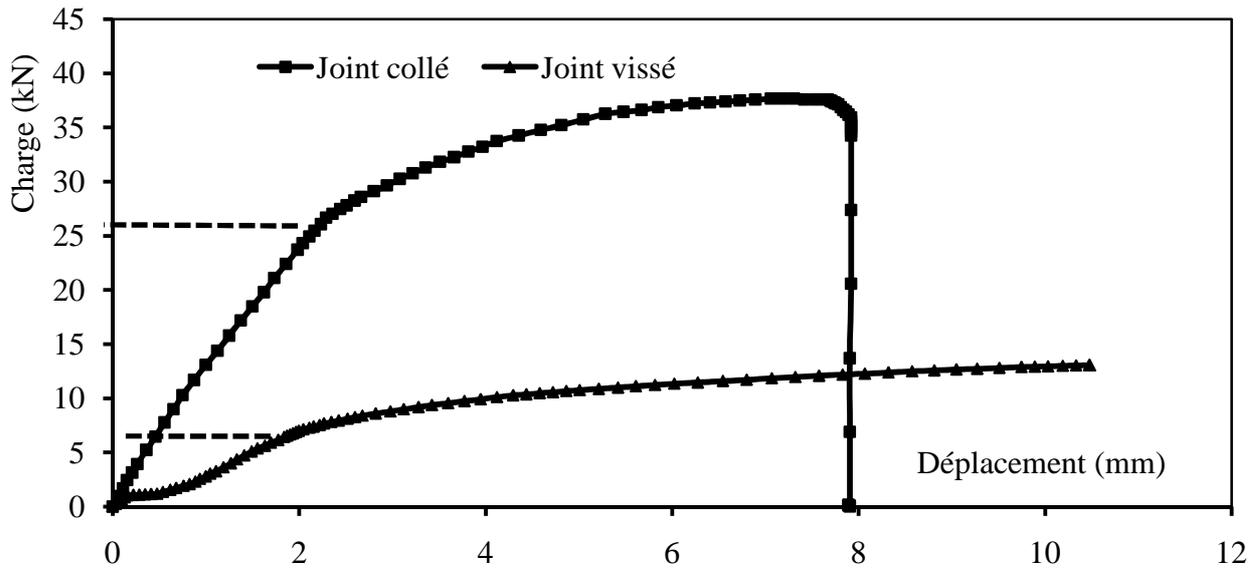


Figure III-13 : Courbes effort-déplacement des joints collé et vissé sollicités en cisaillement.

Sur la figure III-15 nous avons maintenant voulu superposer les courbes caractéristiques des joints collés et vissés en traction. L'ordre de grandeur des déplacements est tellement différent que le résultat en devient illisible. Pour cela nous avons donc tracé les courbes en parallèle.

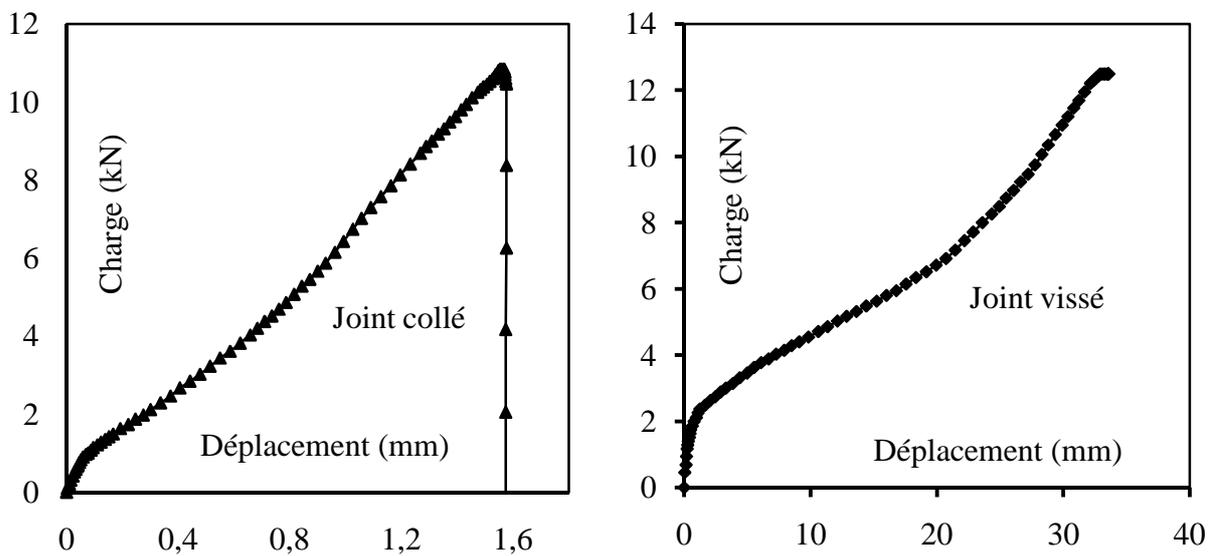


Figure III-14 : Courbes effort-déplacement des joints collé et vissé sollicités en traction

Dans ce cas nous pouvons alors constater que pour une même surface active de la liaison, les résultats en chargement sont relativement proches avec un léger avantage à la solution vissée. Cette constatation confirme bien l'idée que le joint collé doit de préférence d'être sollicité en

cisaillement et qu'il serait sûrement intéressant de l'assurer par un boulon s'il est sollicité en traction.

III-5-3.2 Etude dynamique des joints collés

Cette étude en dynamique a pour but de montrer la fiabilité des assemblages et doit donner des indications sur leur comportement en fatigue mécanique. Ces essais ont été réalisés sur la machine de fatigue INSTRON pour des valeurs de chargement directement issues du comportement en statique.

L'éprouvette est soumise à un chargement sinusoïdal à une fréquence de 30 Hz et un rapport de contrainte R de 10%. Nous avons choisi d'appliquer comme premier niveau de charge un effort correspondant à la limite élastique de l'assemblage. Par la suite, des chargements plus faibles seront appliqués afin d'être en mesure de tracer une courbe de Wöhler pour chaque configuration d'essai et d'en déterminer la limite d'endurance. Pour pratiquement chaque niveau de chargement et chaque type de sollicitation nous avons testé trois éprouvettes pour obtenir une valeur moyenne du nombre de cycles supportés. Les tableaux III-7 et III-8 ci-dessous font un récapitulatif des conditions et des résultats d'essais.

Nombre des joints testés	Force maxi (kN)	Nombre moyen de cycles	Rupture
1	18	50 000	oui
3	16	150 000	oui
3	14	667 000	oui
3	12	2100 000	oui
3	10	5167 000	oui
3	9	8740 000	oui
2	8	14 000 000	non

Tableau III-7 : Résultats des essais de fatigue en cisaillement.

Nombre des joints testés	Force maxi (kN)	Nombre moyen de cycles	Rupture
3	8	110 000	oui
3	6	1 000 000	oui
3	5	2 900 000	oui
3	4,5	5 100 000	oui
3	4	8 533 000	oui
3	3,8	8830 000	oui
2	3,5	11 000 000	non

Tableau III-8 : Résultats des essais de fatigue en traction.

A partir de tous ces résultats nous avons pu tracer les courbes de Wöhler représentant le nombre de cycles pour un niveau de charge donné (figures III-16 et III-17). Nous pouvons ainsi identifier la limite de fatigue de nos assemblages pour les deux sollicitations.

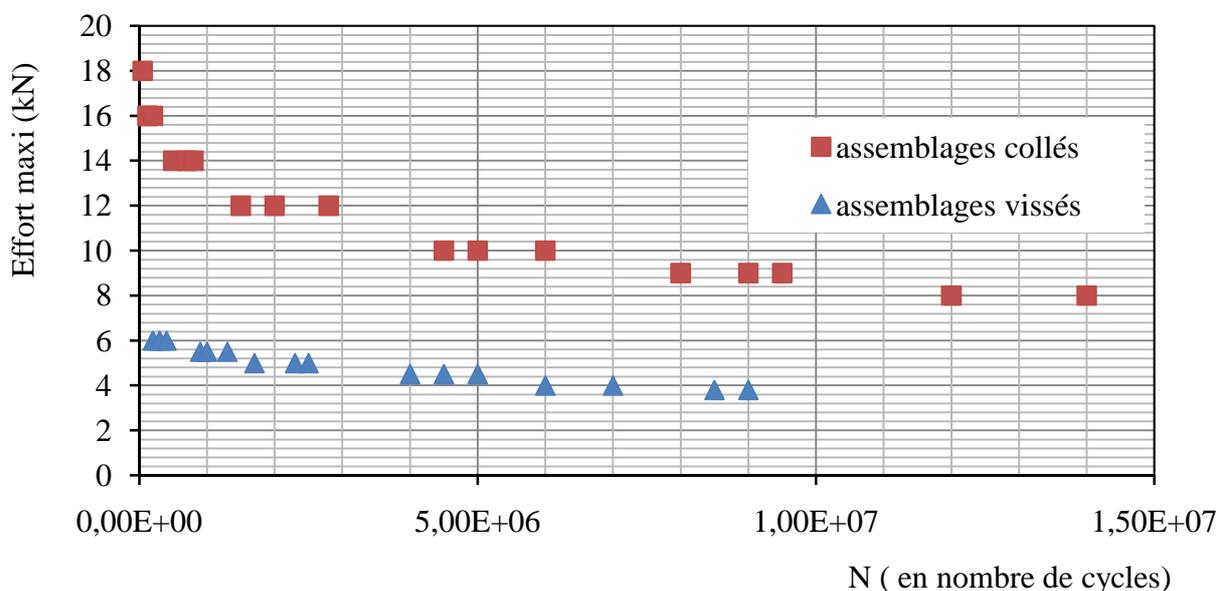


Figure III-15 : Courbes de Wöhler des assemblages collés et ponctuels en cisaillement.

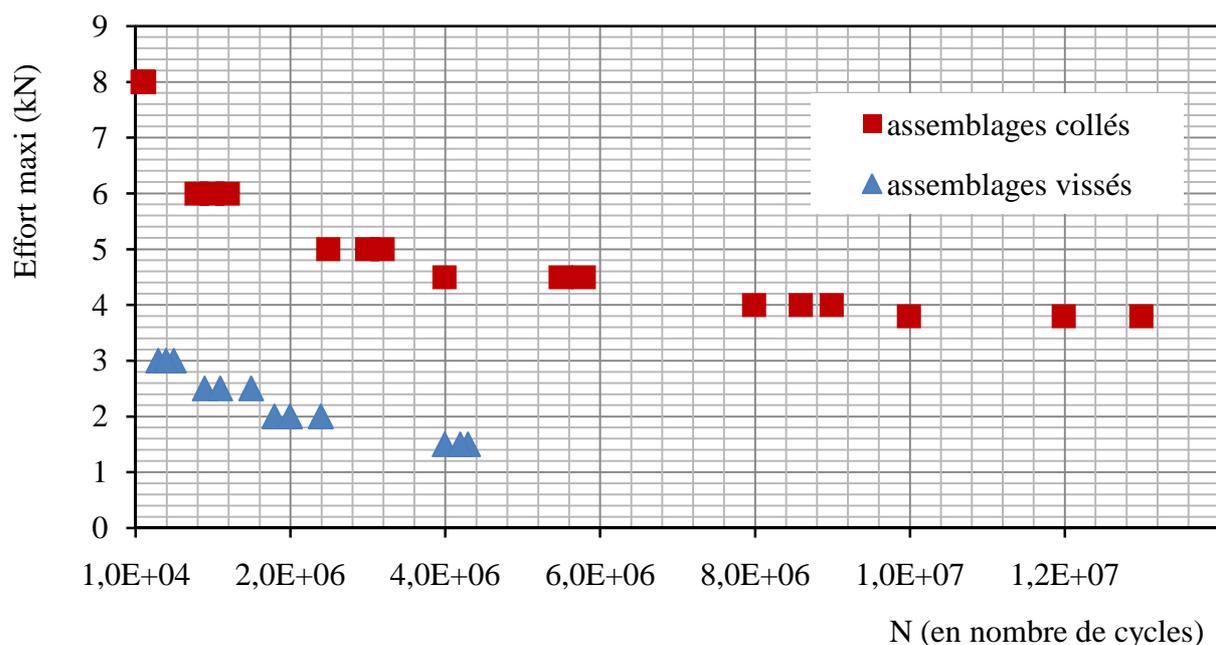


Figure III-16 : Courbes de Wöhler des assemblages collés et ponctuels en traction.

Les résultats obtenus pour la limite de fatigue des joints collés et des joints ponctuels sont présentés dans le tableau suivant (Tableau III-9).

	Joint collé	Joint vissé
Cisaillement	8 kN	4 kN
Traction	4 kN	1,5 kN

Tableau III-9 : Limite de fatigue des joints collés et vissés en cisaillement et en traction.

Ces résultats montrent l'avantage des joints collés par rapport aux joints vissés. Pour la sollicitation en cisaillement la limite de fatigue est deux fois plus importante, tandis qu'en traction elle en est environ trois fois plus importante ce qui semble paradoxal par rapport aux résultats statiques. Cette amélioration en fatigue peut s'expliquer par l'effet que dans le joint collé en traction, l'existence de l'adhésif entre les deux plaques en U jouent un rôle d'amortisseur et empêche le contact entre les métaux. De plus nous avons constaté que les fissures s'initiaient au voisinage des perçages ce qui n'est évidemment plus le cas ici (Tableau III-10).

	Joints collés	Joints vissés
Cisaillement		
Traction		

Tableau III-10 : Faciès de rupture des joints collés et vissés en cisaillement et en traction.

III-6 Modélisation numérique des essais mécaniques

III-6-1 Introduction

Les résultats des essais statiques sur les joints collés, ainsi que les résultats sur le comportement des matériaux utilisés, doivent à présent nous permettre de modéliser numériquement les assemblages utilisant le collage structural.

La mise en œuvre d'une simulation numérique nécessite initialement une définition quasi-complète de la structure étudiée et de son environnement direct. Cela suppose donc une définition des formes, des dimensions et des matériaux qui constituent l'assemblage ainsi que des conditions aux limites en effort et en déplacement, des conditions initiales, etc.

C'est dans cette perspective que s'inscrit notre calcul de validation. Il suppose une bonne fiabilité des résultats de calcul obtenus, ce qui suppose également un modèle de comportement apte à reproduire de façon suffisamment précise le comportement mécanique de la pièce. Cela se traduit, d'une part, par un modèle de comportement élaboré et, d'autre part, par une représentation fine de la géométrie, qui seront l'un comme l'autre coûteux en ressources informatiques.

Ce calcul va faire apparaître les résultats en contrainte et en déformation de la structure étudiée en fonction des sollicitations choisies. Il permet ainsi de visualiser le comportement de la structure selon les efforts qui lui sont appliquées.

III-6-2 Modélisation de l'adhésif

Afin de pouvoir nous appuyer sur les résultats des calculs, il est nécessaire que les écritures des lois de comportement, tout en restant suffisamment simples pour limiter les temps de calcul, puissent reproduire de manière précise le comportement des matériaux de la structure.

Une courbe contrainte/déformation d'un matériau se caractérise en général par deux parties [HAR84] (Figure III-18) :

- Une région avec un comportement élastique linéaire, pour les faibles déformations. La limite d'élasticité est atteinte pour une contrainte σ_y . Dans un modèle élastoplastique, cette limite marque le début de la région plastique.
- Une région de déformation non linéaire qui tend vers un plateau, jusqu'à la rupture du matériau.

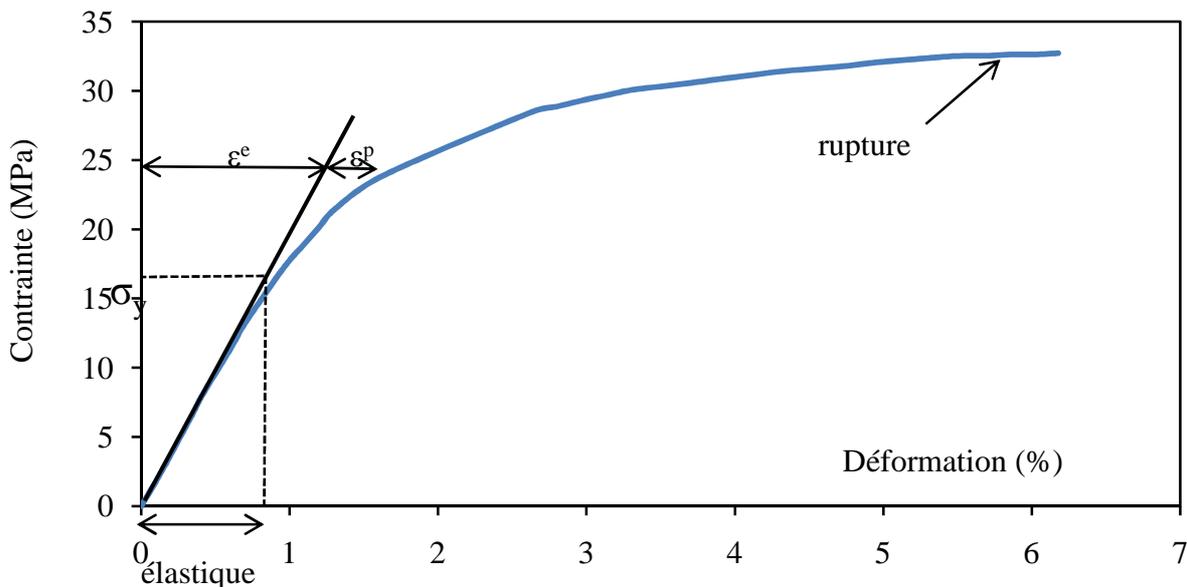


Figure III-17 : Courbe contrainte/déformation obtenue pour l'adhésif 7240.

III-6-2.1 Les grandes classes de comportement de l'adhésif

L'allure qualitative de la réponse des matériaux à quelques essais simples permet de les ranger dans des classes bien définies.

III-6-2.1.a Comportement élastique

Dans le cas où le comportement peut être considéré comme élastique linéaire (système équivalent à un ressort), la contrainte σ_{ij} et la déformation ϵ_{ij} sont reliées par l'équation III-4.

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \theta \cdot \delta_{ij} + 2\mu \cdot \varepsilon_{ij} \quad (\text{III-4})$$

Où θ représente la trace du tenseur des déformations, δ_{ij} le symbole de Kronecker, λ et μ sont les paramètres de Lamé.

III-6-2.1.b Comportement visco-élastique

Les adhésifs et plus généralement les polymères ont des comportements visco-élastiques (un amortisseur linéaire est ajouté au ressort). Leurs propriétés vont varier au cours du temps de l'essai réalisé. En deçà de la transition vitreuse T_g , ces variations sont faibles à l'échelle du temps de la plupart des essais. Mais lorsque la température se rapproche de la T_g , l'importance de la visco-élasticité sera plus grande. Les propriétés du matériau sont ainsi dépendantes des vitesses de sollicitation [2DEL81].

III-6-2.1.c Comportement élasto-plastique

À partir d'un certain niveau limite de contrainte et de déformation, la relation entre contrainte et déformation n'est plus linéaire. L'écart à la linéarité élastique a pour origine une déformation plastique.

Ainsi, la déformation totale ε peut être décomposée en une composante élastique ε^e et une composante plastique ε^p (Figure III-19) :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (\text{III-5})$$

III-6-2.2 La loi de comportement de l'adhésif 7240

Pour la simulation numérique, nous devons implémenter dans nos modèles les lois de comportement des matériaux utilisés. Dans notre étude les deux matériaux utilisés sont le galfan[®] qui est de l'acier couvert par une couche de zinc et l'adhésif 7240 qui a été sélectionné comme une colle structurale. Dans le chapitre II nous avons identifié la loi de comportement du galfan[®], qui est une loi élasto-plastique. Pour l'adhésif 7240, son comportement est lié aux conditions d'utilisations, plus précisément la température de service. Dans notre cas, nous supposons que cette température est largement au dessous de la température de transition vitreuse T_g de l'adhésif 7240. La variation des propriétés de l'adhésif est donc très faible et son comportement est stable, ce qui nous laisse le choix de prendre la loi élasto-plastique comme une loi de comportement de l'adhésif [JOA07]. Cette approche peut apparaître comme très surprenante dans la mesure où les polymères sont par nature viscoélastiques. Mais, dans le cas

présent, aux vitesses de déformation considérées, le comportement mécanique global de l'adhésif peut être simplifié sous une approche de type élasto-plastique. En effet, aux hautes vitesses de déformation, le caractère rigide est très largement prédominant.

Nous pouvons récupérer les propriétés de l'adhésif, des études réalisées dans le paragraphe III-4, le module d'Young E_a et le coefficient de poisson ν_a pour la partie élastique, et le couple contrainte-déformation point par point des courbes présentées sur la figure III-5 pour la partie plastique. Ces propriétés sont implémentées avec les propriétés du galfan[®] dans les modèles numériques non linéaires [LUC06].

III-6-3 Modèles numériques 3D non linéaires

Maintenant que nous avons réalisé une base de données expérimentales à travers les essais statiques effectués sur les joints collés (sollicités en cisaillement et en traction), nous connaissons le comportement des matériaux utilisés dans l'assemblage par collage structural. Nous pouvons, afin de simuler ces essais et obtenir numériquement des résultats qu'on pourra comparer à ceux obtenus par expérimentation, créer à l'aide du code de calcul ABAQUS[®] des modèles numériques utilisant la méthode des éléments finis [KOF99].

III-6-3.1 La géométrie

La géométrie adoptée est celle de l'assemblage collé en simple cisaillement. Elle correspond aux essais effectués en statique. Il y a deux zones dans ce modèle :

- la première zone est celle des substrats (correspondant au recouvrement). Dans cette zone, deux parties se distinguent : les substrats et le film de l'adhésif
- la deuxième zone correspond aux substrats hors recouvrement.

III-6-3-2 Le maillage

Le maillage est automatiquement généré à partir de la construction de domaines correspondant aux zones géométriques. Pour le maillage, l'élément choisi est l'élément volumique (« brick ») C3D20 [ABA07]. Les substrats, hors et sur le recouvrement, sont modélisés par des éléments à 8 nœuds (24 degrés de liberté). Le maillage est raffiné sur les deux extrémités de la longueur de recouvrement (Figure III-19).

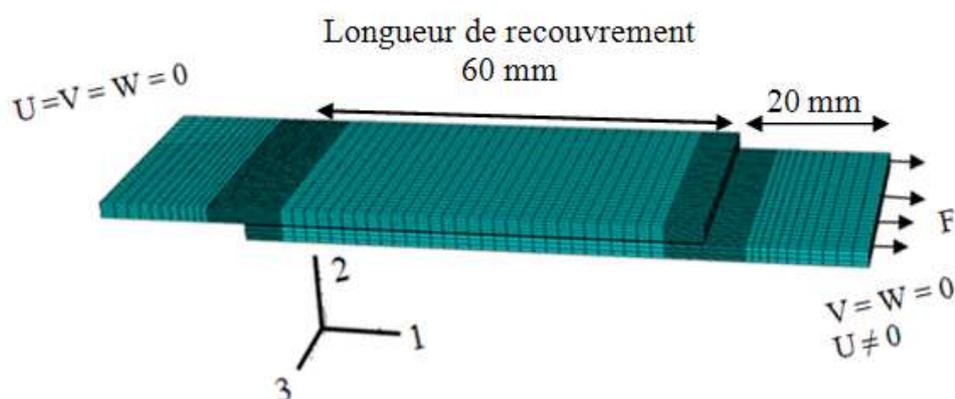


Figure III-18 : Maillage du modèle de l'assemblage collé en cisaillement et conditions aux limites/chargement.

III-6-3.3 Les matériaux

Les données matériaux peuvent être de nature élastique. Cependant, sur leur forme la plus développée, les lois de comportement des substrats en galfan® et de l'adhésif 7240 type élastoplastique peuvent être introduites. Le critère de plasticité sera le critère de Von Mises.

III-6-3-4 Les conditions aux limites et le chargement

La symétrie par rapport au plan perpendiculaire au film d'adhésif (plan 12) contenant la direction longitudinale est adoptée, de sorte que seule la moitié de l'assemblage est représentée. L'assemblage est encasté à une extrémité et libre de se déplacer dans la direction longitudinale uniquement à l'autre extrémité. Un effort F est appliqué sur l'extrémité libre (Figure III-19).

III-6-3-5 Gestion des calculs et exploitation des résultats

Le lancement du calcul est effectué par la création d'une étape de chargement (Step). Le nombre d'incrémentations doit être précisé, le non linéarité géométrique doit être activé. L'effort F appliqué est de 38 kN, c'est l'effort à la rupture extrait des courbes de comportements des joints collés en cisaillement (Figure III-12). Nous présentons sur la figure suivante (Figure III-20) une illustration de la déformée obtenue par la modélisation numérique de l'assemblage collé en simple cisaillement.

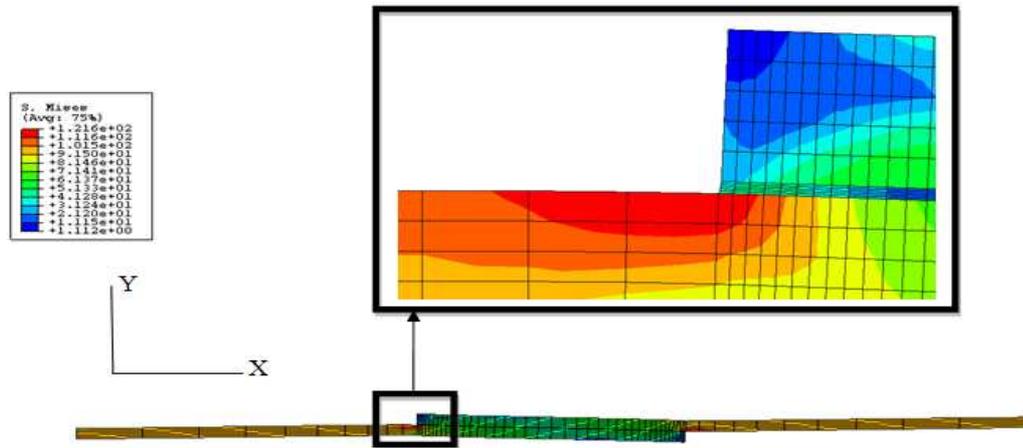


Figure III-19 : Déformée de l'assemblage collé en simple cisaillement.

Le premier résultat à exploiter de ce modèle est le déplacement U_1 en fonction de l'effort appliqué afin de le comparer avec les résultats obtenus précédemment par expérimentation (Figure III-21). Ces courbes montrent une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques. Nous obtenons un effort à la rupture de 37850 N pour 8 mm de déplacement.

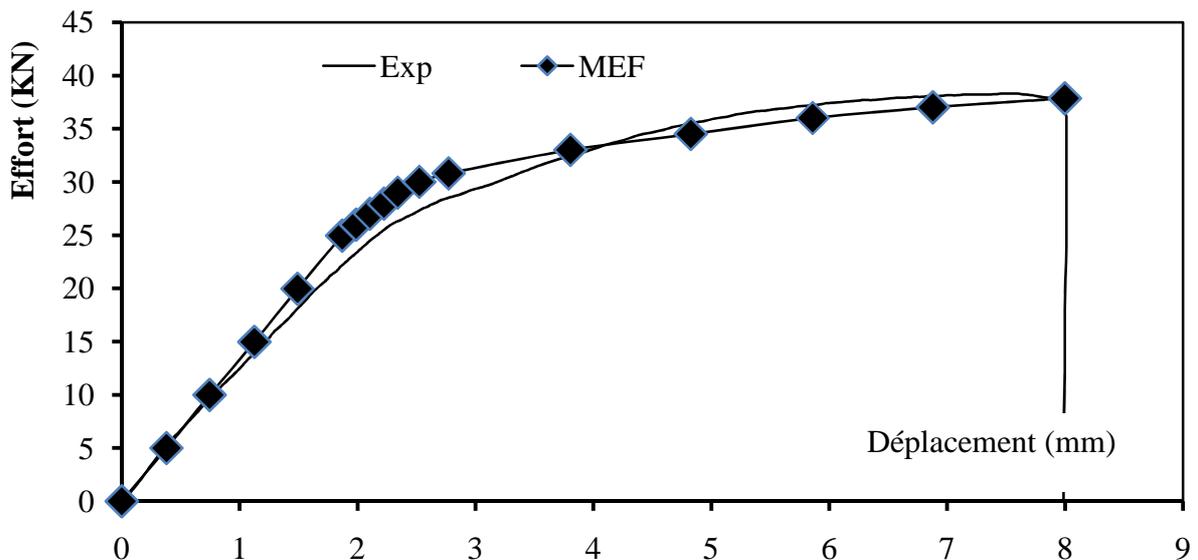


Figure III-20 : Courbes effort-déplacement expérimentale et numérique en cisaillement.

Pour continuer l'étude comparative entre les résultats des essais expérimentaux et numériques, nous avons réalisé un essai en statique sur un joint en simple recouvrement. Sur ce joint et pendant l'essai nous avons utilisé la stéréo corrélation d'images en 2D, en utilisant le même dispositif utilisé pour étudier le comportement du galfan (Chapitre II, paragraphe II-3). L'objectif de cette manipulation est d'observer la déformation du film d'adhésif en auscultant l'une des deux extrémités de la longueur de recouvrement (10 mm de la distance de recouvrement). La raison essentielle de ce choix est la distance à respecter entre la caméra et

l'échantillon qui nous empêche de visualiser toute la longueur du recouvrement (Figure III-22-b).

A partir du modèle numérique et des données récupérées de l'essai en corrélation d'images, nous avons tracé les courbes de contraintes de cisaillement en fonction de la longueur de la surface de recouvrement. Ces courbes ont pour but, d'une part, de comparer les résultats numériques et expérimentaux et, d'autre part, de localiser la concentration des contraintes (Figure III-23). D'après ces courbes, la contrainte de cisaillement maximale est autour de 22 MPa, Cette contrainte maximale se trouve à l'extrémité de la longueur de recouvrement.

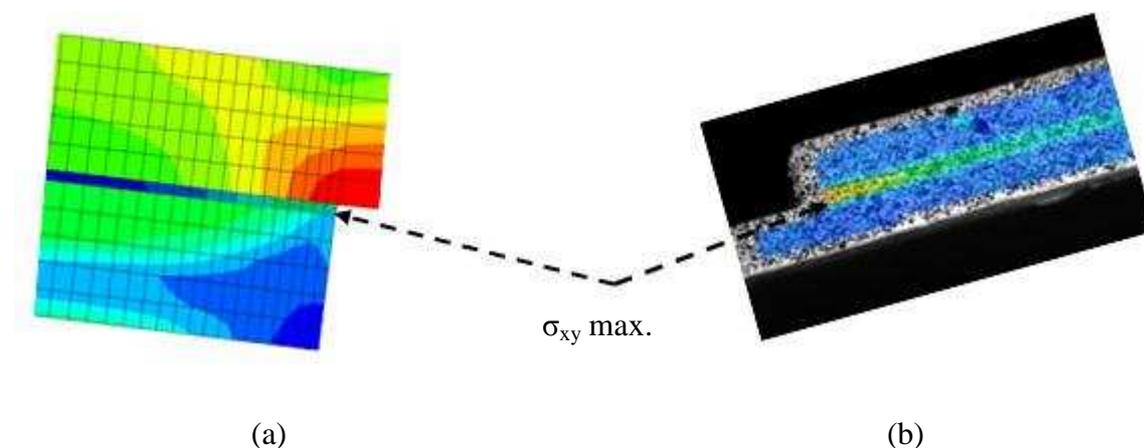


Figure III-21 : Contraintes de cisaillement σ_{xy} sur l'extrémité d'un simple recouvrement;
(a) : modèle numérique, (b) : modèle expérimental en corrélation d'images.

D'après ces résultats, nous constatons que le transfert de charge se fait en majorité, par les extrémités du recouvrement ce qui ouvre la voie vers l'optimisation de la longueur de la partie couverte. Cette longueur est liée d'une manière proportionnelle à la charge transférée et à partir d'une certaine distance du bord libre la capacité de chargement devient constante [HAR84]. Ce modèle numérique peut être un point de départ vers une modélisation simple à l'échelle d'une structure complète comme le coffre de traction. Dans cette application industrielle, l'adhésif sera modélisé en élément 3D cohésif qui existe sur le code de calcul ABAQUS® [ABA07].

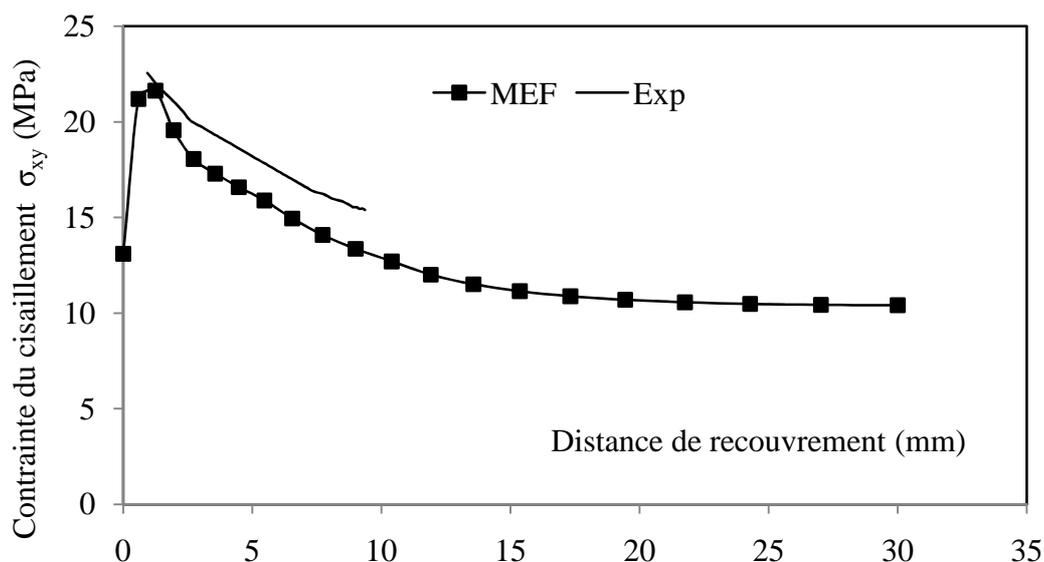


Figure III-22 : Les contraintes du cisaillement σ_{xy} en fonction de la distance de recouvrement.

III-7 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons étudié le collage structural en tant qu'une solution alternative pour l'assemblage des coffres de traction. Nous avons suivi une méthodologie scientifique basée d'abord par la sélection de l'adhésif structural (7240 B/A) commercialisé par la société 3M[®]. Cet adhésif a servi à l'identification de la loi comportement à l'état massique avant d'aborder : le collage structural, les essais en statique et en dynamique en cisaillement et en traction.

En partant d'une loi élasto-plastique pour l'adhésif, nous avons pu développer un modèle numérique 3D non linéaire sur le logiciel ABAQUS[®]. Ce modèle nous a permis de reproduire numériquement les résultats des essais expérimentaux en statique. Il nous a permis également la compréhension du comportement d'un joint collé, configuré en simple recouvrement et sollicité en cisaillement. Les résultats obtenus avec le collage structural sont favorables comparés aux assemblages ponctuels, ce qui signifie que le collage structural peut être une technologie d'assemblage concurrente aux jonctions ponctuelles dans les coffres de traction. Pour aller plus loin sur le collage structural, il faut valider sa capacité en matière de tenue mécanique, vis-à-vis des contraintes environnementales, et plus précisément sa résistance aux vieillissements hygrothermiques. L'objectif suivant est donc de réaliser des études complémentaires sur des joints collés qui ont subi des vieillissements hygrothermiques accélérés, et de mesurer les taux de dégradation de ces joints en fonction de la durée du vieillissement. Il sera ensuite nécessaire d'étudier les comportements de l'adhésif en fonction de la température de réticulation.

Chapitre IV : Dégradation hygrothermique des assemblages collés

Maintenant que nous avons étudié le comportement mécanique des assemblages collés sollicités en cisaillement et en traction, nous pouvons traiter dans ce chapitre l'effet du vieillissement hygrothermique et de la dégradation de la tenue mécanique des joints collés. Ces joints ont été assemblés selon les mêmes conditions utilisées dans le chapitre III, et la température de réticulation de l'adhésif 7240 est la température ambiante. Ensuite, nous avons étudié l'effet de l'optimisation du cycle de réticulation sur les propriétés mécaniques et thermiques de l'adhésif dans son état massique, et sur la tenue mécanique des joints collés.

Au cours de sa durée de vie en service, l'assemblage collé est soumis à des conditions environnementales très variées, qui vont influencer ses propriétés mécaniques. Les environnements hygrothermiques, se révèlent parmi les plus sévères pour les structures collées, en particulier au niveau des interfaces adhésif/substrats. Une des exigences nécessaire pour la validation de l'utilisation de cette technique d'assemblage est donc de certifier que l'assemblage va pouvoir conserver une part significative de sa capacité à supporter des efforts tout au long de son utilisation [NAS05].

Une exposition en milieu chaud et humide va provoquer des vieillissements physicochimiques accélérés des résines époxydiques, gouvernés par des cinétiques de diffusion spécifiques. L'étude de la durabilité des assemblages passe tout d'abord par la détermination des lois de diffusion au sein du polymère et la compréhension des conséquences de cette diffusion sur les propriétés mécaniques de l'adhésif [MON03]. Il est ensuite nécessaire de s'intéresser plus précisément à l'assemblage lui-même afin de déterminer l'influence du vieillissement vis-à-vis des deux interfaces colle/métal présentes dans le joint.

Cependant, la tenue en milieu hygrothermique est d'autant meilleure que la réticulation d'un adhésif est achevée. Donc ce chapitre est scindé en deux parties :

- La dégradation hygrothermique des joints collés avec un adhésif qui réticule à température ambiante
- L'optimisation du cycle de réticulation de l'adhésif et son effet sur les propriétés thermomécaniques et sur la dégradation hygrothermique.

IV-1 Vieillissement hygrothermique

Le vieillissement hygrothermique d'un adhésif époxyde provoque, par diffusion de l'eau au sein du réseau, un changement des propriétés mécaniques. Dans le cas d'assemblages par collage, certains substrats métalliques peuvent changer les propriétés chimiques de l'adhésif époxy par réaction du durcisseur avec les oxydes métalliques en surface. Cette modification

chimique a des répercussions sur les propriétés thermiques et thermomécaniques du réseau époxy non vieilli [PRO06] [DOY08].

Comparé à d'autres techniques d'assemblage, le collage présente de nombreux avantages, tels que l'allègement des structures, la réduction des coûts ou encore la possibilité d'assembler des matériaux différents. Cependant, l'un des principaux inconvénients de cette technique réside dans le vieillissement mal maîtrisé du joint collé. D'une manière générale, la contrainte, la chaleur et l'humidité constituent les principaux facteurs d'endommagement de l'assemblage, soit en agissant directement sur les propriétés intrinsèques de l'adhésif, soit en diminuant fortement les propriétés d'adhésion à l'interface substrat/adhésif [BIS98]. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'évolution des propriétés mécaniques, de l'assemblage par collage structural et particulièrement à la dégradation mécanique des joints collés sous atmosphère chaude et humide du point de vue de la durée de vie et de la dégradation des performances.

IV-1-1 Prédiction de la durée de vie

La majorité des études réalisées sur la dégradation thermique ont pour but, soit la prédiction de durée de vie des composites ou des polymères, soit l'extrapolation des propriétés après un temps donné d'utilisation [TSO99]. La prédiction de la durée de vie, ou l'extrapolation des propriétés, sont réalisées grâce à des essais de vieillissement accélérés menés dans des conditions sévères (température, humidité ...) pendant des temps courts. Ces essais permettent de modéliser l'évolution des propriétés mécaniques en fonction du temps du vieillissement hygrothermique. La majorité des prévisions supposent une variation des propriétés avec la température selon une loi de type Arrhenius. Cette loi permet de lier la vitesse d'évolution u d'une propriété quelconque à la température absolue T :

$$\ln u = -\frac{A}{T} + B \quad (\text{IV-1})$$

De là, il découle que le temps t nécessaire pour obtenir un état donné de dégradation est relié lui-même à la température, de la façon suivante :

$$\ln t = \frac{A}{T} + C \quad (\text{IV-2})$$

A, B et C étant des constantes.

Si l'état de dégradation considéré est apprécié par la valeur limite atteinte par une propriété de l'adhésif, on peut définir, par cette méthode, une durée de vie t , dont la relation avec

la température se traduit par une relation linéaire dans le système de coordonnées ($\ln t$, $1/T$). Le principe de cette détermination est le suivant : les joints sont soumis à l'action prolongée de la température et de l'humidité. Nous pouvons alors déterminer l'évolution d'une ou de plusieurs propriétés p en fonction du temps d'exposition, ce qui permet de tracer la courbe des variations $p = f(t)$ (Figure IV-1).

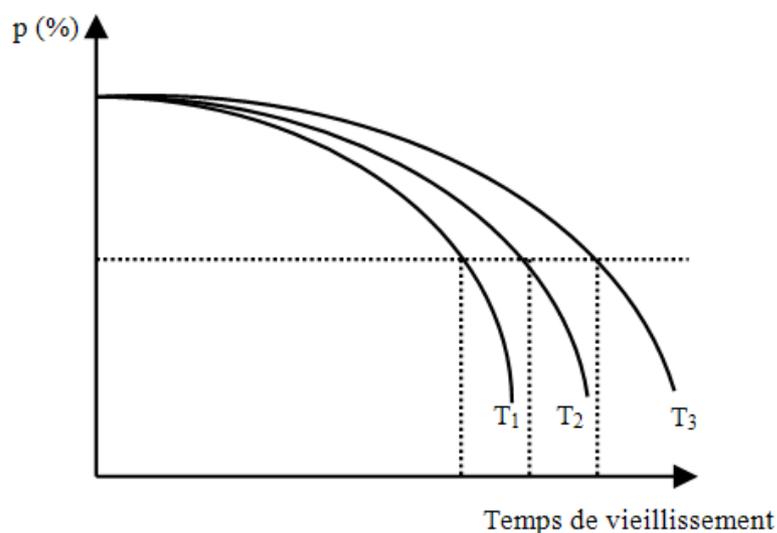


Figure IV-1 : Temps nécessaires pour atteindre 50% de dégradation de la propriété p à chaque température (T_1 , T_2 , T_3 , etc...).

Le choix d'une valeur limite de la propriété p , permet alors de trouver le temps t pour lequel cette limite est atteinte. Ce temps est nommé durée de vie. En répétant les essais à diverses températures, il est possible de tracer une courbe de durée de vie $t = f(T)$ (Figure IV-2) Puis, par extrapolation, nous pouvons déduire de cette courbe de durée de vie, la température T correspondant à une durée de vie conventionnelle servant de référence. Cette température appelée indice de température du matériau considéré est nommée IT .

C'est donc de cette manière que nous avons choisi de procéder pour déterminer la durée de vie conventionnelle des assemblages collés par l'adhésif 7240. Dans un premier temps nous allons détailler le protocole expérimental qui sera appliqué dans tous les vieillissements hygrothermiques réalisées dans cette étude. Dans un deuxième temps, nous essaierons d'exploiter les résultats obtenus afin de déduire la durée de vie conventionnelle des joints collés.

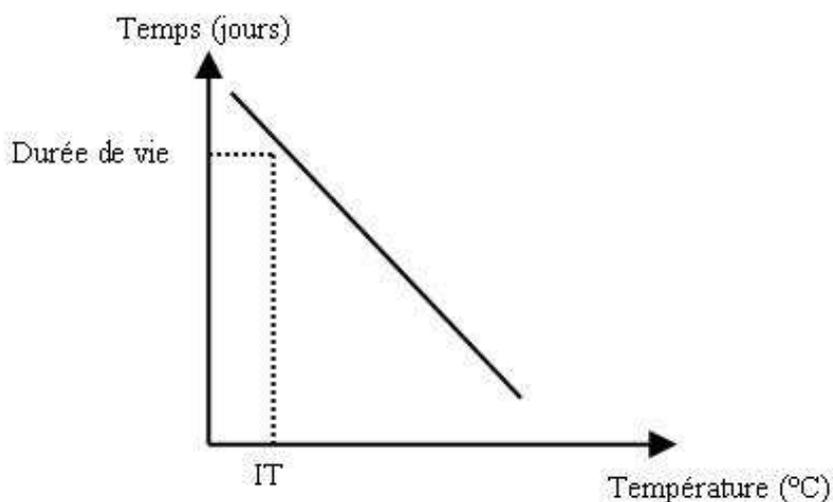


Figure IV-2 : Durée de vie conventionnelle en fonction de la température.

IV-1-2 Protocole expérimental du vieillissement hygrothermique accéléré

Dans le chapitre précédent, nous avons traité le collage structural en utilisant deux types caractéristiques de joints collés. Pour le premier, le joint est en traction c'est-à-dire que l'effort appliqué est perpendiculaire à la couche d'adhésif ; pour le second le joint est cisailé, c'est à dire que l'effort est parallèle à la couche d'adhésif. Les dimensions des joints et les paramètres des essais utilisées dans ce chapitre sont celles utilisés dans le chapitre précédent (paragraphe III-5-2). Les différentes éprouvettes ont alors été soumises à des contraintes environnementales avec contrôle des deux facteurs que sont l'humidité et la température.

Pour démarrer le vieillissement hygrothermique accéléré, nous avons utilisé des bocaux en verre étanches et adaptés aux hautes températures. Les éprouvettes ont donc été placées dans ces bocaux et l'environnement humide a été généré par ajout d'eau distillée (100 ml pour un bocal de 3 litres). Les bocaux ont ensuite été placés dans un four à plusieurs températures dont le choix est justifié dans le paragraphe suivant. Sous l'effet de la température l'évaporation de l'eau distillée a permis de simuler un milieu humide avec un taux d'humidité absolue (RH= 95%). Cette valeur du taux d'humidité a été contrôlée en effectuant des mesures avec un hygromètre. Afin d'éviter le contact des éprouvettes entre elles et contre les parois des bocaux, elles ont été placées verticalement à une distance calibrée par des intercalaires (Figure IV-3).

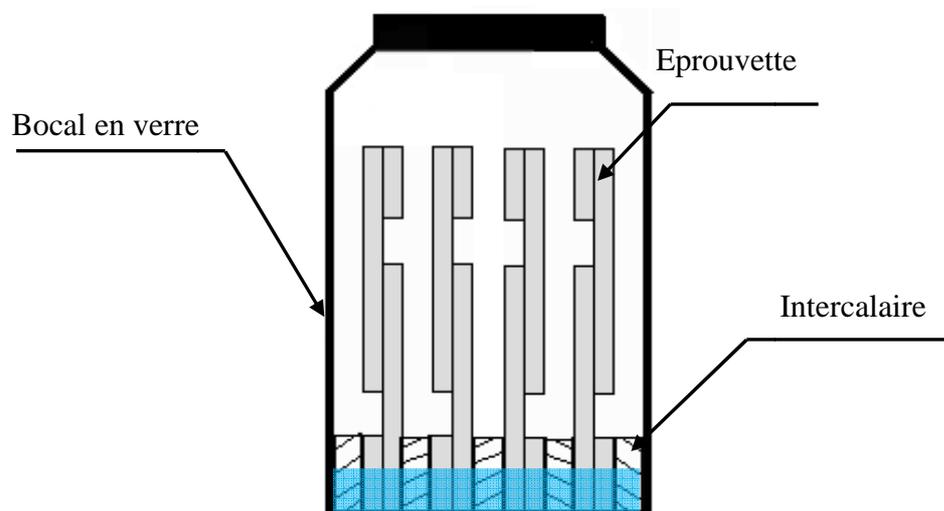


Figure IV-3 : Dispositif de vieillissement pour éprouvette de cisaillement.

IV-1-3 Températures de vieillissement-facteur d'accélération

La dégradation des joints collés structuraux en milieu humide peut être accélérée par de nombreux facteurs et notamment le niveau de température [GRA89]. En effet, l'élévation de la température active les processus de diffusion de l'eau au sein du joint de colle.

Les effets de l'élévation de la température sur la diffusion de l'eau et par conséquent le vieillissement humide et la dégradation de la liaison, sont en général traduits en suivant une loi d'Arrhenius. Ceci permet, par la suite, d'extrapoler les résultats à des niveaux de température non testés. Or notre objectif étant de réaliser des vieillissements accélérés, nous devons choisir au minimum 3 niveaux de température pour provoquer des dégradations en un temps réduit tout en conservant ces températures dans la plage d'utilisation de l'adhésif époxy utilisé. Cette plage pour l'adhésif 7240 est située entre -55°C et 120°C , nous avons donc choisi les trois températures suivantes : 80, 95 et 110°C .

IV-1-4 Indicateur d'endommagement

Afin d'estimer au mieux l'influence du vieillissement hygrothermique nous avons choisi que l'indicateur d'endommagement p serait l'effort à rupture F_r , ce qui conduit à $p=100\%$ pour les éprouvettes de référence non vieilles et à $p=50\%$ lorsque le vieillissement a amené à une chute de l'effort à rupture de 50%. Ainsi la valeur de cet effort sera identifiée après chaque prélèvement, par un essai de traction dans les conditions pratiquées jusque là et présentées précédemment. Les résultats des essais présentés sous forme de courbes effort-déplacement permettent d'identifier rapidement le niveau charge maximal que les joints peuvent supporter, ainsi que leur allongement. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux indiquant le

temps du vieillissement et l'effort à la rupture (Fr) obtenu pour les différentes températures auxquelles les joints ont été exposés.

IV-1-5 Procédure et fréquence de prélèvement

Nous n'avons au départ aucune idée de la vitesse de dégradation des joints. Aussi nous avons fixé pour temps initial l'instant précis où les bocaux sont déposés dans le four et avons ajusté la fréquence des prélèvements en fonction du taux de dégradation. Après deux jours de vieillissement à 80°C les essais de traction sur les joints prélevés n'ont montré aucune dégradation de l'effort à la rupture, rendant le prélèvement effectué inutile. Cette procédure a nécessité de réaliser un grand nombre d'éprouvettes car il était impensable de lancer plusieurs cycles de vieillissement pour un même niveau de température à des instants différents.

IV-1-6 Démarche expérimentale

Le protocole expérimental utilisé pour les vieillissements réalisés après la fabrication des joints, suit la chronologie suivante :

- Rangement des éprouvettes dans les bocaux.
- Mise au four des bocaux pour trois niveaux de température $T=80, 95, 110^{\circ}\text{C}$.
- Réalisation de prélèvements périodiques de 4 éprouvettes de chaque type de montage.
- Séchage des éprouvettes.
- Réalisation d'essais statiques pour déterminer Fr.
- Mesure du taux de dégradation et décision d'ajustement du prochain prélèvement.

Dès que la dégradation atteint 50%, la procédure de vieillissement est arrêtée, le temps t obtenu est enregistré et peut alimenter la courbe d'Arrhenius reliant le temps t (jours) de dégradation en fonction de la température T ($^{\circ}\text{C}$).

IV-1-7 Résultats obtenus

Les résultats correspondant à l'évolution du comportement en cisaillement après vieillissement hygrothermique accéléré sont reportés dans le Tableau IV-1. Tous les résultats présentés sont obtenus en faisant une moyenne sur 4 éprouvettes testées pour chaque prélèvement. Ce tableau confirme et quantifie la diminution de la grandeur mécanique testée (Fr) au cours du temps de vieillissement.

La première lecture de ce tableau montre que plus la température est élevée plus la dégradation devient importante et, par conséquent, le temps pour atteindre 50% de chute de

l'effort à rupture diminue. Ce temps est de 120 jours pour le vieillissement à 80°C et de 30 jours pour le vieillissement à 110°C. Nous avons alors représenté sur la figure IV-4 l'évolution de la dégradation des joints en fonction du temps.

Temps de vieillissement (jours)	Fr à 80°C (%)	Fr à 95°C (%)	Fr à 110°C (%)
0	100	100	100
5	--	--	79
10	--	75	52
15	93	--	--
25	85	60	--
30	--	--	50
40	--	52	--
45	74	--	--
60	--	50	--
75	66	--	--
120	50	--	--

Tableau IV-1 : Evolution de Fr (%), au cours d'un vieillissement hygrothermique (HR=95%) pour des joints sollicités en cisaillement.

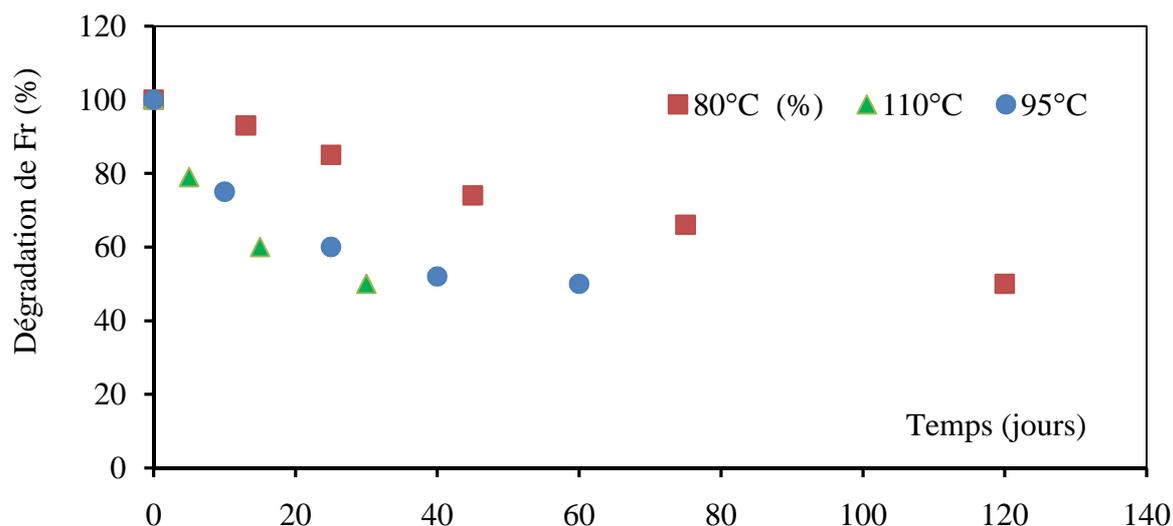


Figure IV-4 : Dégradation des joints en montage de cisaillement en fonction du temps.

En dehors de l'évolution de la valeur à rupture en fonction du temps de vieillissement, nous avons voulu voir l'influence sur le comportement tout au long de l'essai. Pour cela, nous avons superposé sur un même graphique les courbes correspondant aux différents temps de vieillissement à 80°C (Figure IV-5).

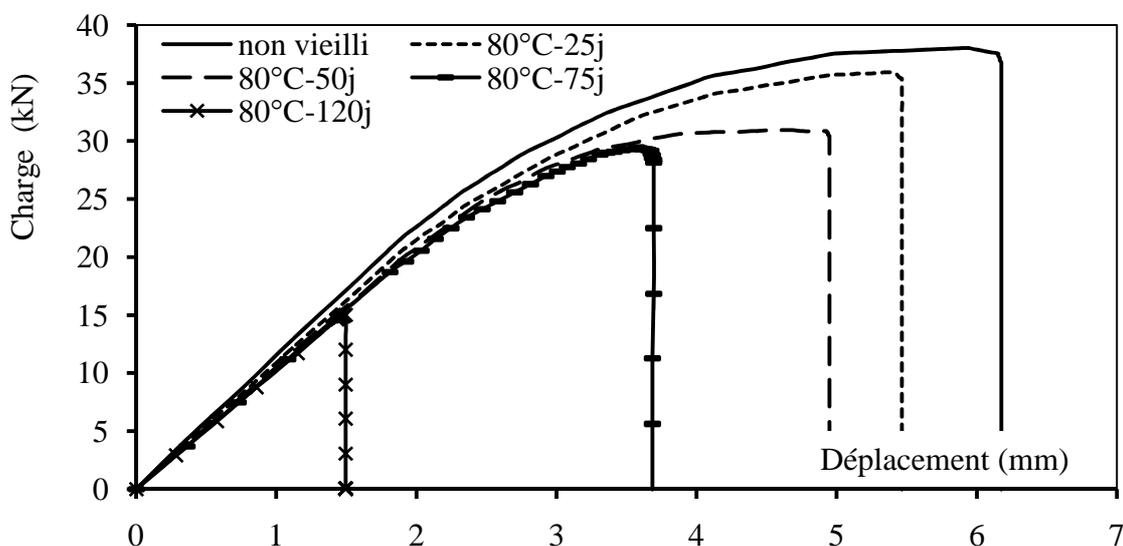


Figure IV-5 : Courbes effort/déplacement avant et après vieillissement (RH = 95% et T = 80°C).

Nous pouvons observer la diminution de la résistance à la rupture en fonction de la durée du vieillissement, ce qui est traduit dans le tableau précédent. Par contre, ce qui est également intéressant, c'est de constater que la rupture survient dans des zones différentes de la courbe effort-déplacement, ce qui révèle un changement de comportement mécanique de la liaison collée. Ainsi, pour l'éprouvette non vieilli (t = 0), l'échantillon rompt dans la zone de

déformation non linéaire correspondant à une plastification du comportement. Après 75 jours de vieillissement, la rupture intervient au début de la zone non linéaire et après 120 jours, le joint cède dans la zone linéaire.

Nous pouvons constater aussi une faible variation de la rigidité du joint, ce qui peut s'expliquer par la diminution de la température de transition vitreuse T_g pendant le vieillissement. Cette diminution de la T_g est liée à la densité de réticulation de l'adhésif [BAR99] [BUC00]. A partir de ces résultats obtenus, nous pouvons donc, émettre deux hypothèses qui expliquent la dégradation rapide des joints :

- Le vieillissement pendant un temps long (à 80°C pendant 120 jours), baisse la T_g de l'adhésif à une température proche de celle de l'essai mécanique, et le joint collé sera sollicité dans un état proche de l'état caoutchoutique.
- La réticulation de l'adhésif à température ambiante a probablement créé un réseau peu dense qui présente des chaînes non pontées. Dès lors la diffusion de l'eau dans l'adhésif est accélérée et ainsi que le gonflement conduisant à l'endommagement de la matrice avec scission des chaînes.

Les faciès de rupture sont différents entre les états sains et les états vieillis (Figure IV-6). Les premiers font état d'une rupture cohésive avec cisaillement du joint de colle, les autres font apparaître des zones de rupture adhésive avec cisaillement de l'interface colle-substrat, d'autant plus importantes que le temps de vieillissement a été long. Les résultats confirment donc le principe que le vieillissement humide, dégrade progressivement les interfaces entre l'adhésif et les substrats, ce qui rend la rupture plus interfaciale que cohésive. Il est donc nécessaire d'améliorer la résistance du joint de colle à la pénétration capillaire de l'eau, ce qui peut être réalisé en optimisant le cycle de réticulation de l'adhésif et/ou en améliorant la préparation de surface.

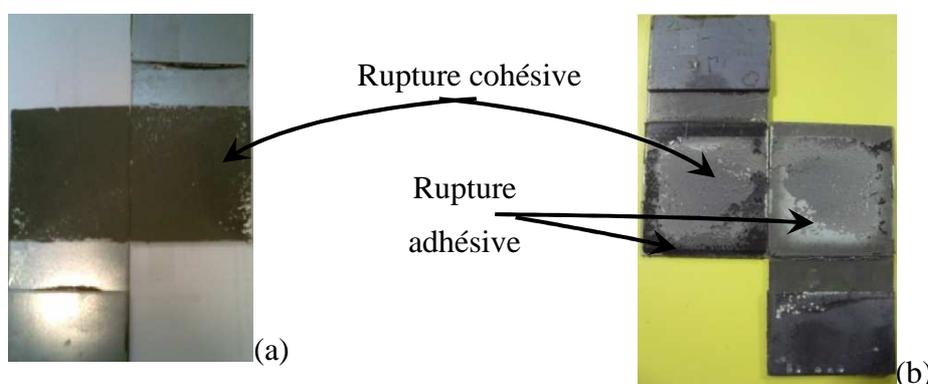


Figure IV-6 : Joints collés en cisaillement après la rupture, (a) : non vieilli ; (b) vieilli.

Pour capitaliser les résultats des vieillissements hygrothermiques réalisés à plusieurs niveaux de température, nous avons tracé le graphique d'endurance thermique (Figure IV-7). Les vieillissements hygrothermiques ont été effectués à des températures plus élevées que la T_g qui est égale à $45^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ (la détermination de la T_g pour l'adhésif réticulé à température ambiante est détaillée dans la partie de l'optimisation du cycle de réticulation de l'adhésif). Le mécanisme de vieillissement est thermoactivé. Mais, de part, le choix des températures de vieillissement, il correspond à des modifications physiques et chimiques de l'adhésif dans son état caoutchoutique et ne peut pas être extrapolé pour la prédiction à l'état d'un comportement vitreux. En perspective, il sera important de réaliser des vieillissements à des températures inférieures à T_g pour un adhésif qui réticule à température ambiante, mais aussi sur un adhésif dont la réticulation est optimisée.

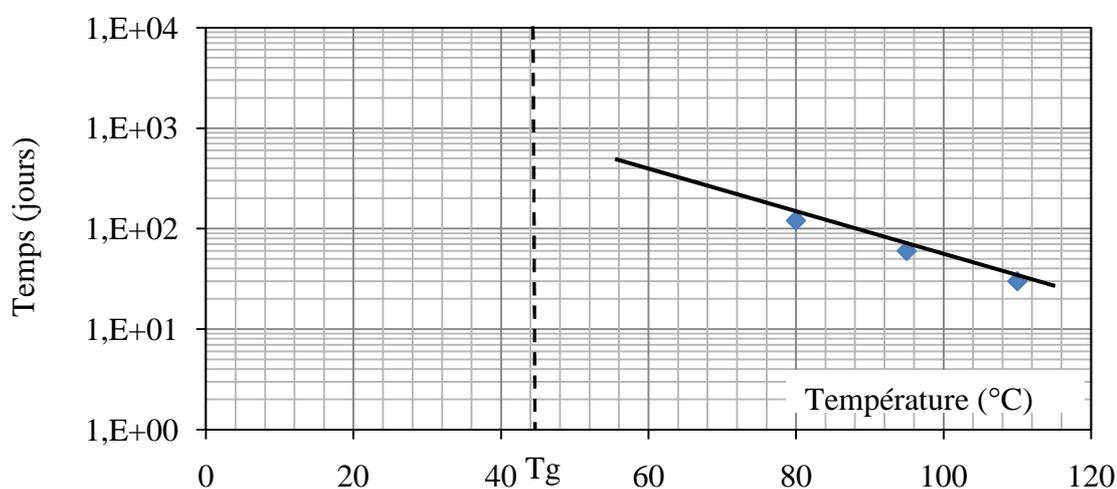


Figure IV-7 : Graphique d'endurance thermique de l'adhésif 7240.

IV-2 Optimisation du cycle de réticulation de l'adhésif

Devant les observations faites lors des essais sur les éprouvettes vieilles, il nous est apparu nécessaire de travailler sur l'optimisation du cycle de réticulation de l'adhésif, pour essayer d'améliorer la tenue mécanique en vieillissement hygrothermique et augmenter la durée de vie des assemblages par collage structural.

Nous avons alors traité dans un premier temps le comportement thermomécanique de l'adhésif 7240 réticulé à température ambiante, afin de le repositionner dans la situation dans laquelle il se trouvait dans la partie précédente de l'étude et pour essayer de comprendre au mieux sa tenue vis-à-vis du vieillissement hygrothermique. Dans un deuxième temps, nous avons procédé à l'optimisation de la réticulation de l'adhésif. Pour conclure, nous avons réalisé des

vieillissements hygrothermiques sur des échantillons composés d'adhésif 7240 et mis en œuvre à différents cycles de réticulation afin d'évaluer leur capacité à résister à l'absorption de l'eau.

Les travaux concernant l'optimisation, et la caractérisation thermomécanique de l'adhésif 7240 ont été réalisés en collaboration avec les laboratoires de Collage Structural du Laboratoire Génie de Production (LGP) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT).

IV-2-1 Caractérisation thermomécanique de l'adhésif 7240 réticulé à température ambiante

Du fait des informations limitées dont nous disposons sur le comportement de l'adhésif 7240, nous avons essayé d'affiner nos connaissances sur ce matériau. Le but de cette partie de l'étude est donc la caractérisation de l'adhésif à l'état initial. Nous nous sommes intéressés au comportement thermomécanique de l'adhésif réticulé à température ambiante, et plus particulièrement aux différents phénomènes de transitions intervenant avec la température. Les appareillages utilisés sont le rhéomètre et l'analyseur thermomécanique (TMA).

IV-2-1.1 Le rhéomètre

L'appareillage est le rhéomètre ARES, piloté par le logiciel RSI orchestrator, de la société Rheometrics et la sollicitation retenue est la torsion rectangulaire (Figure IV-8). Un moteur impose une déformation angulaire sinusoïdale à la fréquence de travail. L'échantillon transmet alors un couple de torsion sinusoïdal mesuré par un capteur. La contrainte résultante possède la même fréquence mais est déphasée d'un angle δ , appelé angle de perte, par rapport à la déformation. Cette déformation sinusoïdale imposée à l'échantillon est choisie de manière à rester dans le domaine de la rhéologie linéaire (variation linéaire de la contrainte avec la déformation), afin que la valeur des modules soit indépendante de la déformation imposée.

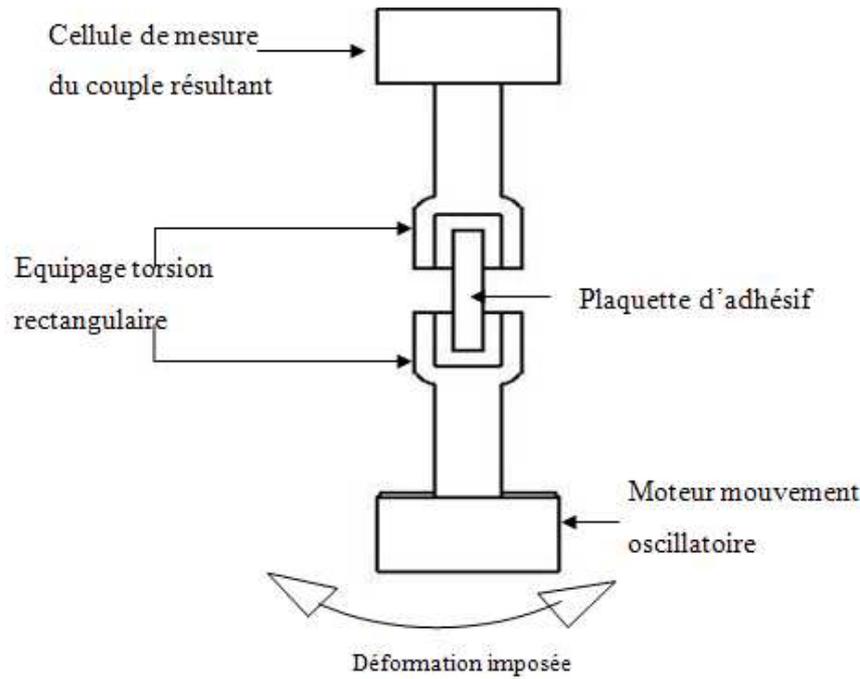


Figure IV-8 : Schéma de principe de la torsion rectangulaire.

Au cours de l'expérience, le couple de torsion complexe T^* et le déphasage (δ) sont mesurés. Le module complexe de cisaillement G^* , par torsion rectangulaire, est alors donné par la relation suivante [HAB95] :

$$G^* = G' + iG'' = \frac{Te^{i\delta}}{\alpha} * \frac{3}{ab^3 \left(1 - 0,63 \frac{b}{a}\right)} \quad (IV-3)$$

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (IV-4)$$

Où a et b représentent respectivement la largeur et l'épaisseur de l'échantillon et α l'angle de torsion unitaire. G' est le module de conservation caractérisant l'énergie stockée sous forme élastique et G'' est le module de perte représentant l'énergie dissipée par le matériau. La relation (IV-3) n'est valable que si le ratio $\frac{a}{b}$ est supérieur à 3,7. La largeur et l'épaisseur des plaquettes d'adhésif sont alors fixées et voisines respectivement de 10 mm et de 2 mm. Pour l'analyse thermomécanique la vitesse de balayage en température retenue est de 2°C min^{-1} , afin d'obtenir une homogénéisation de la température correcte au sein de la plaquette, et la vitesse angulaire de sollicitation est de 1 rad.s^{-1} .

La figure IV-9 représente l'analyse thermomécanique de l'adhésif 7240. La relaxation α , mouvement d'ensemble du réseau de l'adhésif lors du passage de l'état vitreux à l'état

caoutchoutique, est la réponse mécanique associée à la transition vitreuse. La température $T_{\alpha} = 45^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ qui est associée à cette transition est déterminée au maximum de la courbe $G'' = f(T)$. La courbe $G' = f(T)$, met en évidence la perte de la rigidité mécanique de l'adhésif qui commence à chuter avec une forte pente à partir de 40°C .

Le résultat obtenu avec le rhéomètre pour la température de relaxation T_{α} , va être confirmé, en utilisant une autre méthode et un autre appareillage, c'est le dilatomètre ou l'analyseur thermomécanique (TMA) :

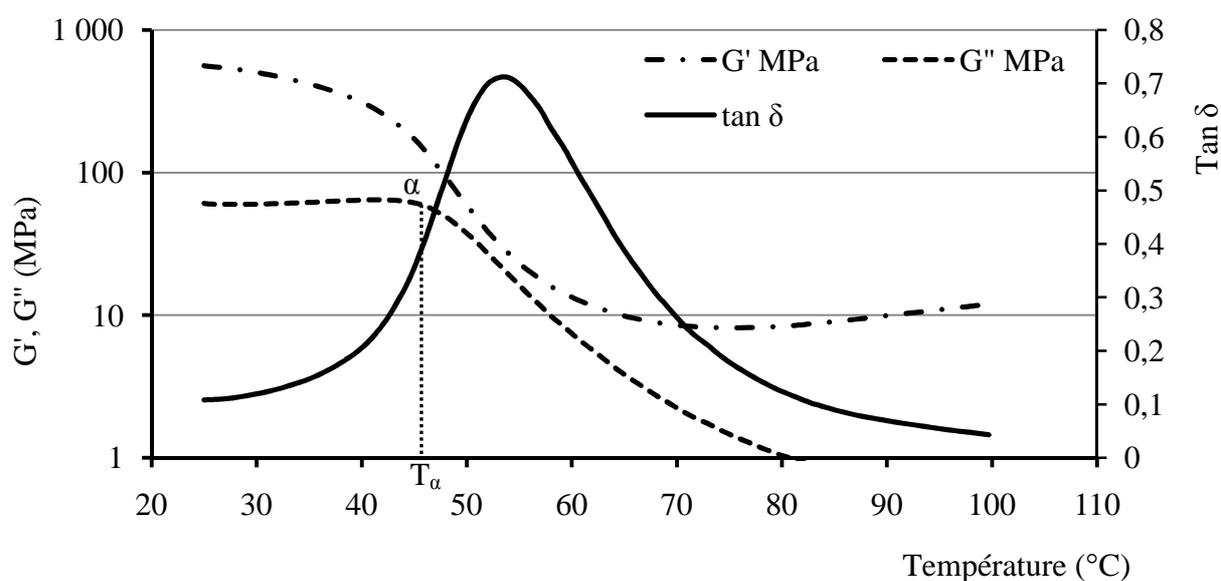


Figure IV-9 : Variations des modules de conservation (G'), de perte (G''), et de $\tan \delta$ en fonction de la température, pour l'adhésif 7240 sollicité en torsion rectangulaire.

IV-2-1.2 L'analyseur thermomécanique (TMA)

Le dilatomètre ou l'analyseur thermomécanique (TMA) est un des instruments les plus couramment utilisé pour déterminer le changement dimensionnel qu'il soit volumique ou linéaire en fonction de la température (Figure IV-10). Le principe de la thermo-dilatométrie consiste à mesurer la variation de dimension dans une direction donnée d'un échantillon soumis à une rampe en température. Pour mesurer ce changement, on applique au moyen d'une sonde une légère force (0,2 N dans notre étude) en compression sur le matériau et le déplacement de la sonde est enregistré avec une précision de $1 \mu\text{m}$. Cette technique permet ainsi de mesurer le coefficient de dilatation thermique α sur un intervalle de température donné. Le dilatomètre utilisé est le modèle TMA7 PERKIN ELMER. Les échantillons testés sont des plaques de côté 5 mm et d'épaisseur 2 mm. La dilatation thermique des matériaux est mesurée sur une gamme de

température allant de 30 à 150°C avec une vitesse de chauffe de 5°C.min⁻¹. Les résultats de la dilatation des échantillons en fonction de la température sont présentés sur la figure IV-11.

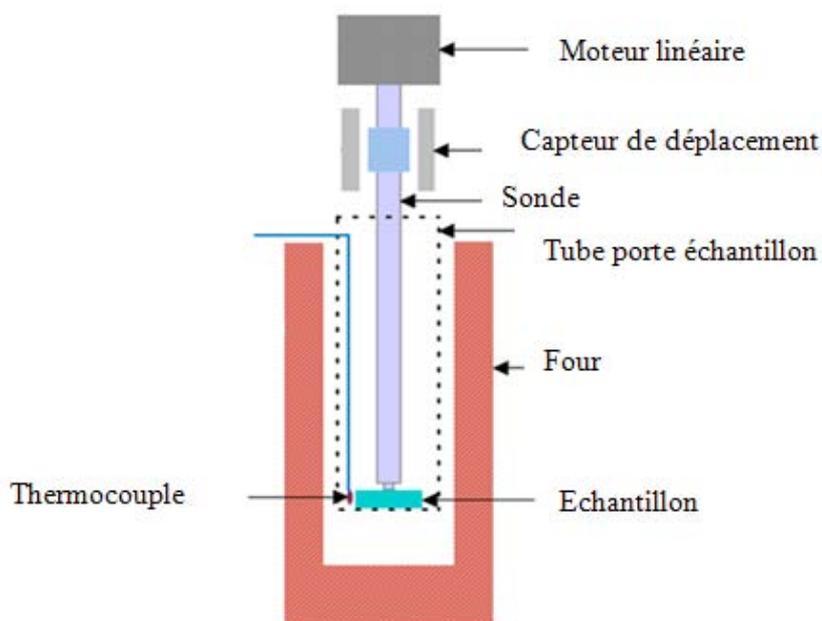


Figure IV-10 : Schéma de principe d'un analyseur thermomécanique TMA.

Entre 40 et 60°C la courbe chute brutalement. Cette diminution très nette de la variation d'épaisseur s'explique par une transition physique intervenant au sein de l'adhésif, lors du passage de l'état vitreux à l'état caoutchoutique. La température T_{α} est estimée autour de 45°C. Cette température est très proche de celle obtenue en rhéométrie.

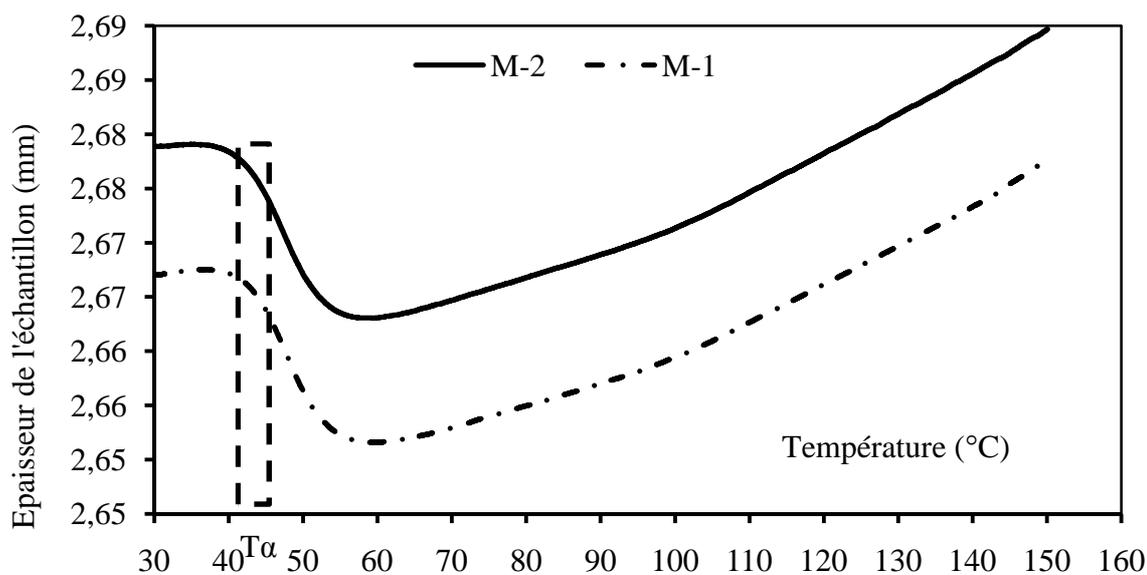


Figure IV-11 : Variations d'épaisseur des échantillons de l'adhésif avec la température.

IV-2-1.2.1 Coefficient de dilatation thermique

Des courbes présentées sur figure IV-11, nous pouvons calculer les valeurs moyennes des coefficients de dilatation thermique sur une gamme de température données avec la relation :

$$\alpha = \frac{\Delta e}{e_0} * \frac{1}{\Delta T} \quad (IV-5)$$

avec :

- α : coefficient de dilatation thermique de l'adhésif
- Δe : variation d'épaisseur (mm) entre 2 températures données
- e_0 : épaisseur initiale de l'échantillon (mm)
- ΔT : écart de température

Le tableau IV-2 regroupe les valeurs moyennes du coefficient de dilatation pour des plages données de la température.

α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	
> 35 °C (α_{vitreux})	entre 60 et 100°C ($\alpha_{\text{caoutchoutique}}$)
2,8E-05	7,4E-05

Tableau IV-2 : Coefficients de dilatation thermique de l'adhésif 7240

IV-2-2 Polymérisation de l'adhésif époxy (7240 B/A)

La polymérisation de l'adhésif époxy est issue d'une réaction chimique entre les monomères présents dans une résine époxyde (motif moléculaire élémentaire), que l'on va faire réagir entre eux grâce à l'action de corps chimiques appelés durcisseurs.

La réaction de polycondensation entre la base époxyde (mélange de prépolymères comportant au moins deux groupements époxy ou oxyrane) et le durcisseur aminé (de fonctionnalité au moins égale à trois) ou dianhydride conduit à la formation d'un réseau tridimensionnel. La réaction entre le diglycidyléther de bisphénol A ou DGEBA (qui est une des bases époxydes les plus couramment utilisée) et une diamine aliphatique [PET05] a été présentée dans le premier chapitre de notre travail.

L'adhésif 7240 utilisé dans cette étude, est composé de deux parties, une partie A qui comporte 3 résines époxy (produit de réaction du bisphénol A et de l'épichlorhydrine), et une

partie B qui comporte 5 durcisseurs aminés. Les différents composants des deux parties de l'adhésif 7240, sont présentés dans l'annexe 5.

Afin de déterminer le cycle de réticulation de l'adhésif, nous avons utilisé la calorimétrie différentielle à balayage (DSC).

IV-2-2.1 La calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

La calorimétrie différentielle à balayage est utilisée pour étudier le comportement d'un polymère en fonction de la température par la caractérisation des différentes transitions par lesquelles il va passer. On peut observer des pics de fusion, des transitions vitreuses et des pics exothermiques de réticulation. Le principe de fonctionnement est basé sur la comparaison de la température de deux creusets soumis au même apport de chaleur. L'un est vide et sert de référence, l'autre contient l'échantillon à caractériser de masse proche de 15 mg. Les deux creusets sont placés sur un plateau chauffant assurant l'apport de chaleur et la mesure de la température. L'appareil utilisé est une DSC50 Shimadzu.

IV-2-3 Optimisation du cycle de réticulation de l'adhésif

Classiquement la détermination d'un cycle de réticulation optimisé passe par la recherche d'une température de transition vitreuse T_g optimale. Une température de polymérisation trop haute produit une forte réaction d'exothermie et un temps court de réticulation qui s'accompagnent d'une hausse brutale de la viscosité limitant la mobilité, donc la poursuite de la réaction de réticulation. Par opposition une température trop basse permet une bonne diffusion (temps long) des espèces réactives assurant une bonne réticulation mais un réseau faiblement densifié.

L'analyse de la réticulation par DSC a été réalisée entre 25 et 150°C avec trois vitesses de montée en température de 2, 3 et 5°C par minute. Le but est à priori de comparer les variations d'enthalpie de la réaction (ΔH_r) de réticulation et les températures T_g obtenues après ces différentes rampes de chauffe. La réticulation a été arrêtée lorsque la réaction de polymérisation est apparemment terminée, c'est-à-dire lorsque le pic exothermique correspondant a été entièrement obtenu. Après chaque polymérisation, l'échantillon est refroidi à la température ambiante puis réchauffé entre l'ambiante et 200°C à la vitesse de 10°C/min pour déterminer la température de transition vitreuse T_g . Cette procédure de détermination de T_g est la seule possible avec la DSC, parce que la variation de ligne de base signant la présence de la température T_g est invisible lors de la première polymérisation puisqu'elle est cachée par le pic exothermique. Ce même protocole de détermination de T_g est renouvelé jusqu'à atteindre la

stabilisation de la valeur de T_g appelé optimale. Le protocole de polymérisation est résumé sur la figure IV-12.

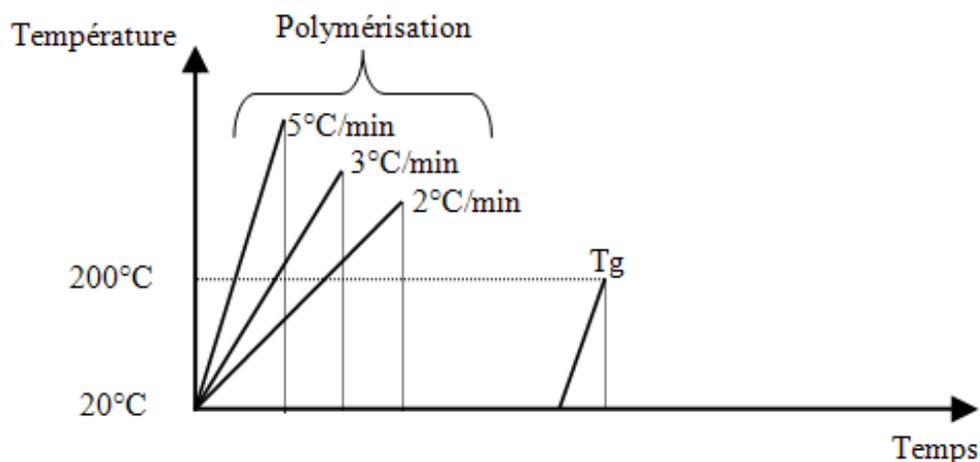


Figure IV-12 : Procédure de détermination de T_g .

La température T_α associée à la relaxation mécanique principale α qui est la réponse mécanique associée à la transition vitreuse, pour l'adhésif réticulé à température ambiante est limitée à 45°C, cette température n'est pas suffisante pour que l'adhésif assure son rôle de collage structural à des températures au dessus de 45°C. Ce résultat explique aussi la dégradation rapide des joints collés qui ont été exposés à des vieillissements hygrothermiques avec des températures plus importantes que T_α actuelle. Nous devons donc pour optimiser le cycle de réticulation, faire monter la valeur de T_α , ce qui aura pour conséquence d'améliorer la tenue en vieillissement des joints collés. Afin d'atteindre cet objectif, nous nous sommes reposés sur le thermogramme de réticulation de l'adhésif présenté dans la figure IV-13.

D'après les fiches du fournisseur des résines et des durcisseurs (annexe 5), plusieurs réseaux peuvent se former pendant la réticulation de l'adhésif. À une vitesse de montée en température inférieure à 2°C/min nous observons deux exothermes pouvant correspondre à la formation de deux réseaux. Lorsqu'on augmente la vitesse de chauffe, on perd le signal d'un exotherme. Il apparait donc clairement que la détection potentielle de différents exothermes de par la présence de plusieurs résines et durcisseurs est très sensible à la vitesse de chauffe. Donc la DSC ne peut nous donner qu'une information globale sur la gamme de température à utiliser pour définir le cycle de réticulation.

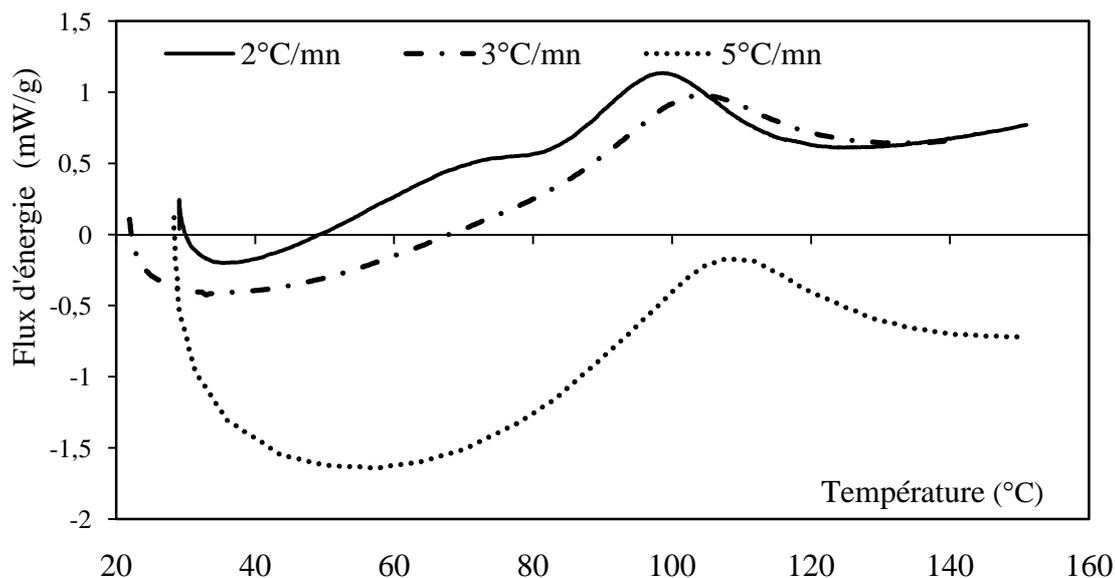


Figure IV-13 : Thermogramme de réticulation de l'adhésif.

Les caractéristiques principales des pics de réticulation obtenues, ainsi que la chaleur de réaction et la température de transition vitreuse optimale, pour chaque vitesse de montée en température, sont résumées dans le Tableau IV-3.

	5°C/min	3°C/min	2°C/min	
			1 ^{er} pic	2 ^{ème} pic
T début (°C)	80 ± 3	77 ± 4	54 ± 3	83 ± 2
T pic (°C)	107 ± 2	102 ± 3	72 ± 4	97 ± 3
T fin (°C)	134 ± 3	125 ± 2	81 ± 4	115 ± 3
ΔH_r (J/g)	60,4 ± 5,2	63,5 ± 4,8	120,4 ± 6,1	
Tg optimale (°C)	103 ± 3	105 ± 3	115 ± 10	

Tableau IV- 3 : Caractéristiques des pics de réticulation, des chaleurs de réaction (ΔH_r), et des températures de transition vitreuse, pour l'adhésif 7240.

En ce qui concerne la chaleur de réaction, elle est plus faible aux vitesses de 5 et 3°C/min, ce qui signifie que la polymérisation de l'adhésif n'est pas correctement terminée en polymérisant avec ces vitesses. La température de la transition vitreuse optimale T_g est plus importante lorsque la vitesse de montée en température diminue. La valeur de la T_g optimale est plus importante à 2°C/min qu'aux 3 et 5 °C/min. Cette valeur de la T_g de 115°C ± 10°C présente

la piste de la température de transition vitreuse à atteindre lors de la définition du cycle de l'optimisation de la réticulation de l'adhésif.

Dans la figure IV-13 et à 2°C/min, nous pouvons identifier l'intervalle de la température entre 70 et 110°C qui correspond à l'exothermie la plus forte. Cet intervalle correspond à la formation des réseaux pendant la réticulation de l'adhésif 7240, et afin de ne pas bloquer la formation de l'un d'eux, nous devons appliquer une rampe lente en température. Ceci nous amène à concevoir un cycle de réticulation optimisé. Ce cycle est basé sur plusieurs phases, après la réalisation de l'encollage qui peut durer autour de 20 minutes, le temps nécessaire pour préparer les plaquettes massiques d'adhésifs. Ces plaquettes vont être utilisées ensuite, dans des essais en rhéométrie, afin de déterminer l'évaluation des propriétés thermomécaniques de l'adhésif en fonction du cycle de réticulation optimisé. Les phases retenues pour le cycle de réticulation sont :

- Phase 1 : Rampe à 1°C/min (de la température ambiante jusqu'à 70°C),
- Phase 2 : Chauffage des plaquettes d'adhésifs en maintenant la température à 70°C. Dans cette phase, nous avons effectué plusieurs prélèvements des échantillons d'adhésifs à 1/2, 1, 2, 3, 4 et 5 heures de cuisson pour identifier des pics exothermiques résiduels et des Tg par DSC. Le protocole est une chauffe à 10°C/min.
- Phase 3 : Rampe à 1°C/min de 70°C jusqu'à 90°C, (en perspective)
- Phase 4 : Chauffage à 90°C d'une à deux heures (en perspective)

La figure IV-14, présente les résultats des DSC de l'adhésif réticulé selon le cycle optimisé, avec un palier de chauffe à 70°C qui varie entre 30 minutes et 5 cinq heures. Nous pouvons constater que la polymérisation commence à se stabiliser à partir de deux heures d'échauffement. Le signal de la Tg est difficilement détectable en DSC, ce qui nous amène à utiliser la méthode de la rhéométrie. Dans cette méthode, nous avons testé seulement les plaquettes d'adhésifs réticulés 2 et 5 heures à 70°C.

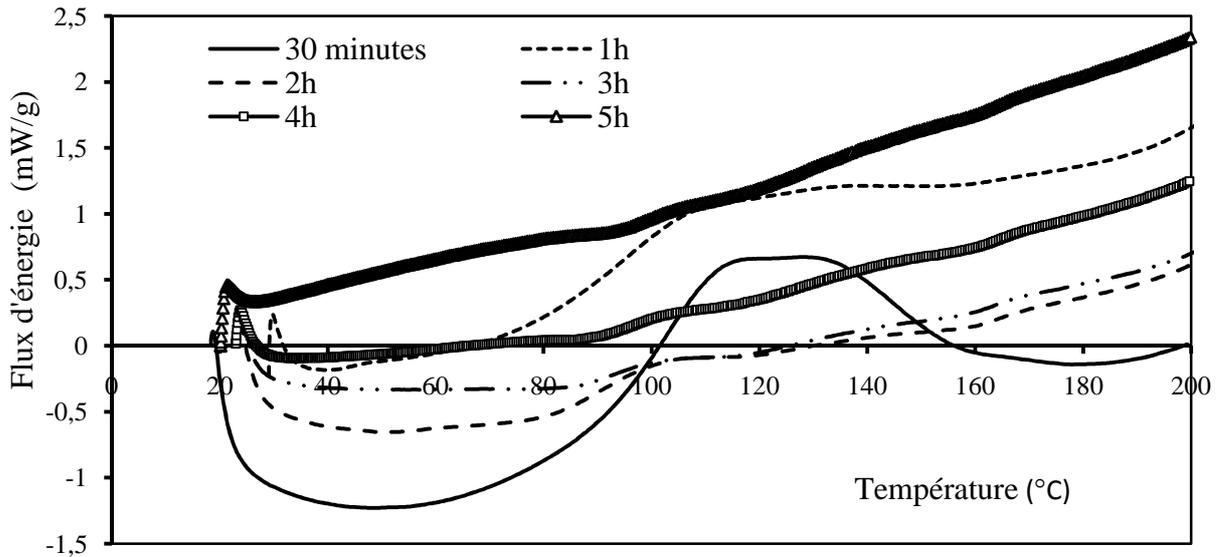


Figure IV-14 : Les DSC de l'adhésif réticulé selon le cycle optimisé.

Les trois figures suivantes (IV-15), (IV-16) et (IV-17), présentent les résultats, en rhéométrie. La première chose à constater est l'augmentation du module élastique en cisaillement G' . La température T_a est plus importante pour les réticulations à températures élevées ce qui correspond bien à la qualité recherchée dans notre démarche.

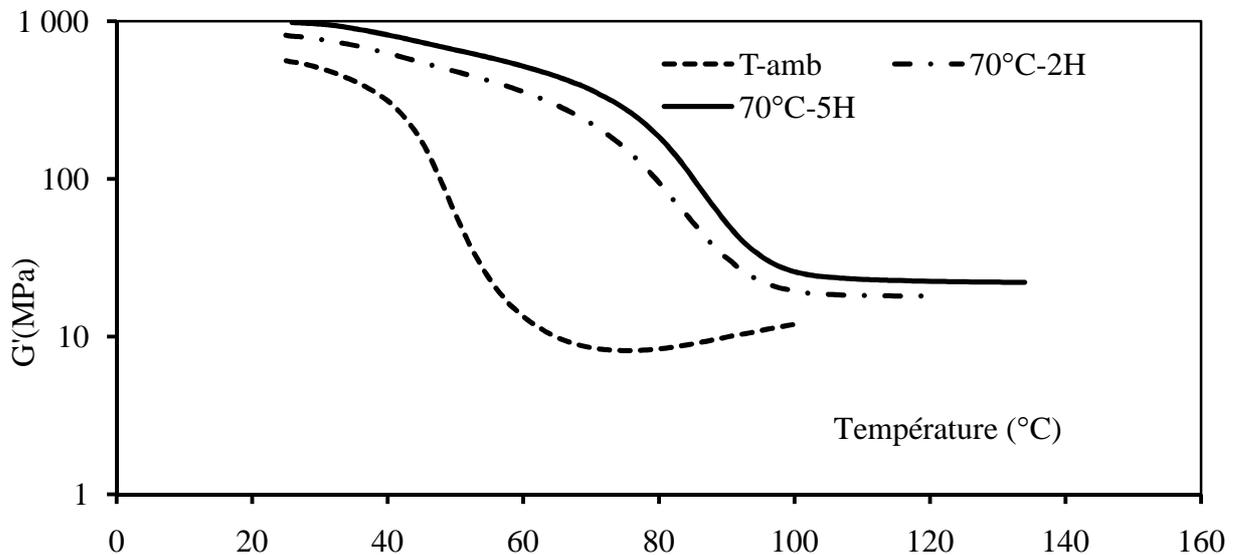


Figure IV-15 : $G'=f(T)$ pour différents cycles de réticulation.

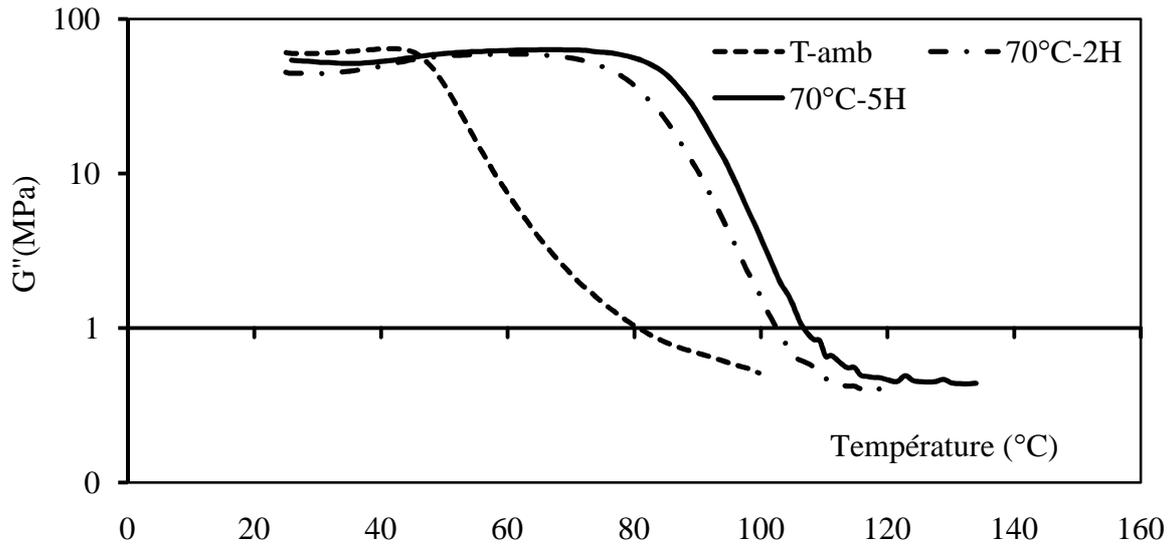


Figure IV-16 : $G''=f(T)$ pour différents cycles de réticulation.

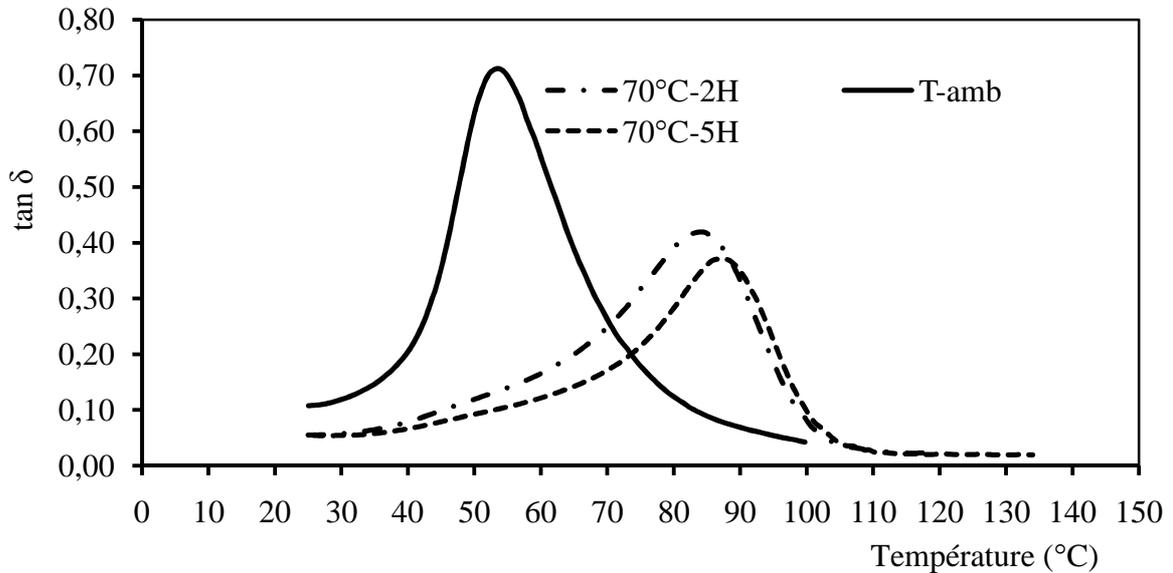


Figure IV-17 : $Tan\delta =f(T)$ pour différents cycles de réticulation.

Le tableau IV-4, récapitule les propriétés de l'adhésif réticulé à température ambiante ou selon le cycle optimisé. Nous constatons qu'entre 2 et 5 heures de réticulation à 70°C, T_α varie peu, par contre le module G^* présente un écart sensible. Cet écart peut être amélioré par la réalisation des phases 3 et 4 (cf. paragraphe IV-2-3).

Cycle de réticulation	Température ambiante	Cycle optimisé	
		2 heures à 70°C	5 heures à 70°C
G* max. (MPa)	564 ± 5	817 ± 5	981 ± 5
T_a (°C)	45 ± 2	82 ± 2	85 ± 2

Tableau IV-4 : Propriétés de l'adhésif 7240 réticulé à température ambiante et selon le cycle optimisé.

Pour vérifier l'effet de l'optimisation du cycle de réticulation sur les comportements des joints collés et réticulés avec le cycle d'optimisation sélectionné, nous avons réalisé des essais en cisaillement. La figure IV-18 montre l'amélioration du comportement du joint réticulé en cycle optimisé par rapport au joint réticulé à température ambiante. La première chose à constater est l'augmentation de l'effort à la rupture (F_r) qui est de 41 kN au lieu de 38 kN. Cette augmentation va forcément améliorer la résistance des joints vis-à-vis des vieillissements hygrothermiques. La deuxième chose à observer est la pente de la partie linéaire des courbes, qui traduit la rigidité de l'assemblage. Cette pente est bien plus élevée avec le joint réticulé en cycle optimisé, ce qui signifie que la tenue mécanique de l'assemblage est plus grande de part, l'augmentation de rigidité élastique de l'adhésif. Les propriétés mécaniques intrinsèques de l'adhésif telles que le module d'Young et par conséquent le module de Coulomb sont améliorées par l'optimisation du cycle de réticulation.

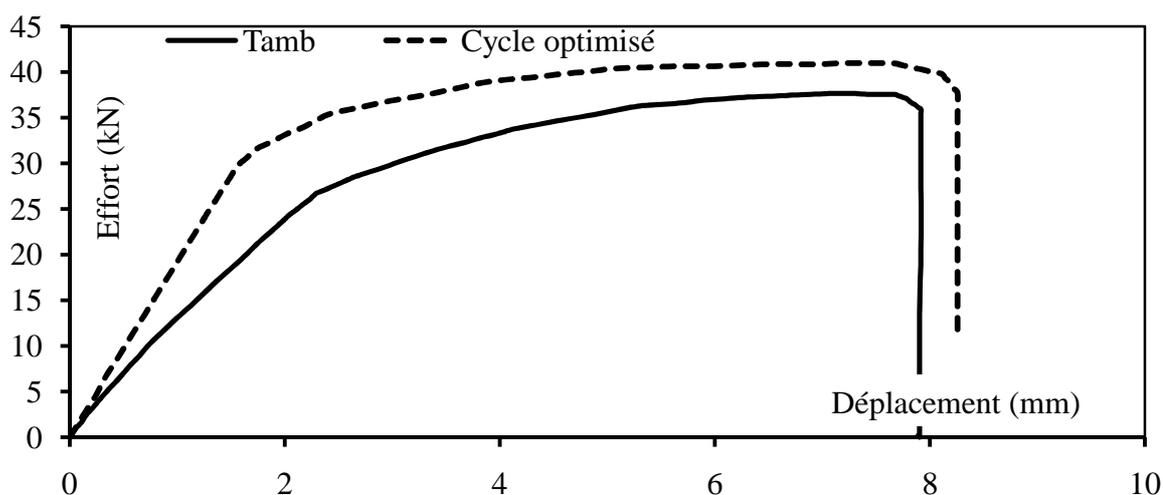


Figure IV-18 : Réponse en cisaillement pour réticulation à l'ambiante et en cycle optimisé.

IV-2-4 vieillissement hygrothermique par le mécanisme de diffusion d'eau

Pour étudier le comportement de l'adhésif en fonction du cycle de réticulation, nous avons décidé d'utiliser la méthode du vieillissement hygrothermique par le mécanisme de diffusion d'eau que nous allons présenter par la suite.

IV-2-4.1 Mécanisme de diffusion d'eau

La diffusion se définit comme un phénomène de transport moléculaire dû à l'existence d'un gradient de concentration de l'eau dans le polymère. Les premières explications mathématiques remontent à 1855 où une analogie a été établie entre les phénomènes de transfert de chaleur par conduction et ceux de transfert de masse [CRA56]. En transposant les équations de conduction de chaleur établies par Fourier dans le cas de la diffusion, et en considérant les matériaux soumis à la diffusion d'eau comme isotropes, la conductivité thermique est remplacée par le coefficient de diffusion et la température par la concentration en entités diffusantes.

Dans notre étude, nous allons simplement étudier l'évolution en fonction du temps, de la quantité d'eau absorbée par l'adhésif, qui est désignée en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon. Cette étude va nous permettre de confirmer et de valider l'idée qu'une réticulation à une température plus élevée que la température ambiante selon un cycle prédéfini, peut générer des améliorations sur la résistance de l'adhésif vis-à-vis du vieillissement hygrothermique.

L'expérimentation de la diffusion d'eau est résumée par la préparation des plaquettes d'adhésifs de 50x10x3 mm³. Ces plaquettes sont ensuite déposées dans un bocal contenant de l'eau distillée afin de créer un milieu humide, le tout étant mis dans un four à 80°C. Pour chaque type de réticulation nous avons fabriqué trois plaquettes. Les masses des plaquettes avant le vieillissement sont mesurées à l'aide d'une balance d'une précision de 0,001 mg. Les résultats de l'absorption d'eau par les plaquettes d'adhésifs sont présentés sur la figure IV-19. Sur cette figure le gain massique G_m est mesuré en fonction du temps :

$$G_m = \frac{m_t - m_0}{m_0} * 100 \quad (IV-7)$$

Où m_0 est la masse des plaquettes avant le vieillissement et m_t est la masse des plaquettes au temps t pendant le vieillissement.

Nous pouvons constater que l'absorption d'eau est moins élevée pour les plaquettes réticulées avec des cycles optimisés par rapport à celle réticulée à température ambiante. En effet

la courbe correspondant au cycle optimisé (2 heure à 70°C) montre un gain massique de 5% alors que celle correspondant à la réticulation à l'ambiante annonce 6%.

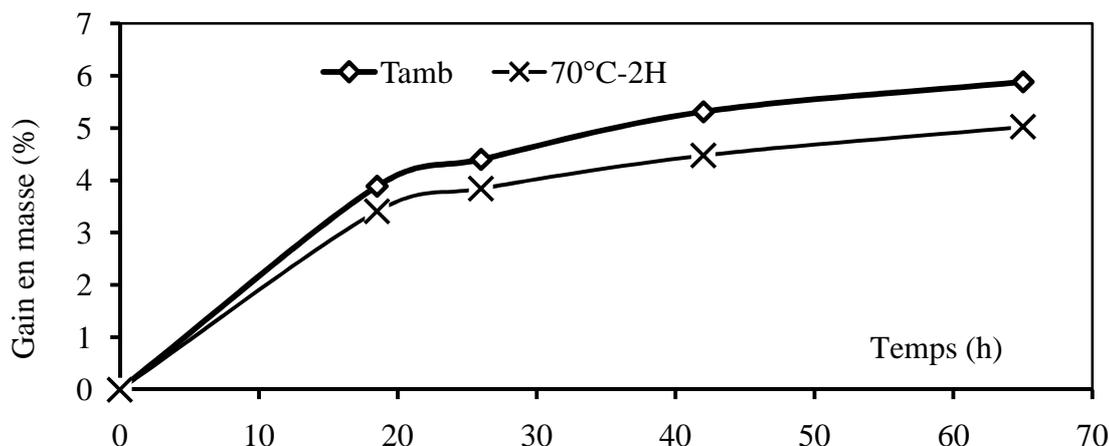


Figure IV-19 : Prise en eau de l'adhésif à 80°C.

IV-3 Conclusions et récapitulatifs

Dans ce chapitre nous avons traité un sujet délicat qui est le vieillissement hygrothermique des collages structuraux. Nous sommes de plus partis d'un adhésif époxy pour lequel nous avons très peu de données sur le comportement en vieillissement chaud et humide. Nous avons commencé directement le vieillissement en partant du principe qu'en nous plaçant dans le cas le plus sévère, c'est à dire en laissant réticuler l'adhésif à température ambiante, nous aurions une vue pessimiste de son comportement, ne pouvant alors qu'être améliorée si besoin.

D'après les résultats obtenus, nous avons conclu que l'optimisation du cycle de réticulation était une chose inévitable dans le domaine du collage. L'étude réalisée sur l'optimisation du cycle de réticulation n'est pas une étude complète car il faut établir le comportement thermomécanique à l'échelle des joints collés. Il faut en effet vérifier maintenant que les résultats positifs liés à l'optimisation du cycle de réticulation se répercuteront au niveau de l'assemblage. L'adhésif 7240 a montré un comportement très bon, après sa réticulation suivant un cycle optimisé. La température T_{α} identifiée mécaniquement (avec le rhéomètre) et non cinétiquement avec la DSC, est plus avantageuse après réticulation plutôt qu'à l'ambiante. La réalisation des étapes 3 et 4 (paragraphe IV-2-3) permettra peut être de diminuer les temps des paliers de réticulation et donc le temps de procédé industriel [GIL74].

Conclusions générales et perspectives

Conclusions

La recherche présentée dans le cadre de ce mémoire a concerné la caractérisation expérimentale et numérique de la tenue mécanique des assemblages par éléments de fixation et par collage structural, dans le domaine ferroviaire. Les travaux réalisés ont abouti, à la réalisation d'essais et de simulations numériques, à une meilleure compréhension des phénomènes régissant ces types d'assemblages en termes de sollicitations mécaniques en statique et en dynamique.

Après une étude bibliographique sur les assemblages structuraux et leur caractérisation mécanique, qui a fait l'objet de la première partie de cette étude, nous avons abordé dans la seconde partie, l'étude sur les assemblages ponctuels assurés par des éléments de fixation type vis autorouleuse et rivet magnagrip[®]. Des essais mécaniques sur des joints assemblés par deux montages en cisaillement et en traction, ont été réalisés afin de mieux appréhender les comportements mécaniques de ces joints. Le matériau constitutif des plaques utilisées dans les joints a été caractérisé sous sollicitation quasi-statique en utilisant le système de stéréocorrélation d'images afin d'identifier son comportement élasto-plastique.

Dans la troisième partie de cette recherche nous nous sommes intéressés à la tenue mécanique des assemblages collés en utilisant de l'adhésif structural 7240 B/A commercialisé par la société 3M. Nous avons sélectionné un adhésif qui semblait répondre au mieux à un cahier des charges mécanique et industriel. Cet adhésif a été caractérisé, d'une part, à l'état massique, pour qualifier son comportement élasto-plastique, et d'autre part sous forme de joints collés pour caractériser son comportement en cisaillement et en traction.

Dans la quatrième partie nous avons abordé l'étude du comportement de l'adhésif sélectionné vis-à-vis des vieillissements combinés température/humidité. Nous avons étudié la tenue mécanique et la dégradation des joints collés en cisaillement ayant subi un vieillissement hygrothermique en fonction du temps. Dans le but d'améliorer la tenue des joints collés en vieillissement, nous avons également étudié la caractérisation thermique de l'adhésif, la relation entre la température de réticulation de l'adhésif et la température de transition vitreuse T_g , (température correspondant au point où l'adhésif commence à perdre ses performances mécaniques).

Plusieurs techniques de mesure ont été rendues possible grâce aux moyens techniques dont dispose le Laboratoire Génie de Production (LGP) de l'ENI de Tarbes, (stéréocorrélation d'images, rhéométrie, analyse thermomécanique (TMA), machines d'essais : traction, fatigue...)

Les études des joints collés ont montré que les concentrations des contraintes se trouvent aux extrémités de la partie couverte de l'assemblage. Afin de diminuer l'influence de ces concentrations sur la tenue mécanique des joints, nous proposons l'utilisation d'un assemblage mixte (collage/vissage). Les éléments de fixation peuvent être posés sur les extrémités des pièces à assembler. Cette solution permettrait une meilleure application du collage structural et l'encollage entre les différentes pièces dans le cadre des structures des coffres de traction.

Une dernière partie non incluse dans ce rapport et constituant une annexe porte sur l'étude de l'industrialisation du collage structural dans le cadre des coffres de traction fabriqués sur le site d'ALSTOM Tarbes.

Le collage structural étant une nouvelle technologie alternative à l'assemblage ponctuel traditionnellement utilisée par ALSTOM, il est nécessaire de compléter ces études préliminaires afin de qualifier la technologie industriellement (procédé, mise en œuvre, coûts...). L'un des paramètres essentiels dans la possibilité de l'industrialisation du collage structural comme une technologie concurrente des technologies utilisées actuellement (vissage) est le coût de fabrication. Le collage structural ne pourra être concurrentiel des technologies traditionnelles que s'il montre un avantage économique par rapport aux autres applications. Nous avons réalisé une étude comparative entre l'utilisation de l'adhésif et les vis autorouleuses pour fabriquer une charpente métallique (annexe 5). Cette étude nous a montré l'avantage de l'utilisation de l'adhésif structural avec une réduction du coût de la liaison d'environ 50 %.

Perspectives

Les études menées dans cette thèse ont été réalisées sur des joints unitaires. Seules les problématiques de comportements mécanique et thermique ont été prises en compte. Ces études doivent être capitalisées (en fonction du retour d'expérience) par une étude globale à l'échelle du coffre de traction. Les perspectives de cette thèse sont :

- Validations en vibration et en choc selon la norme CEI 61373 [CEI99], des assemblages par collage structural. Cette validation peut nous aider à la comparaison des deux types d'assemblages (collage structural, vissé) à l'échelle d'une structure équivalente au coffre de traction.
- Validation industrielle de la technologie d'assemblage par collage structural : cette validation comporte les éléments suivants :

- Les outils nécessaires et le système de guidage pour poser l'adhésif et réaliser le collage structural.
- L'identification du réseau de sous traitants en mesure de répondre au cahier des charges.
- Les conditions d'utilisation de l'adhésif au niveau de l'environnement, de l'hygiène et de la sécurité (EHS).
- Le coût de la main d'œuvre pour le collage structural.
- Réalisation prioritaire d'une étude de vieillissement hygrothermomécanique sur des joints collés avec un cycle optimisé de réticulation de l'adhésif 7240, car les procédés d'élaboration du collage structural peuvent influencer sur le comportement sous environnement agressif et donc sur la durée de vie.
- Réalisation d'une étude numérique sur le collage structural afin de prendre en compte l'effet d'échelle pour la modélisation de l'adhésif dans le cadre d'une structure complète de coffre de traction.

Production scientifique

Cette thèse, nous a conduits à participer à des congrès nationaux et internationaux et de publier plusieurs parties de nos travaux :

- Etude du comportement d'une liaison mécanique par éléments de fixation ». 8e Colloque National en calcul des structures. 21-25 Mai 2007, Giens, France. Vol.1 p515-521, N° ISBN: 978-2-7462-1822-2.
- Caractérisation des assemblages rivetés et vissés en fatigue 18ème Congrès Français de Mécanique 27-31 août 2007 Grenoble, France. N° : CFM2007-0550.
- International conference on the respective input of the numerical simulation and the experimental approach in fatigue design, 21-22 novembre 2007 - Senlis, France, N° ISBN: 2-85400-802-2.
- The Effect of the polymerisation temperature on ageing bonded joints» 3th International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials (ICSAAM – 2009) 7-10 septembre 2009, Tarbes, France.

Références

[ABA07]

Abaqus module CAE, version 6.6, manuel d'utilisation.

[ADA77]

R.D. Adams, J.Coppendale, (1977) *J. Adhes.*, p.11.

[ADA84]

R.D. Adams and William C. Wake, (1984) *Structural adhesive joint in engineering*, Elsevier Applied Science Pub., London and NY, p.14.

[ADA90]

R. D. Adams (1990) *Adhesives and Sealants, Engineering Materials Handbook*, ASM Int., V. 3, p. 325.

[ADA92]

R.D. Adams V. Mallick, (1992) *A method for the stress analysis of lap joints*, Journal of Adhesion, Vol.38, pp. 199-217.

[ALI07]

M. Ali, B. Lorrain, B. Puel, M. Karama, (2007) *étude du comportement d'une liaison mécanique par éléments de fixation*, 8e colloque national en calcul des structures, Giens, France.

[AMI87]

S. Amijima, T. Fujii (1987) *microcomputer program for stress analysis of adhesive-bonded joints*, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 7, N° 4, pp. 199-204.

[ANS05]

ANSYS version 11, ANSYS Inc. Canonsburg USA, manuel d'utilisation.

[ARC08]

Arcelormittal Document (2008), *Aciers revêtus d'un alliage zinc- aluminium, Galfan*.

[BAR65]

W. Barrois (1965) *Résistance en fatigue des oeils et des chapes*, The conf. cycle on fatigue, Chap. IX. AFFITA, Toulouse, FR, non publié.

[BAR73]

W. Barrois (1973) *Calcul en fatigue des éclisses et des bandes de renfort*, Note DEP/TA/B N° 132, AEROSPATIALE, Paris, FR, non publié.

[BAR99]

L. Barral, J.Cano, J. Lopez, (1999) *Physical aging of an epoxy/cycloaliphatic amine resin*, European Polymer Journal, 1999, 35, pp 403-411.

[BOE00]

Unpublished reports of the Boeing corporation, Renton, WA.

[BIS98]

S. BISTAC, M.F. VALLAT, J. SCHULTZ. (1998) *Durability of steel/polymer adhesion in an aqueous environment* *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18, pp 365-369

[BRE05]

CH. Bretton, G. Villoutreix, (2005) *Familles d'adhésifs et caractérisation d'un collage structural*. Techniques de l'Ingénieur, document N° 1650.

[BRU44]

N.A. DE Bruyne, (1944), *the strength of glued joints*, aircraft engineering, vol. 16 pp. 115-118.

[BUC00]

X. BUCH (2000), *Dégradation thermique et fluage d'un Adhésif structural epoxyde*, thèse, école des Mines de Paris, France.

[BUR06]

B.R. Burchardt, P.W. Merz (2006) *Elastic Bonding and Sealing in Industry. Handbook of Adhesives and Sealants* Volume 2, chapter 6, p. 356-375.

[CAR89]

W.C. Carpenter, R. Barsoum (1989) *Two finite elements for modelling the adhesive in bonded configurations*, *Journal of Adhesion*, Vol. 30, pp. 25-46.

[CEB02]

L. Cebulski, (2002) *Caractérisation Expérimentale et Numérique de la Tenue Mécanique des Assemblages par Rivets Aveugles, Application aux Véhicules de Transport Guidé*. Thèse CIFRE, université de valenciennes et du hainaut-cambrésis, Alstom Transport. P. 137.

[CEI99]

CEI 61373, (1999) norme internationale, Applications ferroviaires, Matériel roulant, Essais de chocs et vibrations.

[CET06]

CETIM Centre Technique des Industries Mécaniques, (2006) *le collage en production et ses contraintes* guide du collage.

[CHI03]

R. Chieragatti, J. Huet (2003) *Tenue en fatigue et en statique des assemblages boulonnés aéronautiques*, TILT, Innovation technologique pour les transports terrestres, Recueil de conférence, 2-4 décembre, Lille, FR.

[CRA56]

J., Crank (1956), *the mathematics of diffusion*; First Edition, Clarendon Press, Oxford.

[¹DEL81]

F. Delale, F. Erdogan, M.N. Aydimogln (1981) *Stresses in adhesive bonded joint: a closed-form solution*, *Journal of Composite Materials*, pp. 249-271.

[²DEL81]

F. Delale, F. Erdogan (1981) *Viscoelastic analysis of adhesively bonded joints*, Journal of Applied Mechanics, ASME 48, pp. 331-338.

[DER57]

B.V. Deryagin, N.A. Krotova, V.V. Karassev, Y.M. Kirillova, I.N. Aleinikova, (1957) *Proceeding of the 2nd Int. Congress on Surface Activity-III*, Butterworth, London, p 417.

[DIX48]

WJ Dixon, AM.Mood, (1948) *A method for obtaining and analyzing sensitivity data*. J Amer Stat Assn 109-126.

[DOY08]

G.Doyle, R.A. Pethrick, (2008) *Environmental effects on the ageing of epoxy adhesive joints*, Int. J. of Adhésion and Adhésives.

[FAR99]

F.Tahmasebi, (1999) *Ph.D. Finite Element Modeling of an Adhesive in a Bonded Joint*, NASA Goddard Space Flight center.

[GIL74]

J.K. Gilhaum, J.A. Benci, (1974), J. polym. Sci, 279-284.

[GIL81]

Y. Gilibert and A. Rigolot, (1981) Mech. Res. Comm., V.8, N.5, p.269.

[GIR80]

J.M Giraud (1980) *Quelle épaisseur de colle choisir pour un assemblage collé*, Matériaux et Techniques, juin-juillet, p.255.

[GLE74]

R.A. Gledhill, A.J. Kinloch (1974). *Environmental failure of structural adhesive joints*, Journal of Adhesion, vol. 6, pp 315–330.

[GOL44]

M. Goland, E. Reissner (1944), *the stress in cemented joints*, journal mechanics, vol.11, N°1, pp 17-27.

[GOR90]

Gore (1990) *Essais sur panneaux raidis à raidisseurs rivés*, Marché STPA, AEROSPATIALE, Rapport d'études N° 51 132.

[GRA89]

I. Grabovac, P. J. Pearce, C. E. M. Morris, (1989) *Aging of a two-part epoxy paste aerospace adhesive*. Journal of applied polymer science, vol. 37, N° 4, pp. 1137-1140.

[GUN08]

F. Gunbring, (2008) *Prediction and Modelling of Fastener Flexibility Using FE* document N°: LIU-IEI-TEK-A-08/00368-SE Department of Management and Engineering, Linköping university, Sweden.

[HAB95]

J.P. Habas, (1995), thèse de doctorat, université de Pau et des Pays de l'Adour, N°252. Pau, France.

[HAM01]

V. Hamel, J.M. Roelandt, J.N. Gacel, F. Schmit, (2000) *Computers and Structures*. 77/2. 185-200.

[HAR84]

Harris J.A., Adams R.D. (1984) *Strength prediction of bonded single lap joints by non linear finite elements*, *International Journal of Adhesive*, Vol. 4, N° 2, pp. 65-78.

[HAR85]

L. J. Hart-Smith and E. W. Thrall, (1985) *Adhesive Bonding of Aluminium Alloys*, ed. E. W. Thrall and R. W. Shanon, Marcel Dekker, P. 241.

[HUE95]

Huet J. (1995) *Du calcul des assemblages par boulons ou rivets travaillant en cisaillement*, AEROSPATIALE Aéronautique CO/Airbus, C.C. Technique.

[HUT86]

Huth H. (1986) *Influence of Fastener flexibility on the prediction of load transfer and fatigue life for multiplerow joints*, *Fatigue in mechanically fastened composite and metallic joints*, ASTM STP 927, John M. Potter, Ed., Philadelphia, PA, pp. 221-250.

[JOA07]

Joannés S. (2007), *Caractérisation mécanique et outil d'aide au dimensionnement des collages structuraux*. Mémoire de Thèse, Ecole des Mines de Paris, Paris, FR.

[KIL04]

Killic B., Madenci E., Ambur D.R. (2004) *Global-local finite element analysis of bonded single-lap joints*, *Proceedings of 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials conference*, AIAA-2004-1559, Palm Springs, CA.

[KIM07]

J.Kim, J.C. Yoon, B.S. Kang, (2007) *Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints*, *applied mathematical modeling* 31 895–911.

[KIN87]

A.J. Kinloch, (1987) *Adhesion and Adhesives : Science and Technology*, Ed. Chapman and Hall, London.

[KOF99]

K. Koffi (1999) *Etude numérique et expérimentale des éclissages de structures aéronautiques soumis à des chargements de traction et flexion*, Mémoire de Thèse, INSA, Toulouse, FR.

[LEM92]

J. Lemaitre (1992). *A Course on Damage Mechanics*. Springer, Berlin.

[LEE07]

H.K. Lee, S.H. Pyo, B.R. Kim, (2007) *On joint strengths, peel stresses and failure modes in adhesively bonded double-strap and supported single-lap GFRP joints*, Composite Structures, vol. 87, Issue 1, P. 44-54.

[LUC06]

M. Lucic, A. Stoic, J. Kopac, (2006) *Investigation of aluminum single lap adhesively bonded joints*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering (JAMME), volume 15 issue 1-2 march-april.

[LUB56]

J. L. Lukin, E. Reissner, (1956) Trans. ASME, p.1213.

[MAC25]

J.W. Mcbain, D.G. Hopkins, (1925) J. Phys. Chem., 29, p 188, (1925), cité par A.J. Kinloch, Adhesion and Adhesives, Ed. Chapman and Hall, (1987).

[MAC06]

f. Maceri, M. Fermond, M.A. Bruneaux, (2006), *urabilité des assemblages collés : modélisation mécanique et physico-chimique*, thèse de doctorat, laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, France.

[MAR06]

O. Mario, S. Joannes, J. Renard. (2006), *Influence de la microstructure sur les propriétés mécaniques des joints collés*, Matériaux 2006, Dijon, France.

[MIN05]

J. M. Minguez, J. Vogwell, (2005) *Effect of torque tightening on the fatigue strength of bolted joints*, Department of Engineering and Applied Science, University of Bath, Bath, UK.

[MON03]

P.Montois, V. Nassiet, Y. Baziard, J.A. Petit, (2003) *Vieillissement hydrothermique d'un réseau modèle époxy-diamine. Application à l'étude des joints adhésifs métal/époxy/métal*, 16ème Congrès Français de Mécanique Nice, France.

[MOR90]

K. Moriand T. Sugibayashi, (1990) JSME Int., J. Series 1, V. 33, N. 3, p. 349.

[NAS05]

J.A. Petit, V. Nassiet Y. Baziard, , B. Hassoune, (2005) *Durabilité des assemblages collés, techniques de l'ingénieur*, document N : BM 7 666.

[NEM04]

O.Némès, (2004) *Contribution à l'étude des assemblages collés cylindriques et plans*, Mémoire de Thèse, INSA, Toulouse, FR.

[NIU93]

M.C-Y.Niu, (1993) *Airframe structural design*, lockheed aeronautical systems co., commilit press ltd, hong-kong.

[ORE90]

C. O'reilly, (1990) SAE Trans. J. Materials Manufacturing, Section 5, V. 55, p. 893.

[PER93]

J. Perdijon, (1993) *Le contrôle non destructif par ultrasons*, Hermès.

[PET05]

E.M. Petrie (2005), Book, *Epoxy adhesive formulations*, MC GRAW-HILL Chemical Engineering. P. 30.

[POP68]

EP. Popov, (1968), *Introduction to mechanics of solids*, 1st edition. Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall 569 pages.

[PRO06]

S.G. Prolongo, G. del rosarion, A. Urena, (2006) *Comparative study on the adhesive properties of different epoxy resins*, Int. J. of Adhesion and Adhésives 26, 125-132.

[RAI99]

Railway applications, (1999) Rolling stock equipment. Shock and vibration tests.

[ROS47]

R.D. Ross, (1947) *An electrical computer for the solution of shear-lag bolted joint problems*, NACA, TN N° 1281.

[SAR06]

M. Sarraj, I. W. Burgess, J. B. Davison, R. J. Plank, (2006) *Finite Element Modelling of Fin Plate Steel Connections in Fire*, Document N°: SiF06_MS Structural Fire Engineering Research, University of Sheffield, UK.

[TAT46]

R.Tate, J. Samuel, (1946) *Preliminiray investigation of the loads carried by individual bolts and bolted joints*, NACA technical report N°1051, Washington.

[TOU96]

S. touchal-Mguil, F. Morestin, M. Brunet, (1996) *mesure de champs de déplacements et de déformations par corrélation d'images numériques*. Mécanisme et mécanique des grandes déformation, Acte du colloque national mecamat'96, p.179-182.

[TSA94]

M.Y. Tsai, J. Morton (1994) *Three-Dimensional deformations in a single-lap joint*, Journal of Strain Analysis, Vol. 29, N° 1, pp. 137-145.

[TSA94]

M. Y. Tsai and J. Morton, (1994) J. Strain Analy., V.29, N.1, , p.137.

[TSO99]

T. K.Tsotsis, S.Keller, J.Bardis, J. Bish, (1999) *Preliminary evaluation of the use of elevated pressure to accelerate thermooxidative aging in composites*, Polym. Degrad. & Stab., N°64, 207-212.

[URB03]

M.R. Urban, (2003) *Analysis of the fatigue life of riveted sheet metal helicopter airframe joints*, International Journal of Fatigue 25 (2003) 1013–1026.

[VOG44]

F. Vogt, (1944) *the load ditribution in bolted or riveted joints in lght-alloy structures*. RAE, report N SME 3300, Royal aircraft Establisement, Farnborough, or NACA TM 1135.

[VOL38]

Volkersen O. (1938) *Die Nietkraftverteilung in Zugbeanspruchten Nietverbindungen mit Konstanten Laschenquerschnitten*, Luftfahrtforschung, vol. 15, pp 41-47.

[VOY63]

S.S. Voyutskii, (1963) *Autoadhesion and Adhesion of High Polymers*, Wiley and Sons.

[YAD87]

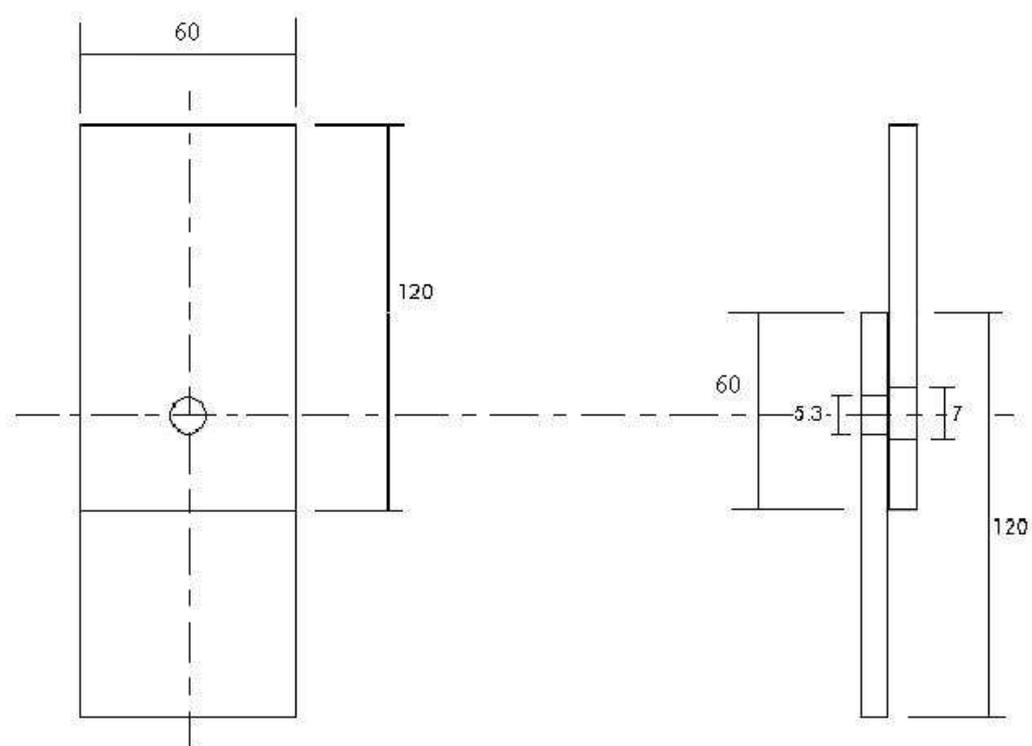
Yadagiri S., Papi Reddy C., Sanjeeva T. Reddy, (1987) *Viscoelastic analysis of adhesively bonded joints*, Computers & Structures, Vol. 27, N° 4, pp. 445-454.

[ZAH02]

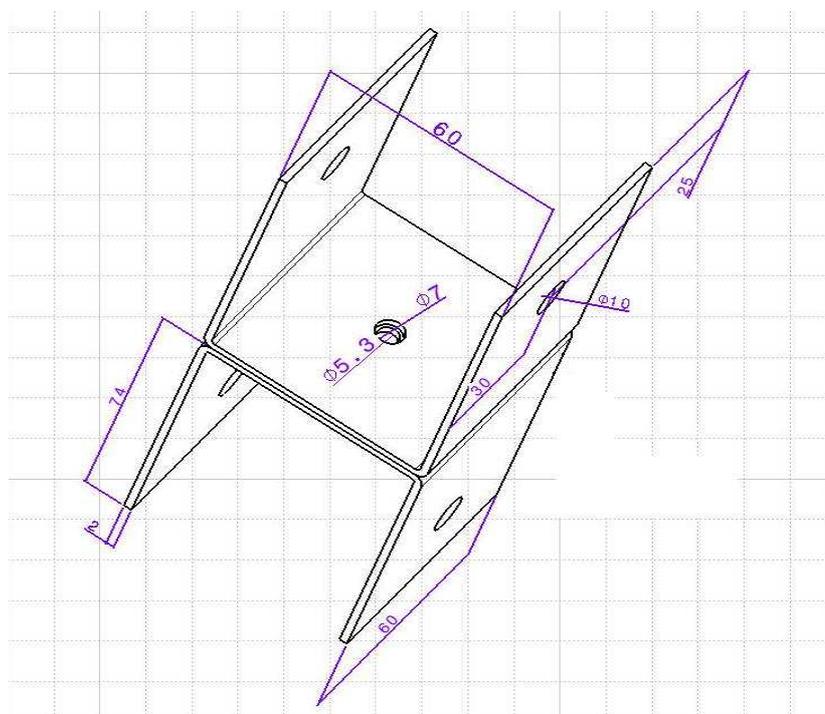
Zaharia R, Dubina D. *Behaviour of cold-formed steel truss bolted joints*. In: The IV'th international workshop on connections in steel structures. 2000.

Annexes

Annexe 1



Géométrie de l'éprouvette de cisaillement à simple recouvrement



Géométrie de l'éprouvette de traction

Annexe 2

Le Sikaflex 221

L'adhésif utilisé aujourd'hui dans la fabrication des coffres de traction est du SIKAFLEX 221 produit par Sika Industry. Il s'agit d'un polyuréthane monocomposant qui polymérise grâce à l'humidité de l'air pour former un élastomère.

Les polyuréthanes sont les polymères les plus utilisés dans l'industrie car ils présentent une grande facilité de mise en œuvre. De plus, le Sikaflex 221 possède de multiples avantages tels que la réalisation de l'étanchéité, la résistance à l'humidité et au vieillissement et une adhérence sur de nombreux de substrats.

D'après les renseignements fournis par le fabricant, le Sikaflex 221 n'est pas considéré comme une colle mais comme un joint d'étanchéité sauf si son épaisseur est supérieure à 2mm ce qui n'est pas le cas dans nos applications.

Propriétés

Résistance à la traction	1,8 MPa
Résistance au cisaillement	1,5 MPa
allongement à la rupture	500 %
Temps ouvert	45 min.
Polymérisation	Via l'humidité de l'air
Température de service	-40°C à +90°C
Tenue maximale en température :	
4 heures	120°C
1 heure	140°C

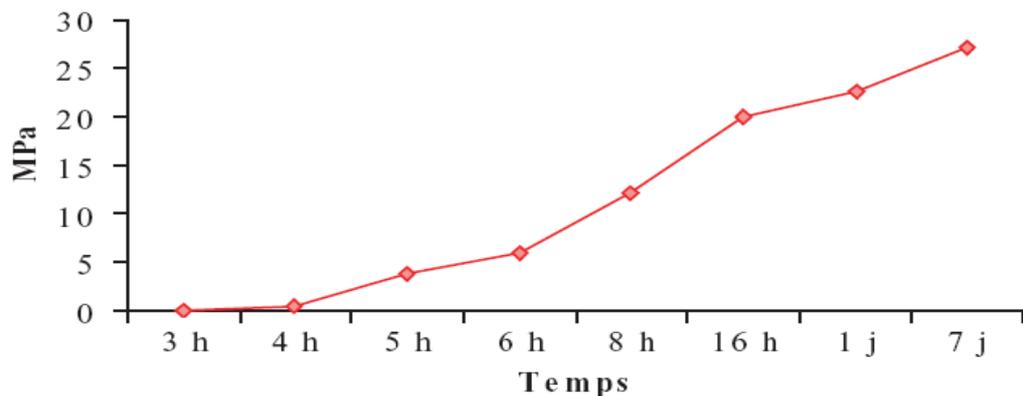
Annexe 3

Scotch-Weld™ 7240 B/A

Description

La colle 3M Scotch-Weld™ 7240 B/A est une colle structurale bi-composants polymérisable à température ambiante. Elle est caractérisée par sa ténacité et sa grande durabilité. La colle Scotch-Weld™ 7240 B/A offre les avantages suivants :

- Polymérisation à température ambiante (20-25°C). La polymérisation peut être accélérée par un apport de chaleur modéré.
- Ratio de mélange pratique (2 : 1).
- Application aisée.
- Temps ouvert important (45 minutes) et montée en performance rapide (6 heures de temps avant manipulation).
- Auto-extinguible (sans halogène).
- Avec billes de verre (200 µm) pour le contrôle de l'épaisseur du joint de colle.
- Haute résistance à l'environnement.
- Grande résistance à la compression en cas d'utilisation en tant que résine de remplissage.



Montée en performance et progression en réticulation de l'adhésif 7240 B/A à 23 ± 2 °C

Données techniques

Description du produit	7240 Base / Part B	7240 Durcisseur / Part A
Base	Résine époxyde	Amine modifiée
Couleur	Noire	Blanc
Densité	1,05 – 1,10	1,12 – 1,18
Viscosité à 23 °C (Pa.s)	100 - 200	100 - 200
Ratio de mélange		
en poids (%)	100	52
en volume (%)	100	50
Temps ouvert à 23 °C	45 minutes pour 20g	

Scotch-Weld™ 2216 B/A**Description**

La colle structurale 3M™ Scotch-Weld™ 2216 B/A souple est une colle à 2 composants, polymérisable à température ambiante et conçue pour les emplois nécessitant une très grande flexibilité.

Elle présente les avantages suivants :

- Base et accélérateur de teintes différentes facilitant le mélange.
- Polymérisation en 24 heures à 23 °C. Cette durée peut être réduite à 5 minutes si on polymérise à 120 °C.
- Pas de chute de résistance mécanique après vieillissement. Résistance aux chocs violents, aux vibrations et à la flexion.
- Bonne adhérence sur une grande variété de matériaux; en particulier les caoutchoucs, la plupart des matières plastiques, les bois et les matériaux.

Données techniques

	2216 B	2216 A
couleur	blanc	gris
base	époxyde modifiée	amine modifiée
densité	1,3 env.	1,2 env.
extrait sec	100 %	100 %
viscosité à 24 °C (Pa.s)	90 env.	50 env.
temps ouvert à 23 °C ± 2 °C	environ 90 min.pour 100 g de mélange	
Rapport de mélange :		
en poids	5 parts	7 parts
en volume	2 parts	3 parts

Scotch-Weld™ DP 190**Description**

La colle structurale Scotch-Weld DP 190 est un produit souple bi-composant qui polymérise à température ambiante. Elle est conçue pour des emplois nécessitant une très grande flexibilité.

Elle possède les avantages suivants :

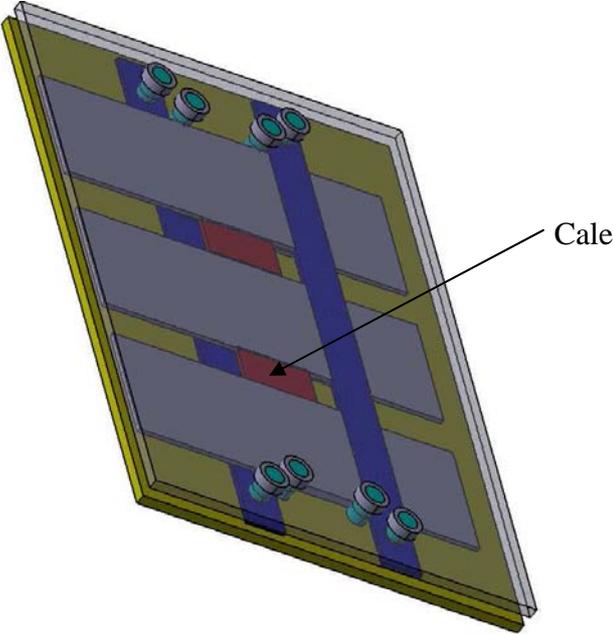
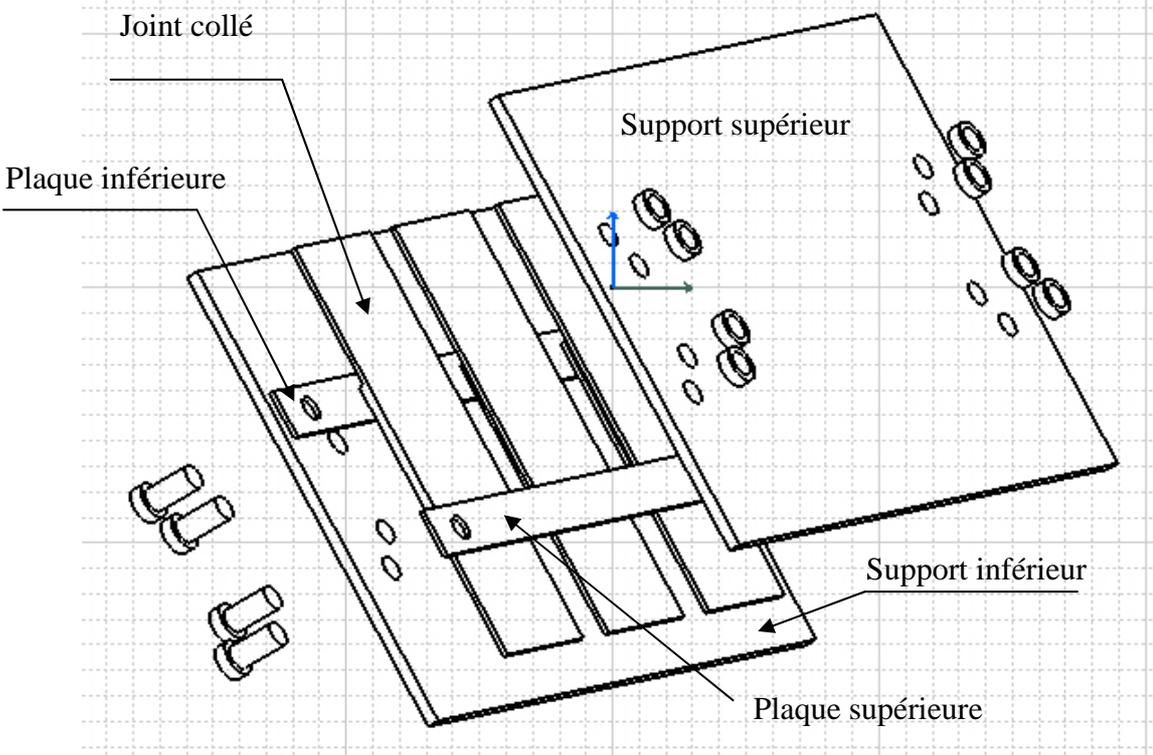
- Polymérisation en 24 h à 23°C. Cette durée peut être réduite à 5 minutes à 120°C.
- Pas de chute de résistance mécanique après vieillissement.
- Résistance aux chocs violents, aux vibrations et à la flexion.
- Bonne adhérence sur une grande variété de matériaux, en particulier les caoutchoucs, la plupart des matières plastiques, les bois et les métaux.
- Conditionnée en cartouche adaptée au pistolet applicateur E.P.X...

Données techniques

	Base	Durcisseur
couleur	blanche	grise
couleur après mélange	grise	
base	Epoxyde modifiée	Amine modifiée
densité	1,33	1,27
viscosité moyenne à 24°C (Pa.s)	100	52
rapport de mélange en poids	10	9,5
temps ouvert à 24°C	90 minutes pour 10 g de mélange	
temps de manipulation	quelques heures	
température d'emploi	- 55°C à + 80°C	

Annexe 4

Protocole pour réaliser le collage des joints en simple cisaillement :



Annexe 5

SCOTCH-WELD 7240 B/A FR : PARTIE A

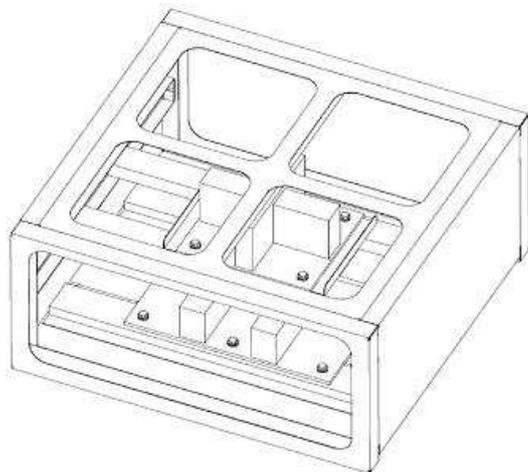
Nom chimique	Numéro CAS	EINECS	%	Symboles et phrases de risque
Diamine aliphatique polymérique	68911-25-1		15 - 40	Xi; R:41-38-43(auto-classification 3M)
Polymère butadiène - acrylonitrile modifié	Confidentiel		10 - 30	
Hydroxyde d'aluminium	21645-51-2	244-492-7	10 - 30	
3,3'-Oxybis(éthylèneoxy) bis (propylamine)	4246-51-9	224-207-2	7 - 13	Xi; R:41-38-43(autoclassification 3M)
2,4,6-Tris (diméthylaminomonométhyl) phénol	90-72-2	202-013-9	5 - 10	Xn; R:22-36/38
Composés inorganiques du calcium	Confidentiel		1 - 5	
Imidazole	288-32-4	206-019-2	1 - 5	Xn, C; R22-34-63 (Repro Tox cat.3)-Autoclassification fournisseur
Verre amorphe contenant des oxydes	65997-17-3	266-046-0	1 - 5	
Bis [(diméthylamino)méthyl]phénol	71074-89-0	275-162-0	0.1 - 1.5	C; R34 – Autoclassification fournisseur
Toluène	108-88-3	203-625-9	0.1 - 1	F, Xi, Xn; R:11-38-48/20-Repr.Cat.3;63-65-67 (29ème Adaptation)
2-Pipérazine-1-yléthylamine	140-31-8	205-411-0	0.1 - 1	C; Xn; R:21/22-34-43-52/53

SCOTCH-WELD 7240 B/A FR : PARTIE B

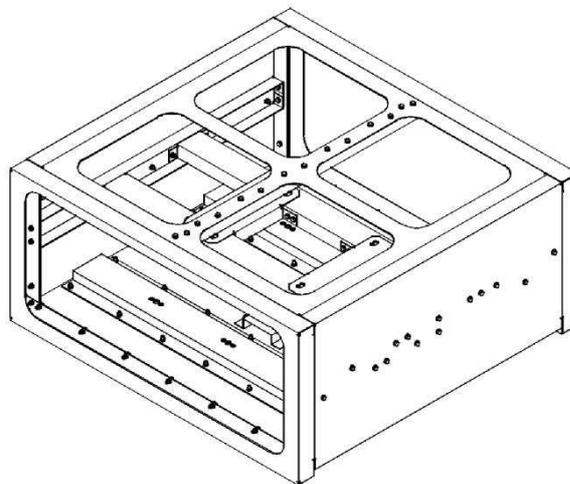
Nom chimique	Numéro CAS	EINECS	%	Symboles et phrases de risque
Hydroxyde d'aluminium	21645-51-2	244-492-7	10 - 30	
Résine époxyde (produit de réaction bisphénol A-épichlorhydrine, PM<700)	25068-38-6	500-033-5 (NLP)	10 - 30	Xi,N; R:36/38-43-51/53
Oxyde de diglycidyle et d'un polymère phénol-formaldéhyde	28064-14-4		10 - 30	Xi, N; R: 36/38-43-51/53
Verre amorphe contenant des oxydes	65997-17-3	266-046-0	7 - 13	
1,4- Bis[(2,3-époxypropoxy) méthyl]-cyclohexane	14228-73-0	238-098-4	5 - 10	Xi; R: 36/38-43 (auto classification fournisseur)
Polymère butadiène styrèneméthacrylate de méthyle.	25053-09-2		5 - 10	
Phosphore rouge	7723-14-0	231-768-7	1 - 5	F; R:11-16-52/53
Silice vitreuse	60676-86-0	262-373-8	1 - 5	
Dioxyde de silicium (préparé par voie chimique)	7631-86-9	231-545-4	1 - 5	
[3-(23-Epoxypropoxy)propyl] triméthoxysilane	2530-83-8	219-784-2	1 - 5	Xi,N; R: 38-41-51/53 (auto-classification fournisseur)
Produit de réaction du diméthylsiloxane et de la silice	67762-90-7		0.1 - 1	
Noir de carbone	1333-86-4	215-609-9	0.1 - 0.5	

Annexe 6

Charpente assemblée par collage structural



Charpente assemblée par vis autorouleuse + écrou



Adhésif 7240 B/A			Vis autorouleuse + écrou	
Conditionnement	Quantité	Montant HT (€)	Désignation	Montant HT unitaire (€)
Cartouche 400ml	6	283,2	Vis autorouleuse M6 x 16	0,12
Cartouche 400ml	60	2479,8	Ecrou Nylstop® M6	0,07
Cartouche 400ml	120	4375,2		
Tonnelets 54l	1	2426,18		

Coût assemblage collé (€)		Quantité de vis et écrous	Coût assemblage vissé (€)
Avec lot de 6 cartouches	15,16		
Avec lot de 60 cartouches	13,28		
Avec lot de 120 cartouches	11,71	164	31,16
Avec tonnelets de 54l	5,77		