

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET**  
**DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES  
SIDI BEL-ABBES  
FACULTÉ DE LA TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
**Mémoire de Magister**

**Spécialité : Génie Mécanique**

**Option : Mécanique des solides et des structures**

Présenté par

**Mr. GUIDOUM Ahmed**

Thème

---

**Influence de la forme du joint à simple recouvrement  
sur le comportement mécanique de l'assemblage**

---

Soutenu en 2012

Membres du Jury :

**Président : Mr. Achour Tarik**

Professeur à l'U.D. L de Sidi Bel Abbes

**Examineurs :**

**Mr Belhouari mohamed**

Professeur à l'U.D. L de Sidi Bel Abbes

**Mr Bachir Bouiajra Belabbes**

Professeur à l'U.D. L de Sidi Bel Abbes

**Mr Boutabout Benali**

Professeur à l'U.D. L de Sidi Bel Abbes

**Encadreur :**

**Mr Madani Kouider**

Maître de conférences à l'U.D. L de Sidi Bel Abbes



# Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Monsieur Dr. K. MADANI, directeur de mémoire de Magister qui m'a guidé et soutenu pour la réalisation de ce travail.

Mes remerciements aux membres de jury et enseignants pendant mon stage de Magister.

Mes remerciements pour l'ensemble des membres de ma famille qui m'ont soutenu et encouragé à poursuivre mes études du début jusqu'à la fin.

Je n'oublie pas de remercier vivement tous ceux qui ont participé de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

# Résumé

Le but de notre travail est d'étudier l'influence des modifications géométriques des composants du joint sur la distribution des contraintes d'un assemblage à simple recouvrement formé de deux substrats en Aluminium 2024-T3 et d'un adhésif époxyde ADEKIT A140.

A cet effet une analyse par la méthode des éléments finis a été menée à l'aide du code de calcul Abaqus afin de déterminer la distribution des contraintes dans le joint d'adhésif.

En parallèle une analyse par la méthode analytique a été effectuée dans le but de confronter les résultats des deux méthodes.

Ces analyses doivent nous permettre d'aboutir à l'établissement de modèles géométriques par la détermination des dimensions optimales répondant aux critères de résistance, de faisabilité et d'économie.

Mots clés : Joint simple recouvrement, contrainte de Von Mises, contrainte normale, contrainte de pelage, contrainte de cisaillement, biseautage, bourrelet .

# Abstract

The aim of our work is to study the influence of the geometrical modifications of the components of the joint on the distribution of the constraints of an assembly with simple formed covering of two substrates out of Aluminum 2024-T3 and of an epoxy adhesive ADEKIT A140.

For this purpose an analysis by the finite element method was carried out using code Abaqus the computer in order to determine the distribution of the constraints in the joint of adhesive.

In parallel an analysis by the analytical method was carried out with an aim of confronting the results of the two methods.

These analyzes must enable us to lead to the establishment of geometrical models by determination of optimal dimensions answering the criteria of resistance, feasibility and economy.

Key words: Joint simple covering, stress of Von Mises, normal stress, peeling stress, stress shear, beveling, pad.

# Tables des matières

Remerciements .....	iii
Résumé .....	iv
Abstract .....	iv
Tables des matières .....	v
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux .....	xi
Notations .....	xii
Chapitre I : Généralités sur le collage	
I.1 Introduction .....	1
I.2 Définition du collage structural .....	2
I.3 Avantages et inconvénients du collage structural .....	3
I.4 Méthodologie associée au collage structural .....	3
I.5 Les différents types d'assemblages collés .....	5
I.6 Les théories de l'adhésion .....	6
I.6.1. L'adhésion physique .....	6
I.6.1.1. Le contact .....	6
I.6.1.2. Le mouillage .....	6
I.6.1.3. Le coefficient d'étalement .....	7
I.6.2 L'adhésion électrique ou électrostatique .....	8
I.6.3 L'interphase .....	8
I.6.4 L'adhésion chimique .....	8
I.6.5 La théorie diffusionnelle .....	9
I.6.6 L'ancrage mécanique .....	10
I.7 Les colles structurales .....	10
I.7.1 Les polyuréthanes .....	10
I.7.2 Les adhésifs acryliques .....	10
I.7.3 Les cyanoacrylates .....	11
I.7.4 Les adhésifs anaérobies .....	11
I.7.5 Les acryliques modifiés .....	11
I.7.6 Les adhésifs phénoliques .....	11
I.7.7 Les polyimides .....	11
I.7.8 Les epoxydes .....	12
I.7.9 La transition vitreuse .....	12
I.7.10 Les charges .....	14
I.8 Adhésifs employés en aéronautique .....	15
I.8.1 Les adhésifs réticulés à chaud .....	15
I.8.2 Les adhésifs réticulés à froid .....	15
I.8.3 La préparation de surface .....	15

I.8.4 Les traitements de surface employés en aéronautique .....	15
I.8.5 Les traitements mécaniques .....	16
a) Le sablage .....	16
b) L'abrasion .....	16
I.8.6 Les traitements chimiques .....	16
a) Nettoyage par un solvant.....	16
b) Décapage chimique.....	16
c) Traitement électrochimique.....	17
d) Primaires d'adhésion.....	17
 Chapitre II : Analyse analytique des contraintes dans les assemblages collés	
II.1 Caractérisation des assemblages collés.....	20
II.1.1 Procédés destructifs de contrôle des assemblages collés .....	20
II.1.1.1 Essais normalisés sur joints collés.....	20
II.1.1.2 Essais relevant de la mécanique classique .....	21
a) Essais de Cisaillement.....	21
b) Essais de traction .....	22
c) Essais de pelage .....	22
d) Essais de clivage.....	22
II.1.1.3 Essais relevant de la mécanique de la rupture.....	22
a) Essais de caractérisation en mode I .....	23
b) Essais de caractérisation en mode II.....	23
II.1.2 Contrôle non-destructif.....	23
II.2 Théories élastiques .....	24
II.2.1 Généralités .....	24
II.2.2 Modèles analytiques.....	24
II.2.3 Analyse uniaxiale de Volkersen .....	26
II.2.4 Analyses élastiques biaxiales.....	28
II.2.4.1 Analyse de Goland et Reissner.....	29
II.2.4.2 Analyse de Hart-Smith.....	31
II.3 Analyse élastoplastique biaxiales de Hart-Smith .....	32
II.4 Intérêt des approches analytiques.....	35
II.5 Synthèse .....	36
II.6 Modèles numériques.....	36
II.6.1.Introduction.....	36
II.6.2.Comparaison des résultats des différentes théories présentées.....	36
 Chapitre III : Optimisation du joint à simple recouvrement	
III.1 Introduction.....	39
III.2 Objectifs.....	39
III.3 Configuration du joint .....	40
III.3.1 Modèle Géométrique.....	40

III.3.2 Repère Générale.....	40
III.3.3 Chargement.....	41
III.3.4 Conditions aux limites .....	41
III.2.5 Maillage.....	41
III.4 Propriétés mécaniques .....	42
III.4.1 Alliage d'Aluminium 2024 T3 .....	42
III.4.2 ADEKIT A140 .....	42
III.5 Optimisation par l'analyse de Volkersen.....	43
III.5.1 Influence de la longueur de recouvrement « L ».....	43
III.5.2 Longueur d'adhésif optimale.....	44
III.6 Optimisation par éléments finis .....	45
III.6.1 Influence de la longueur de recouvrement « L ».....	45
III.6.2 Influence de l'épaisseur de l'adhésif « ea ».....	47
III.6.3 Influence de l'épaisseur du substrat « es ».....	49
III.6.4 Influence de la charge « P » .....	51
Chapitre IV : Optimisation de la forme du joint	
IV.1 Optimisation par biseautage des substrats.....	54
IV.1.1 Biseautage intérieur des substrats.....	54
IV.1.2 Biseauté extérieur du joint .....	58
IV.2 Optimisation par ajout de bourrelet .....	62
IV.2.1 Joint avec bourrelet.....	62
IV.2.2 Optimisation du joint à bourrelet sur adhérent.....	65
IV.3 Joint avec ondulation.....	67
IV.4 Influence de la surface de collage.....	68
Conclusion et perspectives .....	72
Références bibliographiques .....	74

# Liste des figures

- Figure I.1. Pattes de gecko : exemple naturel dans lequel la structure des pattes permet un contact très intime avec des surfaces lisses telles que le verre (Autumn et al., 2002).
- Figure I.2. Vue en coupe d'un assemblage structural.
- Figure I.3. Défauts typiques présents dans un joint de colle.
- Figure I.4. Représentation schématique de différentes géométries d'assemblage (Cognard,2003).
- Figure I.5. Modèle d'Young de l'interface solide - liquide.
- Figure I.6. Représentation schématique du modèle électrostatique.
- Figure I.7. Exemple de liaison chimique directe entre adhérent et adhérent.
- Figure I.8. Utilisation d'un agent de couplage pour former une liaison chimique.
- Figure I.9. Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique.
- Figure I.10. Changement d'état : polymère cristallin et polymère amorphe.
- Figure I.11. Représentation de la surface d'un métal (Cognard, 2003).
- Figure I.12. Exemple de topographie d'un substrat Aluminium après anodisation électrochimique.
- Figure II.1. Tests mécaniques usuels d'assemblages collés.
- Figure II.2. Contraintes dans l'adhésif.
- Figure II.3. Déformations de l'adhésif avec des substrats rigides.
- Figure II.4. Déformations de l'adhésif et du substrat, hypothèses de Volkersen.
- Figure II.5. Répartition des contraintes de cisaillement dans le joint à simple recouvrement (Volkersen, 1938).
- Figure II.6. Répartition des contraintes de cisaillement en fonction de la rigidité des adhérents selon la théorie de Volkersen.
- Figure II.7. Modélisation mécanique d'un joint à simple recouvrement, d'après Goland & Reissner.
- Figure II.8. Répartition des contraintes dans le joint de colle selon Goland et Reissner.
- Figure II.9. Modélisation mécanique d'un joint à simple recouvrement, d'après Hart-Smith.
- Figure II.10. Répartition des contraintes dans le joint de colle selon Hart-Smith.
- Figure II.11. Matériau dont le comportement est élastique parfaitement plastique.
- Figure II.12. Zones considérées par Hart-Smith.
- Figure II.13. Courbe élastoplastique - Hart-Smith.
- Figure II.14. Raffinement du maillage dans l'adhésif.
- Figure II.15. Contraintes de pelage(a) et de cisaillement(b) Etudes élastiques.
- Figure II.16. Contraintes de cisaillement.
- Figure II.17. Contraintes de Mises dans le joint.
- Figure III.1. Modèle géométrique ISO 4587-1995.
- Figure III.2. Modèle géométrique conçue en 3D «photo capturée sur Abaqus.
- Figure III.3. Le modèle physique pour le joint collé à simple recouvrement.
- Figure III.4. Maillage du joint.
- Figure III.5. Courbe de traction Aluminium.2024 T3.
- Figure III.6. Courbe de comportement plastique Aluminium.2024 T3.
- Figure III.7. Courbe de traction ADEKIT A140.
- Figure III.8. Courbe de comportement plastique ADEKIT A140.
- Figure III.9. Longueur optimale de recouvrement en fonction de  $e_s$  et  $e_a$ .

Figure III.10. Longueur optimale de recouvrement en fonction de  $e_s$  et  $e_a$ .

Figure III.11. Contraintes Maximales pour différentes longueurs de recouvrement.

Figure III.12. Contrainte de Mises pour différentes longueurs de recouvrement.

Figure III.13. Contrainte de pelage pour différentes longueurs de recouvrement.

Figure III.14. Contrainte de cisaillement pour différentes longueurs de recouvrement.

Figure III.15. Contraintes Maximales pour différentes épaisseurs de l'adhésif.

Figure III.16. Contrainte de Mises pour différentes épaisseurs de l'adhésif.

Figure III.17. Contrainte de pelage pour différentes épaisseurs de l'adhésif.

Figure III.18. Contrainte de cisaillement pour différentes épaisseurs de l'adhésif.

Figure III.19. Contrainte ruine pour différentes épaisseurs de l'adhésif.

Figure III.20. Contraintes Maximales pour différentes épaisseurs des adhérents.

Figure III.21. Contrainte de Mises pour différentes épaisseurs des adhérents.

Figure III.22. Contrainte de pelage pour différentes épaisseurs des adhérents.

Figure III.23. Contrainte de cisaillement pour différentes épaisseurs des adhérents.

Figure III.24. Contraintes Maximales de cisaillement pour différentes valeurs de la charge.

Figure III.25. Contrainte de Mises pour différentes valeurs de la charge.

Figure III.26. Contrainte de pelage pour différentes valeurs de la charge.

Figure III.27. Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge.

Figure IV.1. Configuration de JSR-a) sans angle et b) avec angles.

Figure IV.2. Distribution des contraintes dans la couche adhésive suivant la ligne A-B : (a) $\sigma_{eq}$  ; (b) $\sigma_{yy}$  ; (c) $\sigma_{xy}$  ; (d) JSR à bord droit.

Figure IV.3. (a) $\sigma_{Mises}$  - (b) $\sigma_{yy}$  - (c) $\sigma_{xy}$  sous  $P = 15\text{MPa}$  ; (d) Contraintes de ruine Talon  $b = 0$ .

Figure IV.4. Etat de contrainte le long du joint adhésif.

Figure IV.5. Configuration de JSR a) sans angle et b) avec angles.

Figure IV.6. Distribution des contraintes dans la couche adhésive suivant la ligne A-B : (a) $\sigma_{eq}$  ; (b) $\sigma_{yy}$  ; (c) $\sigma_{xy}$  ; (d) JSR à bord droit.

Figure IV.7. (a) $\sigma_{Mises}$  - (b) $\sigma_{yy}$  - (c) $\sigma_{xy}$  sous  $P = 15\text{MPa}$  ; (d) Contraintes de ruine Talon  $b = 0$ .

Figure IV.8. Figure IV.8 Niveau de contrainte le long du joint adhésif  $a=L=20\text{mm}$

Figure IV.9. Début de plastification de l'adhésif.

Figure IV.10. Joints avec bourrelet - (a)bord droit - (b)Bourrelet sur adhésif - (c)Bourrelet sur Adhérent.

Figure IV.11. Joint avec bourrelet sur adhérent.

Figure IV.12. Joint avec bourrelet sur adhésif.

Figure IV.13. Joint à bord droit.

Figure IV.14. Plastification du joint-Bourrelet sur adhésif-(a) $P=10\text{MPa}$  et (b) $P=15\text{MPa}$ .

Figure IV.15. Plastification du joint-Bourrelet sur substrat-(a) $P=20\text{MPa}$  et (b) $P=60\text{MPa}$ .

Figure IV.16. Joint avec bourrelet à  $30^\circ$  -  $45^\circ$  -  $60^\circ$ .

Figure IV.17. Bourrelet à 30%.

Figure IV.18. Bourrelet à 45%.

Figure IV.19. Bourrelet à 60%.

Figure IV.20 (a) Charges pour lesquelles l'adhésif se plastifie (b) contraintes  $\sigma_{Mises}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\tau_{xy}$

Figure IV.21. (a)joint ondulé - (b) joint droit.

Figure IV.22. Courbes de contraintes (a)- Joint ondulé-(b) JSR.

Figure IV.23. Joint sans évidement  
Figure IV.24. Joint avec un évidement  
Figure IV.25. Joint avec deux évidements  
Figure IV.26. Contrainte de Mises  
Figure IV.27. Contrainte de Mises-Résultat Abaqus  
Figure III.28. Contrainte de Mises  
Figure III.29. Contrainte de Mises-Résultat Abaqus  
Figure III.30. Contrainte de Mises  
Figure III.31. Contrainte de Mises-Résultat Abaqus

# Liste de tableaux

- Tableau II.1. Les propriétés du joint à simple recouvrement étudié.
- Tableau III.1. Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium.
- Tableau III.2. Propriétés mécaniques ADEKIT A140.
- Tableau III.3. Contraintes Maximales pour différentes longueurs de recouvrement.
- Tableau III.4. Valeurs des contraintes en fonction du chargement.
- Tableau IV.1. Combinaison des dimensions des joints.
- Tableau IV.2. Récapitulation des contraintes maximales.
- Tableau IV.3. Contraintes de ruine.
- Tableau IV.4. Combinaison des dimensions des joints.
- Tableau IV.5. Récapitulation des contraintes maximales.
- Tableau IV.6. Contraintes de ruine.
- Tableau IV.7. Contraintes maximales des joints (a), (b) et (c).
- Tableau IV.8. Contraintes maximales dans les joints (a) et (b).

# Notations

$\gamma_{SV}, \gamma_{LV}, \gamma_{SL}$ : Les énergies libres interfaciales;  
S, L, V : Représentent le solide, liquide et la vapeur;  
 $W_a$  : Le travail thermodynamique réversible d'adhésion;  
 $\gamma_1$  : L'énergie de surface du liquide  $\gamma_{LV}$ ;  
 $\gamma_2$  : L'énergie de surface du solide dans le vide  $\gamma_s$ ;  
 $\gamma_{12}$  : L'énergie libre interfaciale  $\gamma_{SV}$ ;  
 $\tau_m$  : Contrainte de cisaillement moyenne;  
b : Largeur du joint;  
L : Longueur du joint;  
 $\lambda$  : Longueur de séparation du joint;  
P : Charge appliquée;  
 $E_s$  : Modules d'Young de substrat;  
 $e_s$  : Epaisseur de substrat;  
 $\nu_s$  : Coefficients de poisson de substrat;  
 $E_a$  :  $E_a$  : Module de Young de l'adhésif;  
 $G_a$  : Module de cisaillement de l'adhésif;  
 $e_a$  : Epaisseur d'adhésif;  
 $\nu_a$  : Coefficient de poisson de l'adhésif;  
 $\tau_{xy}$  : Contrainte de cisaillement de Volkersen; de Goland et Reissner; Hart-Smith;  
 $\tau_{yx}$  : Contrainte de cisaillement de Volkersen; de Goland et Reissner; Hart-Smith;  
 $k_{GR}$  : Facteur de moment de flexion de Goland et Reissner;  
 $k_{HS}$  : Facteur de moment de flexion de Hart-Smith;  
 $\sigma_{yy}$  : Contrainte normale de pelage;  
M : Moment de flexion;  
 $\sigma_{xx}, \sigma_{yx}$  : Contrainte longitudinale;  
s : Substrat;  
a : Adhésif.

# INTRODUCTION GENERALE

L'apparition et le développement des adhésifs structuraux permettent au collage, très ancienne technique d'assemblage, de trouver sa place dans les industries de pointe grâce aux efforts réalisés dans l'aéronautique. De nos jours, la technique d'assemblage par collage est encore appelée à un large développement dans de nombreux domaines de l'industrie (automobile, constructions navales, aéronautique, bâtiment...) vu les progrès constants réalisés en sciences des matériaux, en particulier dans l'industrie des matériaux composites.

Grâce à de nombreux avantages, le collage remplace souvent les procédés traditionnels d'assemblages tels que le boulonnage, le rivetage, le vissage, l'agrafage ou bien même le soudage. Une brève énumération des avantages de l'assemblage par collage met en évidence une répartition plus régulière des contraintes, la possibilité d'assembler des matériaux de nature différente grâce aux progrès constants de l'industrie chimique, un amortissement des vibrations dans la structure grâce aux propriétés de l'adhésif, un allègement des structures, une amélioration de l'esthétique, un prix de revient souvent inférieur aux techniques d'assemblages classiques. Enfin, l'assemblage par collage est une opération facilement automatisable permettant de grandes cadences de production. Cependant, des inconvénients persistent dans l'utilisation de cette technique d'assemblage et peuvent s'avérer limitatifs à son développement. En effet, la résistance à la chaleur est souvent limitée, la durabilité en milieux sévères est parfois moyenne (5 à 20 ans), des traitements de surface avant collage sont souvent nécessaires. De même, un joint de colle possède une résistance au pelage souvent faible,

Le démontage d'une structure collée est difficile voire impossible et le temps de prise de la colle est parfois long. Tous ces paramètres doivent être pris en compte lors de la conception d'un assemblage par collage. Ainsi, on peut encore observer une certaine appréhension quant à la généralisation de cette technique d'assemblage à de nombreux domaines de l'industrie. L'incapacité actuelle à adopter des critères de dimensionnement validés autres que les essais normalisés demeure préjudiciable.

Des travaux de recherche sont encore nécessaires pour caractériser l'adhésif sous la forme d'un joint de colle et éclaircir les mécanismes de ruine des assemblages collés afin de déterminer des critères validés et destinés aux bureaux d'études puis de donner des règles pratiques pour la conception des joints collés.

la détermination de la distribution des contraintes dans le joint adhésif est nécessaire pour dimensionner et caractériser un assemblage, Le but de notre travail est d'étudier par une analyse analytique et par éléments finis la distribution des contraintes de Mises, de cisaillement et de pelage d'un assemblage à simple recouvrement constitué de deux plaques en aluminium et d'un adhésif ADEKIT A114 bi-composant caractérisé par airbus.

Notre travail est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique relatant l'historique, les caractéristiques,

les avantages et inconvénients ainsi l'évolution et les domaines d'application du collage.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des différents types d'assemblage ainsi que les différents types d'essais effectués sur ces assemblages afin de caractériser la résistance du joint d'adhésif.

Le troisième chapitre porte sur les analyses analytique et numérique afin d'optimiser les dimensions des constituants du joint.

Le quatrième chapitre concerne l'optimisation de la forme du joint (plaques et adhésif) dans le but de réduire les effets de bords. A cet effet plusieurs paramètres ont été mis en évidence tel que les effets de bourrelets d'adhésif ou le biseautage des plaques et modification mixte de la plaque et l'adhésif.

Enfin une conclusion est donnée pour décrire l'avantage de la modification apporté au joint d'adhésif et à la plaque dans le but de réduire les contraintes dans l'adhésif.

# CHAPITRE I

## Généralités sur le collage

## I.1 Introduction

L'assemblage est une opération consistant à rendre solidaires deux objets. On distingue différents types d'assemblages [1], qui sont :

- l'assemblage statique par juxtaposition (ex : constructions),
- l'assemblage par blocage géométrique (ex : emboitements),
- l'assemblage à force (ex : utilisation du clou),
- l'assemblage de fils (ex : entrecroisements de fils),
- l'assemblage de surfaces souples (ex : couture),
- et l'assemblage par adhésion (ex : utilisation de colles).

L'assemblage par adhésion directe entre matériaux n'a lieu que très rarement, seulement dans le cas où des matériaux présentent des surfaces extrêmement lisses et propres, permettant un contact intime entre les matériaux avec des distances très faibles. L'adhésion entre deux matériaux à surface rugueuse ne permet donc pas une adhésion directe en raison d'une diminution de la surface de contact. Les adhésifs, généralement pâteux ou initialement liquides, appliqués entre des matériaux, constituent un film assurant un contact intermédiaire et intime entre les surfaces, rendant les matériaux solidaires après durcissement.



Figure I.1 Pattes de gecko : exemple naturel dans lequel la structure des pattes permet un contact très intime avec des surfaces lisses telles que le verre [2]

Le collage est l'une des premières techniques d'assemblage utilisée par l'homme [1]. La nature a mis à la disposition de l'homme un grand nombre de produits adhésifs naturels d'origine végétale, animale et minérale tels que la glu extraite de l'écorce de houx, la chair visqueuse du fruit du gui, le jus de gousse d'ail, le latex, la sève résineuse des conifères, le bitume et beaucoup d'autres. Les premières manifestations de l'utilisation par l'homme de matières adhésives remontent à environ 3500 ans avant notre ère avec l'utilisation du bitume pour assembler le bois et le silex.

On voit apparaître l'association de la notion de collage à celle d'étanchéité avec l'utilisation par les Olmèques, qui vivaient il y a près de 3000 ans dans le golf du Mexique, du latex pour imperméabiliser des tissus. Cette association se retrouve chez les Phéniciens, Grecs et

Romains avec l'utilisation de compositions à base de térébenthine, cire d'abeille, goudron de charbon de bois et bitume, lesquels présentaient un excellent comportement à l'humidité pour imperméabiliser les coques des bateaux. Les premières innovations pratiques viendront avec la découverte du naphta, solvant du caoutchouc, par MacIntosh en 1823, et de la vulcanisation, par Charles Goodyear en 1839. C'est un peu avant la Première guerre mondiale qu'apparaissent les premières colles fabriquées industriellement à partir de caoutchouc.

Les premières études de la réaction des phénols sur le formol datent de 1872 par Otto Bayer, puis en 1912, le chimiste Léo Bæckeland met au point un adhésif à base de résine phénolique, la Bakélite.

La notion de colle structurale apparaît dans les années 40 avec le collage métal/métal, tellement résistant que l'on se permet de faire travailler mécaniquement ces assemblages, notamment dans la construction d'avions.

Après la Seconde guerre mondiale, le collage devient une science avec l'étude des mécanismes du collage, du vieillissement et de la durabilité des assemblages collés, et divers modèles et théories sont proposés. Actuellement, il existe de nombreuses variétés de colles et adhésifs pour diverses utilisations dans l'industrie automobile, aéronautique [3] ou dentaire [4].

## **1.2 Définition du collage structural**

Cette notion est apparue lorsqu'on a commencé à réaliser des assemblages collés pouvant supporter des contraintes aussi importantes que les assemblages mécano-soudés.

Cet assemblage collé présente alors une résistance équivalente à celle des matériaux constituant la structure. La colle est partie intégrante de l'ensemble de la structure à la différence des produits de revêtements ou des mastics d'étanchéité, d'où l'appellation d'adhésifs structuraux. La définition du collage est relativement claire. On peut considérer par exemple celle donnée dans CETIM [5]: "Le collage permet d'assembler des substrats au moyen de substances adhésives (colles, adhésifs)." En ce qui concerne le collage dit structural, il existe de nombreuses définitions différentes. Cette notion dépend en effet du type d'application considéré et des matériaux assemblés. Dans Bretton and Villoutreix [6], les auteurs distinguent les adhésifs non-structuraux et les adhésifs structuraux par leurs performances mécaniques. Ils définissent la limite

par l'infériorité (ou la supériorité) de la résistance en traction à 10 – 12 MPa. Dans Couvrat [7], les adhésifs sont structuraux dès lors que leur résistance au cisaillement est supérieure à 7 MPa. Dans CETIM [5], il est dit que les adhésifs structuraux sont les adhésifs appelés réactifs. Ces différentes définitions se rejoignent sur la notion de résistance suffisante de l'assemblage réalisé. Il est à noter que dans Cognard[8], l'auteur ajoute à cette définition la notion de durabilité de l'assemblage dans différents environnements. On retiendra que le collage est dit structural lorsqu'il confère à l'assemblage considéré une résistance mécanique suffisante dans les conditions

environnementales de service.

### **I.3 Avantages et inconvénients du collage structural**

L'assemblage par collage présente de nombreux avantages:

- il permet d'assembler des matériaux de natures très différentes,
- de respecter l'intégrité des matériaux, l'assemblage étant continu, les efforts sont répartis uniformément, évitant ainsi les concentrations de contraintes,
- la continuité de la liaison qui assure, aux assemblages collés, une meilleure tenue en fatigue,
- la préparation ne nécessite pas d'échauffement local important et ainsi ne modifie pas les propriétés des matériaux à assembler
- absorbe les vibrations et chocs,
- améliore la résistance à la corrosion galvanique,
- améliore l'étanchéité dans les joints,
- la diminution du temps d'exécution et des coûts d'assemblage.
- et permet de réduire la masse de l'assemblage tout en étant efficace.

Mais cette technique connaît aussi des désavantages :

- les surfaces doivent être parfaitement propres,
- les traitements de surfaces mécaniques ou chimiques sont souvent nécessaires pour, respectivement, modifier la rugosité pour augmenter les surfaces de contact et augmenter les énergies libres de surface,
- le manque de moyens fiables de contrôle non-destructif.

### **I.4 Méthodologie associée au collage structural**

Le collage nécessite toutefois quelques précautions d'utilisation. Tout d'abord, il faut choisir le bon adhésif en fonction de la nature des solides à assembler, des sollicitations auxquelles sera soumis l'assemblage, des conditions et des durées de solidification.

Après s'être assuré que les géométries des solides à unir ne vont pas entraîner la localisation de contraintes qui constitueraient des points de faiblesse, il est nécessaire dans la plupart des cas d'effectuer des traitements de surface préalables des solides à coller afin de permettre ou d'améliorer l'adhésion.

De nombreuses études ont démontré l'intérêt du traitement de surface quant à la tenue mécanique des assemblages collés [9],[10]. Le but des traitements est multiple, il s'agit :

- de dégraisser la surface du substrat,
- d'éliminer les couches de contamination en surface qui sont faiblement adhérentes,
- de changer la composition chimique superficielle pour former une couche de haute réactivité

chimique,

- de modifier la morphologie de la surface en augmentant la rugosité.

Il ressort de ces études que le traitement de surface est primordial pour obtenir une bonne tenue mécanique. Les grandes catégories de traitements de surface les plus couramment utilisées sont :

- l'ablation mécanique telle le sablage,
- les traitements chimiques et/ou électrochimiques,
- les dépôts plasma,
- l'utilisation de primaires d'adhérence.

A l'issue de l'étape de mise en œuvre, différents défauts sont susceptibles d'être créés au niveau des différentes zones de l'assemblage (figure I.2).

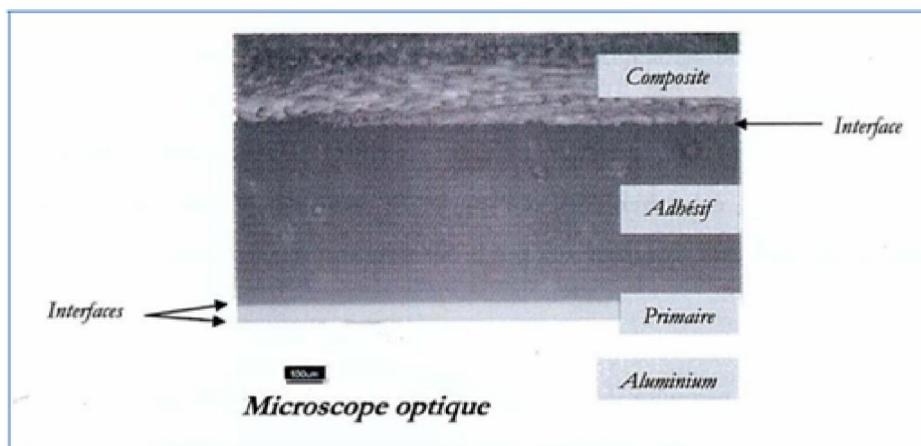


Figure I.2 Vue en coupe d'un assemblage structural

La présence de porosités au sein du joint résulte du départ de produits volatils et l'existence de bulles d'air au cours de la réticulation. La mise sous pression de l'adhésif au cours du cycle de cuisson est censée réduire ce phénomène. La concentration, en une région donnée, de porosités peut conduire à la création de trous ou cavités. Ces trous peuvent aussi s'expliquer par une quantité insuffisante d'adhésif. Si elles sont localisées à l'interface, les cavités créent des interfaces non liées qui peuvent aussi s'expliquer par une mauvaise préparation de surface du substrat. Les fissures au sein de l'adhésif sont dues à l'action de contraintes thermiques au cours de la réticulation. Enfin, les zones de mauvaise réticulation peuvent s'expliquer soit par un temps de réticulation insuffisant, soit par une composition inhomogène de l'adhésif.

Il est évident que ces types de défauts sont des zones privilégiées pour la dégradation de l'interface par l'eau ou par l'oxygène. Une grande attention devra donc être portée au protocole associé au collage afin de minimiser au maximum la présence de ces derniers.

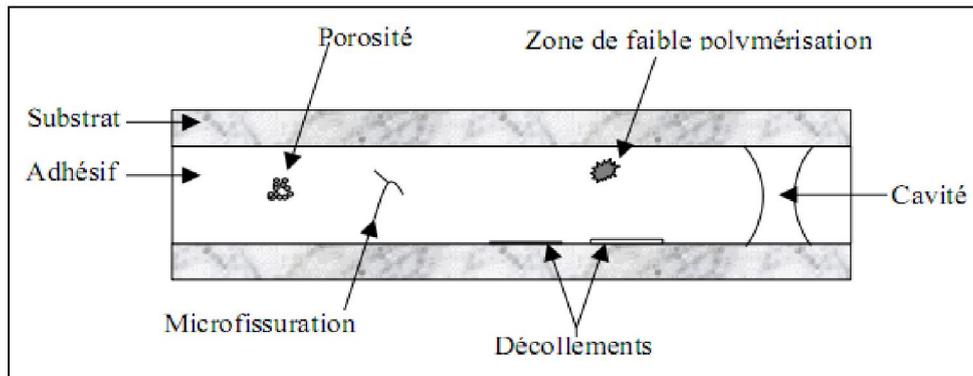


Figure I.3 Défaits typiques présents dans un joint de colle

L'évaluation des performances d'un assemblage collé après sa mise en œuvre s'effectue soit par des tests mécaniques destructifs, soit par des contrôles non destructifs (CND) qui, du fait de l'intérêt que leurs portent les industriels, se développent considérablement. Citons, par exemple, la caractérisation d'assemblages collés par ultrasons [11].

### I.5 Les différents types d'assemblages collés

Les divers assemblages collés employés dans le secteur aéronautique peuvent être classés en trois catégories. On retrouve principalement :

- les joints à simple et double recouvrement (single and double lap joints) ;(figure I.4),
- les joints massiques et annulaires en torsion (torsion butt joint and napkin ring )
- et les joints massiques sollicités en traction (butt joints).

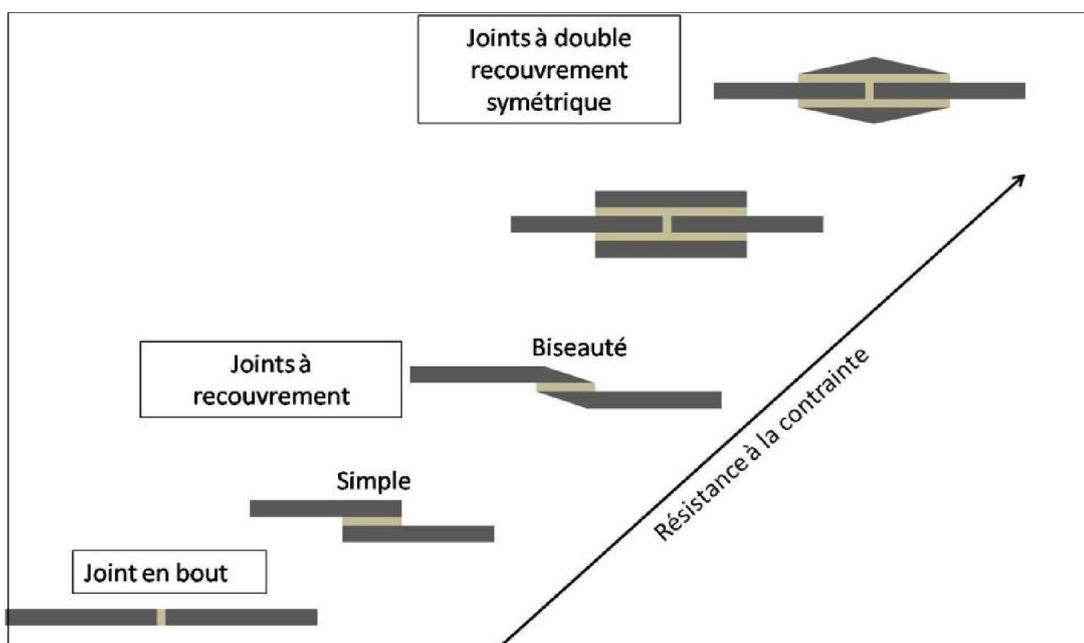


Figure I.4 Représentation schématique de différentes géométries d'assemblage[12].

Le choix de la géométrie utilisée correspond à un compromis entre la simplicité d'élaboration et le type de sollicitation envisagé et leur spécificité chimique sera abordée. Une des difficultés du collage réside d'ailleurs dans la multidisciplinarité de la technique qui requiert à la fois des connaissances chimiques et mécaniques dans le cadre de son optimisation. Une des illustrations de cette difficulté sera donnée dans la partie suivante où les efforts d'adhésion seront décrits. Ce paragraphe insistera sur l'importance de la phase de préparation de surface lors du collage. Enfin, une dernière partie décrira d'autres aspects importants liés au collage, qui sont les phénomènes de concentration de contrainte.

## **I.6 Les théories 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 adhérent. Cette condition implique une bonne compréhension des mécanismes qui sont à l'origine du phénomène d'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 nombreuses théories 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 que nous allons maintenant présenter.

### **I.6.1. L'adhésion physique**

#### **I.6.1.1. Le contact**

La mise en contact d'un solide et d'un liquide est certainement un phénomène important de l'adhésion. Il est vraisemblable que c'est d'abord la vapeur du liquide ou celle des constituants les plus volatils qui atteignent la surface solide. Lorsque le liquide s'étale, c'est aussi par évaporation puis condensation en avant du liquide.

#### **I.6.1.2. Le mouillage**

L'efficacité d'un collage dépend fortement du contact entre l'adhésif et le matériau à assembler.

En général, lors de l'application, les adhésifs se trouvent sous une forme liquide ou sont susceptibles de le devenir, dans le cas, par exemple, des thermoplastiques, qui passent de l'état solide à liquide par chauffage. Dans ce cas, les adhésifs vont s'étaler sur la surface avec plus ou moins de facilité [13]. Ce phénomène est appelé le mouillage.

La déposition d'une goutte de liquide à une surface d'un solide, va provoquer les phénomènes décrits au paragraphe (I.6.2). La goutte du liquide perturbe la surface d'une quantité inconnue en présence d'air, on observe que, soit le liquide s'étale on dit qu'il « mouille » la surface, soit il

forme une goutte faisant un angle de contact  $\theta$  avec la surface solide (figure 1.2). Si la tension superficielle du liquide est  $\gamma_L$ , l'énergie superficielle du solide  $\gamma_s$ , et l'énergie interfaciale  $\gamma_{sL}$ , la valeur de l'angle de contact est reliée à ces trois énergies par l'équation de Young [14].

$$\gamma_L \cos \theta = \gamma_s - \gamma_{sL} \tag{I.1}$$

**I.6.1.3. Le coefficient d'étalement**

La condition pour que le liquide mouille la surface est :

$$\gamma_L < \gamma_s - \gamma_{sL} \quad \text{ou encore } \gamma_L < \gamma_s \text{ car l'énergie interfaciale } \gamma_{sL} \text{ est petite}$$

Cooper et Nutall[1915] ont défini la condition du mouillage par le signe du coefficient d'étalement

$$S = \gamma_s - (\gamma_{sL} + \gamma_L) \tag{I.2}$$

Si  $S > 0$ , le liquide mouille la surface et inversement ,si  $S < 0$  il n'y aura pas étalement.

$S$  correspond à la variation d'énergie libre lorsqu'une goutte de liquide,  $L$ , est déposée sur une surface. Si sa surface augmente de  $dA$ , celle de l'interface s'accroît autant et celle du substrat diminue de  $dA$ . En tenant compte de l'équation de Young-Dupré,  $S = \gamma_{LV}(\cos\theta - 1)$ , il en résulte que lorsque  $\theta \neq 0$ , la variation de l'énergie de formation de l'interface est négative et qu'elle ne se formera pas spontanément. Le travail thermodynamique réversible d'adhésion ou de Dupré,  $W_a$ , correspond au travail nécessaire pour séparer une unité de surface de deux phases constituant une interface. En l'absence d'adsorption, d'interdiffusion et d'interactions mécaniques,  $W_a$  en milieu inerte s'écrit comme la différence d'énergie libre entre les deux surfaces séparées ( $\gamma_s + \gamma_L$ ) et les surfaces assemblées. La relation fondamentale de l'adhésion est donnée par l'équation :

$$(\gamma_{sL}) : W_a = (\gamma_s + \gamma_L) - \gamma_{sL} \tag{I.3}$$

Cette équation est la relation fondamentale de l'adhésion.

Où  $\gamma_s$  et  $\gamma_L$  sont les énergies libres de surface de chaque phase et  $\gamma_{sL}$  l'énergie libre d'interface. La condition d'obtention d'une bonne adhésion dépend du contact entre les deux solides à assembler, donc du mouillage lors de la formation de l'assemblage. La tension de surface de la colle doit être inférieure à celle du substrat. Dans le cas contraire, combinant une énergie de surface faible et une importante rugosité on trouve des angles de contact élevés (Figure I.5).

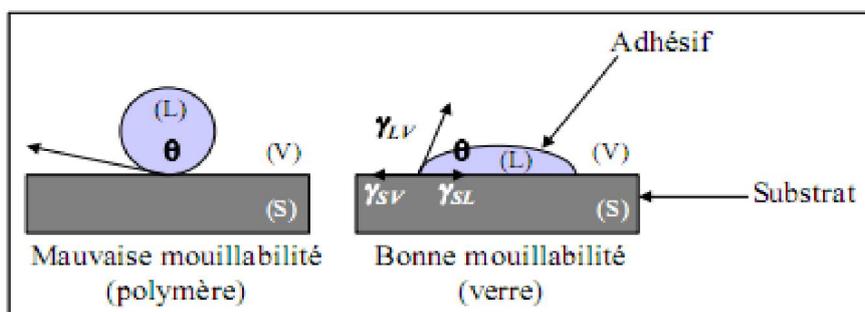


Figure I.5 Modèle d'Young de l'interface solide - liquide [14]

### **I.6.2 L'adhésion électrique ou électrostatique (Deryagin, Skinner 1948).**

En 1948, Deryagin et Krotova [15] ont proposé une théorie fondée sur des effets électriques observés lors d'un essai de pelage. Ces auteurs ont constaté lors de ce test la présence de décharges électriques et ont donc postulé l'existence d'une double couche électrique de signes opposés, assimilant le joint à un condensateur plan. L'adhésion résulterait donc de forces d'attraction électrostatiques développées entre l'adhésif et le substrat (Figure I.6). Bien que ce modèle ait été validé par le test de pelage sur les assemblages verre-polychlorure de vinyle, plusieurs auteurs s'accordent à penser que les décharges électriques seraient une conséquence plutôt que la cause de l'adhésion.

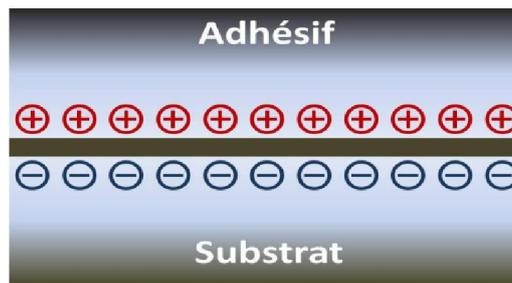


Figure I.6 Représentation schématique du modèle électrostatique.

### **I.6.3 L'interphase**

Dans les années 60, Bikermann [16] émet l'hypothèse de la formation d'une zone au voisinage de l'interface caractérisée par une cohésion différente de celle des matériaux en présence. Dans le cas d'une forte cohésion, la rupture a lieu à l'intérieur de l'un des solides. Dans le cas contraire, la rupture dans la zone de transition interfaciale traduit une faible cohésion. Ce modèle d'interphase, à forte ou faible cohésion, ne prétend pas expliquer les mécanismes de l'adhésion, mais met l'accent sur la nature de l'interface lorsque l'on affine l'échelle d'observation, à l'échelle moléculaire.

### **I.6.4 L'adhésion 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 :

1. 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.7).
2. 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 pour obtenir une bonne adhésion entre une matrice époxyde et des fibres de verre dans les matériaux composites (figure I.8)

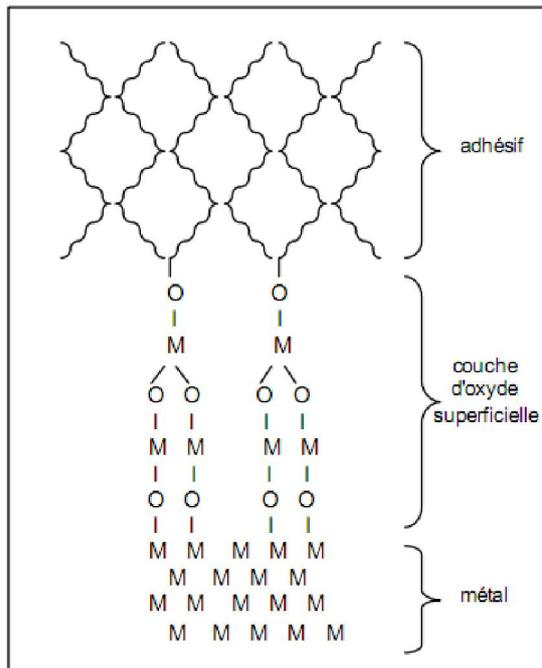


Figure I.7 Exemple de liaison chimique directe entre adhérent et adhésif

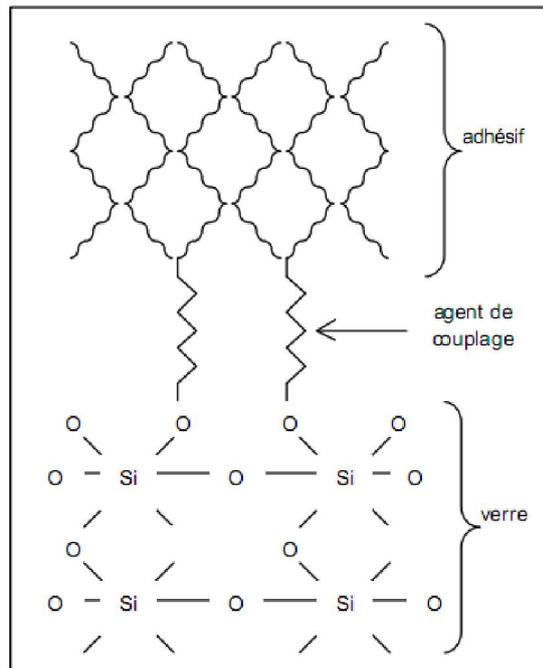


Figure I.8 Utilisation d'un agent de couplage pour former une liaison chimique

### **I.6.5 La théorie diffusionnelle(Vovustkii 1949).**

Cette théorie [17] est utilisée pour expliquer l'adhésion entre deux matériaux macromoléculaires. L'adhésion est ainsi expliquée comme un enchevêtrement de macromolécules de deux matériaux résultant de l'interdiffusion des molécules des plans 12 superficiels du liant et du substrat. Cette interdiffusion se traduit par la création d'une zone de transition, appelée interphase ou interface épaisse. Cette théorie s'appuie sur deux critères :

- Critère cinétique
- Critère thermodynamique

De Gennes [18] s'est basé sur le concept de reptation pour expliquer le phénomène d'interdiffusion. Selon lui, la diffusion se fait essentiellement par les extrémités des chaînes macromoléculaires.

Ce modèle ne peut être appliqué qu'aux matériaux compatibles thermodynamiquement et exige que les macromolécules du substrat et de l'adhésif soient suffisamment mobiles et mutuellement solubles.

### **I.6.6 L'ancrage mécanique(Mac Bain 1926).**

Proposé par Mac Bain et Hopkins [19], il considère 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. 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.9).

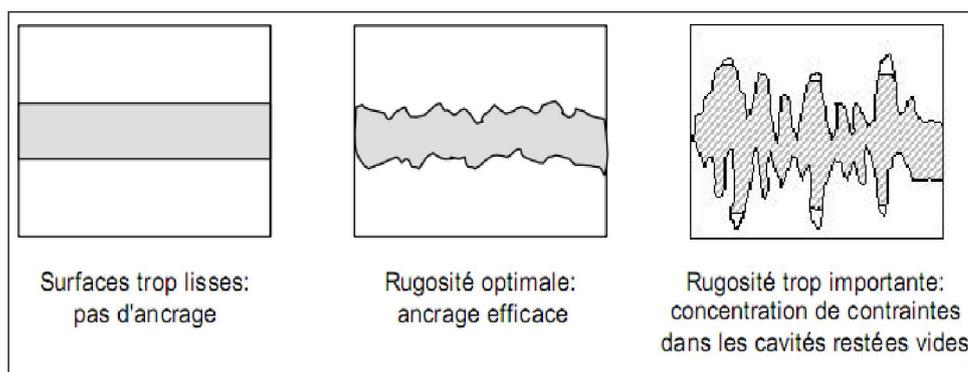


Figure I.9 Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique,  
d'après [20]

## **I.7 Les colles structurales**

Les cinq principales familles d'adhésifs structuraux existant actuellement sont décrites ci-après. Pour chacun d'entre eux, les avantages et inconvénients seront listés afin de mettre en relief les éléments de choix pour le concepteur.

### **I.7.1 Les polyuréthanes**

On trouve des colles polyuréthanes à deux composants ou mono- composant réticulant l'humidité de l'air. Ces colles sont le plus souvent appréciées en raison de leurs très bonnes propriétés en souplesse et en ténacité. Ceci vient de leur structure polymérique qui associe des segments durs et mous. L'alternance de ces deux types de segments résultant de deux réactions différentes leur confère leur grande résistance au pelage Cognard [8]. On pourra retenir qu'en fonction de leur formulation, leur résistance en traction-cisaillement se situe entre 1 et 15 MPa selon CETIM [5].

### **I.7.2 Les adhésifs acryliques**

Ce sont des adhésifs bicomposants ; dans certains cas, la résine acrylique est appliquée sur l'un des substrats et le durcisseur sur l'autre . Lorsque les deux supports sont pressés, le catalyseur diffuse dans la résine et initie la réticulation en quelques minutes. Les joints souples obtenus ont une très bonne résistance au cisaillement et au pelage. Les adhésifs acryliques sont obtenus par polymérisation.

Il existe différents groupes d'adhésifs acryliques :

### **I.7.3 Les cyanoacrylates**

Ce type de colle est couramment utilisé car leur prise est très rapide (Il s'agit des colles dénommées couramment "Superglu"). Leur résistance est assez élevée et tout comme les résines époxydes, elles sont rigides et ont une capacité faible en pelage. Leur résistance à la fatigue semble plus contestée, mais ce qui limite réellement leur utilisation est leur faible temps de prise. En effet, dans le cas où les surfaces à assembler sont importantes, leur mise en œuvre est très délicate. En outre, comme l'humidité est un catalyseur important de la polymérisation de ce type d'adhésif, elle réagit facilement en contact avec les doigts où les muqueuses. Leur utilisation requiert donc une vigilance particulière.

### **I.7.4 Les adhésifs anaérobies**

Ce type d'adhésifs polymérise sous absence d'oxygène. Ce dernier inhibe en effet la réaction. La réaction de polymérisation est catalysée par les surfaces métalliques et il est donc normal qu'ils soient beaucoup utilisés dans le cas des assemblages en automobile pour le remplissage des jeux, et les fixations coaxiales principalement.

### **I.7.5 Les acryliques modifiés**

Leur formulation associe deux composants et permet d'obtenir des propriétés de souplesse et de pelage plus intéressantes tout en maintenant des propriétés en cisaillement acceptables.

De manière générale, ce type d'adhésif a une prise rapide et une résistance importante en cisaillement. Dans le cas des acryliques modifiés, ils ont également une souplesse importante et une bonne résistance au pelage. En ce qui concerne leur durabilité, elle semble variable en fonction de la formulation considérée. On pourra retenir que leur résistance en cisaillement peut atteindre plus de 30 MPa, CETIM [5].

### **I.7.6 Les adhésifs phénoliques**

Ce type d'adhésif est un therm durcissable et est donc comme les époxydes rigides à rupture fragile.

Il a de très bonnes caractéristiques de durabilité, mais nécessite une attention rigoureuse lors de la mise en œuvre, en particulier en ce qui concerne la nécessité d'un apport de chaleur, et de l'application d'une pression. La pression appliquée doit être continuellement contrôlée et modifiée car une réduction de volume du joint est clairement identifiable lors de la polymérisation de l'adhésif. Pour pallier à leur caractère fragile, on peut les modifier en les copolymérisant avec des vinyloxydes, des néoprènes, des nitriles, ou des époxydes.

### **I.7.7 Les polyimides**

La caractéristique principale de la famille des polyimides, plus récente, concerne sa résistance sous haute température. Ils sont cependant plus difficiles à mettre en œuvre, et ont un comportement fragile, Kinloch [21]. On notera toutefois que certains des adhésifs polyimides conservent des propriétés mécaniques acceptables jusqu'à des températures de 300° C.

### **I.7.8 Les époxydes**

La classe des époxydes est de loin la plus utilisée. Il existe des formulations monocomposantes activables sous chaleur, ou bicomposants pour lesquelles l'apport de chaleur n'est pas forcément nécessaire. Ce type d'adhésif a une résistance en contrainte de cisaillement et de traction élevée. Ils sont également très rigides et ont un comportement à la rupture fragile (Tout ceci est vrai température ambiante ; à température élevée, leur comportement est différent).

Il semble que leur tenue en fatigue, à la température, et leur réaction face à des agents chimiques agressifs soient excellentes. La principale limitation à leur utilisation est leur faiblesse en pelage et en ductilité. Actuellement, de nombreuses formulations tentent de répondre à ce problème en associant à ce type de résine des produits plus souples. Un travail important est également conduit sur leur comportement en milieu humide et sur l'influence de cette humidité sur leur durabilité.

Dans CETIM[5], l'auteur distingue les avantages des résines époxy par rapport à chacune des autres familles structurales décrites ci-dessus :

- En comparaison des adhésifs phénoliques, les époxydes dégagent moins de produits volatils pendant la polymérisation, et peuvent polymériser à température ambiante.
- Les époxydes sont certes moins souples que les polyuréthanes, mais ils ont une meilleure stabilité thermique.
- La comparaison avec les adhésifs acryliques modifiés est cependant plus difficile. Les deux familles ont des propriétés proches, seul le coût avantage les résines époxy.
- Enfin, en comparaison des polyimides, les résines époxydes sont plus faciles à mettre en œuvre, ont un temps de polymérisation moindre, et sont moins coûteuses.

Pour les applications de type génie civil, la facilité de mise en œuvre des époxyds, leur coût plus faible que celui des autres résines, et leur stabilité relative dans le temps en font l'adhésif aujourd'hui le plus utilisé. Seuls des acryliques modifiés pourraient peut-être représenter une alternative à ce type de matériaux.

### **1.7.9 La transition vitreuse**

La transition vitreuse est un phénomène propre aux polymères amorphes, c'est-à-dire aux polymères dont les chaînes sont disposées au hasard, sans arrangement en réseau cristallin. Il existe une certaine température (différente pour chaque polymère), dite de transition vitreuse, notée  $T_g$ , telle qu'en dessous de celle-ci, le matériau est dit vitreux (à l'état solide) et présente un comportement de solide élastique, et telle qu'au-dessus, il présente un comportement de solide plastique (viscoélastique). En effet, la chaleur est l'énergie qui permet aux chaînes d'être plus ou moins mobiles et donc au matériau d'être plus ou moins visqueux. Plus particulièrement, la transition vitreuse est réversible et s'observe essentiellement sur les thermoplastiques, d'autant plus qu'ils sont peu réticulés (les chaînes sont alors plus mobiles les unes par rapport aux autres). Elle s'observe également chez les thermodurcissables (comme par exemple les résines époxydes), dont la densité de réticulation n'est pas trop élevée. Ce changement d'état s'accompagne toujours d'une variation importante des propriétés mécaniques (chute du module d'élasticité, par exemple). Par conséquent, une structure devra toujours être conçue avec des résines dont la température d'utilisation est nettement inférieure à la  $T_g$ .

Enfin, nous observons ce changement d'état sur une plage de température, nous ne pouvons donc pas a priori, parler de température de transition vitreuse mais plutôt de domaine de transition vitreuse, dans lequel nous prendrons une valeur moyenne qui correspondra alors à cette température de transition vitreuse. Par ailleurs, lors de la transition vitreuse d'un polymère amorphe à 100%, la capacité calorifique de ce polymère augmente ; de plus la quantité de chaleur augmente continûment à mesure que la température augmente contrairement à un polymère cristallin, pour lequel il faut attendre que tout le polymère atteigne la même température pour observer un quelconque changement, comme par exemple la fusion (Fig.1.10).

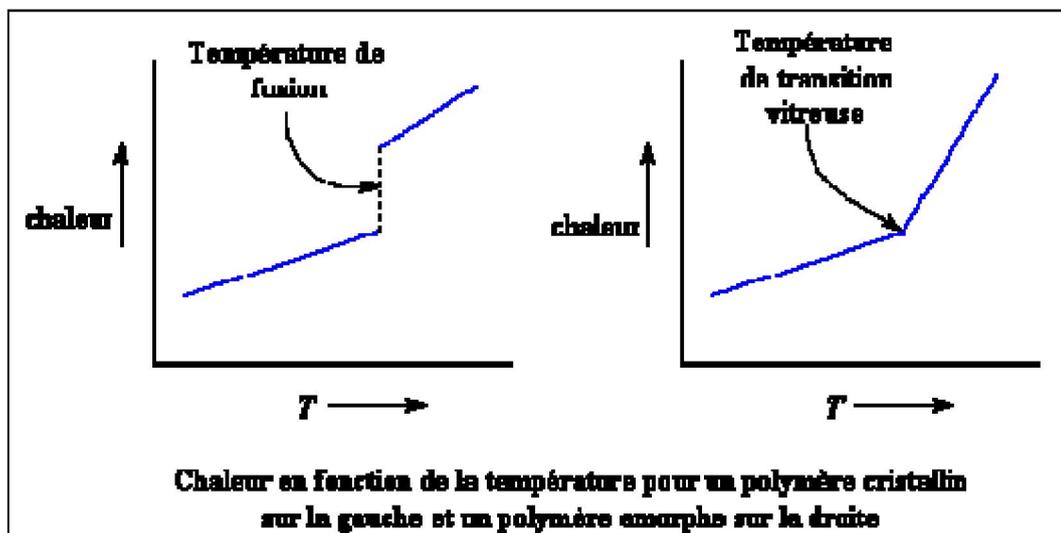


Figure I.10 Changement d'état : polymère cristallin et polymère amorphe

La transition vitreuse est un phénomène cinétique. Elle correspond à une plage de température telle que l'agitation thermique est suffisante, pour que les chaînes puissent se désolidariser les unes des autres. Sa caractéristique est de dépendre du temps (vitesse de sollicitation du matériau, temps de stockage, dynamique d'essai). La température de transition vitreuse obtenue par essai ne peut donc pas être considérée comme une caractéristique intrinsèque du matériau, à 1 ou 2 degré près ; par contre, elle est caractéristique de l'état du matériau lors de l'essai et des conditions d'essai.

La transition vitreuse dépend aussi de la température et du taux d'humidité dans la résine.

Les deux moyens couramment utilisés pour mesurer la température de transition vitreuse sont le DSC (Differential Scanning Calorimetry) et le DMA (Dynamic Mechanical Analysis).

Le DSC mesure la variation du flux thermique de l'échantillon lorsqu'il est soumis à une variation de température. Le DMA soumet l'échantillon à des sollicitations thermiques et dynamiques, afin de repérer la plage de température pour laquelle l'échantillon passe d'un comportement de solide élastique à celui d'un solide viscoélastique ; les essais DMA ne permettent pas d'obtenir exactement la température de transition vitreuse, puisque celle-ci correspond à un phénomène activé thermiquement et non thermomécaniquement.

### 1.7.10 Les charges

La majorité des fabricants de colle ajoutent aujourd'hui des charges dans leur formulation pour modifier les qualités de leurs produits. Il est important de noter que l'influence de ces charges sur le comportement mécanique des adhésifs est loin d'être négligeable, Kinloch [21]. Aujourd'hui, les colles sont d'ailleurs souvent formulées en fonction des applications visées, et le domaine de la formulation chimique de la colle est devenu un domaine d'expertise à part entière.

Dans Luhowiak et al. [22], une classification intéressante de ces charges est effectuée. On y

distingue trois catégories principales :

a) Les charges vulgaires : On y retrouve les carbonates (calcaire) et les silicates (talc et kaolin). Ces charges sont généralement "bon marché" et permettent de réduire le coût des résines.

On les utilise aussi pour améliorer les propriétés physico-chimiques des résines notamment en ce qui concerne leur viscosité. Elles diminuent cependant généralement les propriétés de résistance mécanique de celles-ci.

b) Les charges plastiques : Ces charges telles que le cuivre par exemple, peuvent se déformer pendant la microfissuration et contribuer ainsi à augmenter la tenue mécanique du matériau.

c) Les charges de renfort : Ce sont souvent des matériaux rigides du type alumine, oxyde de titane, et titane qui améliorent la résistance mécanique globale de l'assemblage.

## **I.8 Adhésifs employés en aéronautique :**

Les adhésifs employés dans le cas de liaisons métal/métal peuvent être divisés en deux catégories :

### **I.8.1 Les adhésifs réticulés à chaud**

Ils regroupent principalement des résines phénoliques ou époxydes monocomposants.

La réticulation à chaud des systèmes phénoliques se produit via une réaction de condensation libérant de l'eau. Dans le cas particulier d'une liaison métal/nida métallique, seuls les adhésifs époxydes monocomposants sont employés. Ces derniers étant très fluides aux températures proches de leur température de réticulation, ils sont caractérisés par une bonne aptitude à l'écoulement au sein du nida. Les deux principaux grades identifiés pour ce type d'application sont Hexcel Redux 308, 3M AF3109-24.

### **I.8.2 Les adhésifs réticulés à froid**

De nombreux adhésifs époxydes bi-composants ont été recensés, la gamme des ARALDITE® commercialisée par HUNSTMAN ; ADEKIT A140 par AXSON étant les plus connues. Toutefois, les grades Hysol-Dexter EA9330.1 et 3M SW9323 à température ambiante de la résine avec le catalyseur.

### **I.8.3 La préparation de surface**

La préparation de surface est une étape critique dans l'assemblage par collage. Elle a pour objectif d'éliminer les contaminants et les couches superficielles de faible cohésion (agents de démoulage des matières plastiques, composés de faible masse moléculaire, oxydes fragiles, résidus de corrosion, ...) qui influent sur les mécanismes de corrosion. Certains traitements permettent de modifier la chimie de surface afin d'augmenter la tension superficielle ou de favoriser la création de

liaisons chimiques avec l'adhésif. On distingue plusieurs couches de produits défavorables au collage (Figure I.10) que l'on cherche à éliminer [12]. Le choix du traitement de surface a une incidence capitale vis-à-vis du collage, aussi important que le choix de l'adhésif. L'application du traitement doit être facile à mettre en place et facile à contrôler, pour vérifier son efficacité. Dans cette partie nous nous intéresserons aux traitements de surfaces de l'aluminium et de ses alliages.

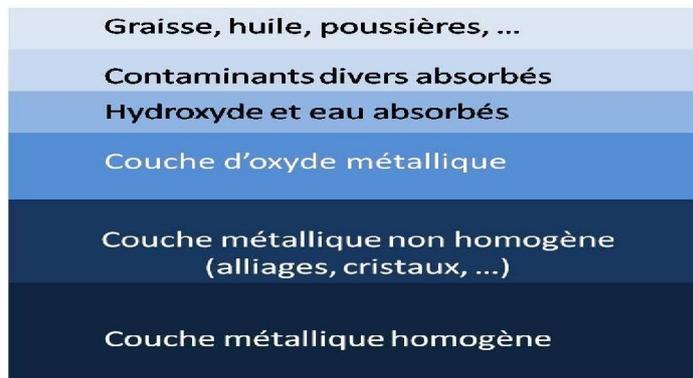


Figure I.10 Représentation de la surface d'un métal (Cognard, 2003)[12].

#### **I.8.4 Les traitements de surface employés en aéronautique**

Il est clairement admis que l'ancrage mécanique lié à la pénétration de la colle dans les aspérités du substrat permet d'augmenter le niveau d'adhérence. Toutefois afin d'optimiser cette adhésion mécanique, il est possible :

- d'augmenter la rugosité du substrat pour favoriser l'accrochage de l'adhésif,
- d'améliorer le mouillage du substrat par la colle,
- d'éliminer les couches de faible cohésion sur le substrat.

C'est pourquoi il est nécessaire dans la plupart des cas 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...).

#### **I.8.5 Les traitements mécaniques**

Ils consistent le plus souvent à faire subir une abrasion (traitement mécanique « léger ») ou une projection de particules (traitement mécanique « dur ») à la surface du substrat.

##### **a) 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 ou par les premières enductions de colle pour éviter qu'elle ne soit endommagée ou contaminée.

**b) L'abrasion**

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.

**I.8.6 Les traitements chimiques****a) Nettoyage par un solvant**

Il permet d'éliminer les contaminants macroscopiques comme les corps gras, les poussières,...

Le dégraissage peut se faire en application, en phase vapeur ou encore en immersion.

La MéthylEthylCétone (MEC) est le solvant organique le plus couramment employée notamment pour les substrats composites.

**b) Décapage chimique**

Il permet l'élimination des couches d'oxyde fragilisées, polluées ou peu actives qui se trouvent à la surface d'un substrat métallique. Il permet d'en reformer une autre avec des propriétés spécifiques à la solution acide utilisée. L'épaisseur de la nouvelle couche d'oxyde, ainsi que sa rugosité (à l'échelle du nm) en dépendent. Il existe une grande variété de solutions acides utilisées pour le décapage. Citons par exemple les acides sulfuriques, chlorhydriques, sulfochromiques, phosphoriques.... De nombreuses études ont montré qu'une attaque chimique du substrat métallique permet d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques des assemblages, surtout lorsque ceux-ci subissent un vieillissement. Une des traitements les plus efficaces semble être l'attaque sulfochromique.

**c) Traitement électrochimique**

En plus d'une attaque chimique, on peut pratiquer une anodisation du substrat. Une couche d'oxyde est ainsi formée, dont l'épaisseur varie suivant la solution d'anodisation (figure 14). Par exemple, pour l'aluminium, on peut citer l'acide chromique, l'acide sulfurique ou l'acide phosphorique. Le métal joue le rôle de l'anode, et l'oxygène réagit par échange ionique pour produire un film d'alumine. Une partie de ce film est dissoute par l'acide, ce qui crée des spores à la surface dans des structures géométriques particulières.

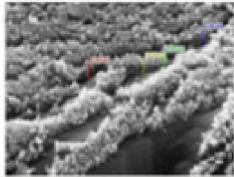
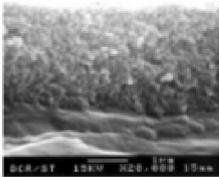
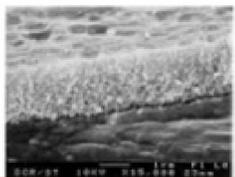
Anodisation	Phosphorique	Chromique	Borique
Température	23	40	60
Voltage	15-20	40	30
Densité de courant	1	0.5-1	1
Milieu	Acide	Acide/oxydant	Basique
2024 T3			

Figure I.11 Exemple de topographie d'un substrat Aluminium après anodisation électrochimique.

#### d) Primaires d'adhésion

Les fonctions d'un primaire sont :

- boucher les pores.
- remplir les irrégularités de surface.
- améliorer la mouillabilité.
- protéger la surface fraîchement lavée.
- diminuer la corrosion.
- s'adsorber à la surface pour empêcher l'adsorption d'eau.
- renforcer les liaisons interfaciales créant des liaisons chimiques fortes entre la surface métallique et l'adhésif. Il s'agit de solutions de polymères ou de résines+durcisseur diluées, non aqueuses en général, auxquelles sont ajoutées différents additifs. Parfois l'additif dilué est utilisé comme primaire.

Ils utilisent la propriété qu'ont les polymères en solution diluée de s'adsorber aux surfaces en incluant dans la couche absorbée des éléments de la solution.

Il se forme ainsi un mince film qui recouvre la surface, déplace plus ou moins la couche atmosphérique et préserve l'état de propreté. Un dépôt trop épais nuit à l'adhérence. L'action du primaire est spécifique aux substrats. De nombreuses études ont montré l'amélioration des propriétés mécaniques des assemblages dont les substrats ont été traités avec des primaires [23][24]. les molécules de ce film primaire directement en contact avec la surface métallique sont chimisorbées, forment des liaisons hydrogène ou bien des liaisons covalentes se créent[25].

Du côté de l'adhésif, les groupements époxy du primaire se combinent par copolymérisation avec les éléments amines du durcisseur. Il peut y avoir aussi interpénétration des chaînes polymères du primaire et de l'adhésif. Le traitement primaire permet d'avoir ainsi des liaisons fortes, les liaisons

covalentes, à toutes les interfaces de l'assemblage, assurant un maximum de résistance à la rupture. L'épaisseur du film primaire est variable et irrégulière, de quelques nm à 50  $\mu\text{m}$  environ. Elle est en fait constituée d'organosilane réticulé, d'oligomères physisorbés [26][24].

Les domaines physisorbés altèrent probablement l'adhésion. Le temps d'immersion des substrats dans la solution de silane semble aussi avoir une influence sur les propriétés finales de l'assemblage. En outre, l'étape de rinçage réduit l'épaisseur du film primaire en éliminant les oligomères peu ou pas accrochés à la surface. Par ailleurs, plusieurs études ont montré l'influence du taux de silane en solution sur les performances du primaire. Il semble que le taux donnant les meilleures performances se situe entre 1 et 5% pour les silanes les plus utilisés.

## CHAPITRE II

# Analyses analytiques des contraintes dans les assemblages collés

### **II.1. Caractérisation des assemblages collés**

#### **II.1.1. Procédés destructifs de contrôle des assemblages collés**

Même si ces méthodes permettent d'identifier des paramètres pouvant affecter la résistance intrinsèque de l'assemblage, les essais de contrôle les plus usités restent les essais de séparation des substrats. Avec le choix du test s'impose en réalité la nature des contraintes mises en jeu. On peut imposer à un joint de colle les sollicitations suivantes :

- 1-des contraintes normales au plan du joint (traction, compression),
- 2-des contraintes tangentielles au plan du joint (cisaillement),
- 3-des contraintes de pelage lorsque au moins l'un des matériaux est souple,
- 4-des contraintes de clivage qui résultent de l'application de la force à l'extrémité d'un assemblage de matériaux rigides.

Dans la réalisation d'un joint, on a vu qu'il est conseillé d'avoir une concentration de contraintes minimale et donc de répartir les charges imposées sur toute la surface du joint. Il est également préférable de favoriser les contraintes en compression ou en cisaillement et d'éviter autant que possible les contraintes de traction, de clivage ou de pelage. Les essais existants pour tester un joint adhésif sont nombreux, complexes et généralement adaptés à des applications spécifiques. Des normes [28, 29] sont disponibles dans un grand nombre de domaines et présentent l'avantage de définir un processus expérimental complet (préparation, mise en œuvre...) et de permettre la comparaison des résultats concernant les produits provenant de différents fabricants. Cependant, les résultats donnés par de tels essais s'avèrent bien souvent insuffisants pour une détermination des caractéristiques mécaniques de l'assemblage. Le but de tels essais est d'obtenir des résultats reproductibles et comparables d'une campagne d'essais à l'autre afin de pouvoir jauger divers produits équitablement.

Cependant, ces essais ne permettent bien souvent que d'accéder à la force moyenne à rupture de l'assemblage et à certaines grandeurs statistiques sur le type de rupture observé.

##### **II.1.1.1. Essais normalisés sur joints collés**

La première partie décrit les principaux essais classiques réalisés sur joints collés. La liste n'est pas exhaustive, mais permet d'avoir une vue d'ensemble des essais disponibles aujourd'hui, et de leurs caractéristiques. On notera que pour chacun des quatre modes de sollicitations exposés précédemment, i.e., cisaillement, traction, pelage et clivage, il existe plusieurs méthodes d'essais plus ou moins facile à mettre en œuvre. Plus récemment, la mécanique de la rupture a ouvert de nouvelles perspectives aux essais sur joints collés en s'intéressant à la fissuration de ceux-ci.

La seconde partie sera dédiée à la description des bases de cette mécanique et des différents essais

utilisés sur les joints collés et exploités selon cette méthode. On remarquera que certains points concernant le collage et qui n'avaient pas pu être expliqués par la mécanique classique, ont trouvé des réponses après l'utilisation de cette nouvelle approche.

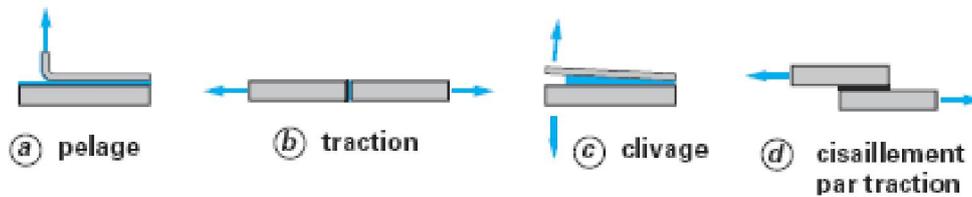


Figure II.1 Tests mécaniques usuels d'assemblages collés

### **II.1.1.2 Essais relevant de la mécanique classique**

Nous ne décrivons pas ici de manière précise tous les essais disponibles. Le but de ce paragraphe est seulement de donner un aperçu des essais développés, et de tenter de relever les avantages de chacun. Dans le cadre de la mécanique classique, conformément aux quatre modes de sollicitation (Cisaillement, pelage, clivage et traction).

#### **a) Essais de Cisaillement**

Il existe aussi d'autres essais dont on retiendra les deux essais principaux suivants :

1 - L'essai de traction-cisaillement sur joint à simple recouvrement (NF-EN 1465, ISO 4587).

Celui-ci est proche de l'essai de type "Thick Adherend Shear Test", mais il n'induit pas l'utilisation d'adhérents raides, et les efforts ne sont pas forcément alignés bien que ceci soit préférable pour limiter la production d'arrachement,

2 - L'essai de traction-cisaillement sur joint à double recouvrement. Cet essai est utilisé à la place du simple recouvrement pour réduire l'excentricité du chargement et donc diminuer l'effort de flexion,

3 - L'essai de compression-cisaillement sur joint à simple ou double recouvrement pour lequel le sens de sollicitation est inverse.

Le principal avantage de ces essais effectués sur joints à recouvrement réside dans leur facilité de mise en œuvre. Bien entendu, à cause des phénomènes de concentration de contrainte ou effets de bords qu'ils entraînent et qui seront abordés par la suite, ils ne permettent pas de caractériser l'adhésif, mais seulement le fonctionnement du joint collé.

#### **b) Essais de traction**

Le seul essai disponible et répertorié est la traction de cylindres collés bout à bout décrit dans 1.4.3 ("Butt Joint") (NF-EN 26922, ISO 6922).

### **c) Essais de pelage**

Les principaux essais de pelage que l'on peut rencontrer sont les suivants.

En fait, un des paramètres importants de ce type d'essai et qui constitue la principale différence entre ceux présentés ici est l'angle de pelage. Dans CETIM (2006), il est noté que la sollicitation est nommée pelage dans le cas d'angles importants (supérieurs à 30 degrés), et clivage sinon.

- Pelage en T (NF-EN 14173),
- Pelage à 180 degrés (NF-EN 28510-2, ISO 8510-2),
- Pelage à 90 degrés (NF-EN 28510-1, ISO 8510-1),
- Pelage au tambour grim pant (ASTM D 1781),
- Pelage au rouleau (NF-EN 1464, ISO 4578).

On retiendra que, pour le moment, il est difficile de corrél er les résultats de ces différents essais de clivage, et que ceux-ci sont donc principalement qualitatifs. Ils sont cependant couramment utilisés et permettent des investigations comparatives.

### **d) Essais de clivage**

Les essais de clivage impliquent l'utilisation d'adhérents identiques, ou tout du moins ayant une rigidité proche. Deux principaux essais sont utilisés :

- Essai de clivage simple (ASTM D 3433),
- Essai de coin (NF-EN 14444, ISO 10354).

Ce type d'essai est tout comme le pelage difficile à exploiter quantitativement en utilisant les bases de la mécanique classique. Le second essai développé dans le domaine de l'aéronautique est cependant désormais classiquement adopté pour l'étude de propagation de fissures et ses résultats sont traités selon la mécanique de la rupture.

### **II.1.1.3 Essais relevant de la mécanique de la rupture**

Selon la théorie de la mécanique de la rupture, il existe 3 modes de rupture principaux dénotés mode I, mode II, et mode III et que l'on pourrait associer respectivement à une sollicitation de pelage, de cisaillement longitudinal, et de cisaillement transverse. Pour chacun de ces modes, des essais de caractérisation de l'énergie de fissuration ont été développées. On ne retiendra ici que les essais se rapportant aux modes I et II qui sont rencontrés plus couramment dans le cas des joints collés. Une partie de ces essais est décrite ci-dessous, on pourra se reporter Kinloch8 [21] pour obtenir davantage d'informations. L'objectif de tous ces essais est de pouvoir déterminer la propagation de fissures en fonction de l'énergie apportée au système.

### **a) Essais de caractérisation en mode I**

Les essais de caractérisation en mode I se rapportent aux essais en arrachement du joint de colle.

- **Essai de coin** : cet essai est très utilisé dans le cadre d'études de durabilité plus particulièrement.
- **Double Cantilever Beam, DCB (ASTM D 3433)** : cet essai a du subir des améliorations pour éviter que l'énergie apportée au système soit dépendante de la géométrie. Pour ce faire, deux variantes existent, le tapered double cantilever beam, et le width-tapered cantilever beam pour lesquels une évolution des épaisseurs permet d'obtenir à effort constant une énergie constante.
- Blister test : cet essai a été développé pour étudier le cloquage et a depuis été utilisé dans des investigations de durabilité [30].

### **b) Essais de caractérisation en mode II**

Les essais en mode II se rapportent à une sollicitation de type cisaillement.

- End Notch Flexure test, ENF : cet essai est le plus utilisé pour la caractérisation en mode II des joints collés.

Bien entendu, il existe également des essais de caractérisation en mode mixte permettant de caractériser l'évolution des fissures lorsque les deux sollicitations sont présentes. Ces essais n'étant pas utilisés dans cette étude, ils ne seront pas décrits plus longuement mais on notera qu'ils constituent une piste de réflexion intéressante particulièrement dans le cadre d'étude de durabilité.

### **II.1.2 Contrôle non-destructif**

Les contrôles non-destructifs rassemblent l'ensemble des techniques permettant de tester un assemblage collé sans le détruire, d'évaluer son aptitude au bon fonctionnement sans altérer sa tenue de service. L'assemblage peut être sollicité par un rayonnement électromagnétique, une vibration mécanique, une sollicitation mécanique ou un champ magnétique. La présence de défauts génère alors des perturbations qui sont révélées par des capteurs. La plupart des méthodes détectent des défauts surfaciques ou débouchant en surface. Moins nombreuses sont celles qui détectent les défauts en volume, cas des ultrasons et des rayonnements ionisants.

Le secteur aéronautique reste l'utilisateur le plus important. Toutes les techniques sont employées à un stade ou à un autre, suivant le degré de criticité des composants. Concernant les défauts de collage tels que l'absence de colle, des défauts d'adhésion ou une fissuration de la colle au sein de joints de recouvrements par exemple, les ultrasons et la thermographie infrarouge sont les deux techniques les plus couramment employées. Concernant les contrôles par ultrasons, une nouvelle technique à couplage d'air permet le contrôle sans le recours habituel aux liquides ou aux gels de couplage entre le transducteur d'ultrasons et l'éprouvette.

### **II.2 Théories élastiques**

#### **II.2.1 Généralités**

Au vu du sujet de notre thèse, il a été décidé de s'intéresser uniquement aux joints fonctionnant en cisaillement à simple recouvrement. Comme dit précédemment, c'est l'essai le plus utilisé actuellement car il est proche des conditions de fonctionnement en service de la plupart des joints collés, et qu'il est simple à mettre en œuvre. Cependant, il est important de savoir que l'exploitation de ce type d'essai est beaucoup moins simple qu'il n'y paraît au premier abord dans le cas d'un collage rigide.

En effet, la technique de calcul encore utilisée dans certains guides de recommandations et qui consiste à considérer une contrainte de cisaillement constante pour déterminer la capacité d'un joint collé en cisaillement n'est clairement pas adaptée au cas de colles rigides. Dans ce cas (qui concerne les joints les plus résistants, et donc le collage structural), il existe des phénomènes de concentrations de contrainte.

Nous allons ci-après lister les principales théories utilisées aujourd'hui pour la détermination des profils de contrainte dans les joints collés. La liste des méthodes n'est bien entendu pas exhaustive, et il a été décidé de ne citer que les méthodes présentant un intérêt pour expliquer certains aspects phénoménologiques du collage. Dans le cas des méthodes analytiques, il existe de nombreuses autres approches qui concernent des joints de géométrie différente, ou des méthodes d'ordre de précision plus important. Pour les modélisations éléments finis, de nombreux travaux ont été réalisés, et tous ne pourront pas être cités ici.

#### **II.2.2 Modèles analytiques**

Les méthodes analytiques de détermination des contraintes se justifient pour plusieurs raisons. Elles peuvent tout d'abord s'imposer par manque d'outils de calcul. Utilisées dans des cas simples, elles permettent aussi de valider des modèles de détermination des contraintes sophistiqués. En homogénéisant les caractéristiques des substrats de joints collés de matériaux composites, ces méthodes donnent également la possibilité d'estimer, avec plus ou moins de précision, le niveau de contrainte auquel est soumis l'adhésif. Ce cas d'application, fréquent pour des études de pré-dimensionnement, est loin d'être négligeable. La caractéristique commune aux nombreux modèles analytiques est la simplicité de leurs hypothèses. Il en découle, comme nous allons le voir, une description plus ou moins précise et réaliste de l'état de contrainte recherché. La majorité des études analytiques classiques choisissent une approche bidimensionnelle de l'état de contraintes, pour des raisons évidentes de simplicité.

Cette approche peut présenter des limitations, notamment dans le cas des substrats composites. Une autre hypothèse fréquente suppose qu'il n'y a pas de variation des contraintes dans l'épaisseur ni dans la largeur de la couche d'adhésif. Cette hypothèse est fondée sur la très faible épaisseur de cette couche devant celle des substrats.

La seule variation des contraintes considérée est suivant l'axe longitudinal (axe de chargement).

L'état de contrainte supposé dans l'adhésif se résume donc le plus souvent aux composantes suivantes (Figure II-2) :

- la contrainte de cisaillement,  $\sigma_{xy}$
- la contrainte normale, dite de pelage,  $\sigma_{yy}$
- et parfois la contrainte longitudinale,  $\sigma_{xx}$

La dernière composante citée est dans les faits souvent négligée. Cette simplification se justifie par la grande différence de module d'Young entre l'adhésif et les substrats ( $E_s \gg E_a$ ), qui entraîne de très faibles contraintes longitudinales dans l'adhésif.

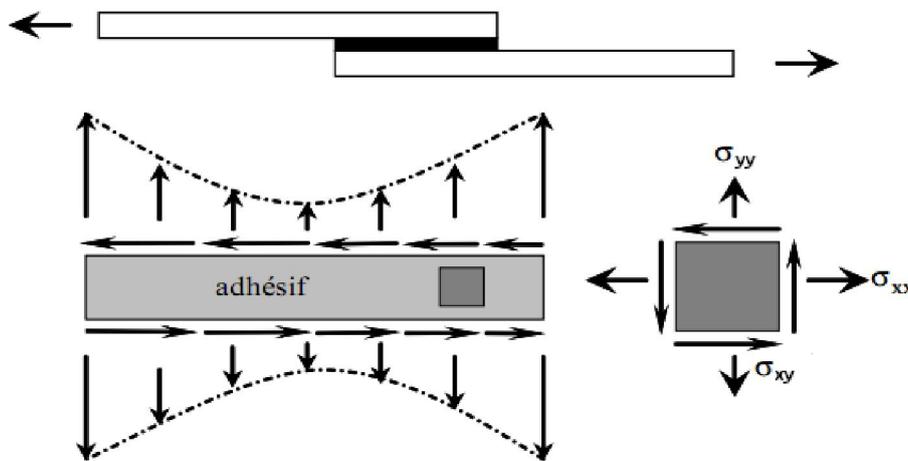


Figure II.2 Contraintes dans l'adhésif

On citera tout d'abord la plus simple des formules de dimensionnement, qui n'est pas réaliste mais qui est largement employée pour des estimations rapides, et qui est retenue dans un certain nombre de normes. Elle consiste à évaluer la contrainte moyenne de cisaillement dans l'adhésif, en considérant les substrats comme parfaitement rigides.

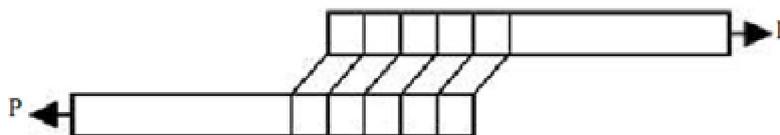


Figure II.3 Déformations de l'adhésif avec des substrats rigides

$\tau = \frac{P}{bL}$  ; P étant l'effort à transmettre, b et L respectivement la largeur et la longueur de la couche de colle.

**II.2.3 Analyse uniaxiale de Volkersen**

Dans ces analyses, seules les contraintes de cisaillement dans l'adhésif et les efforts longitudinaux (sens des x) dans les substrats sont prises en compte. L'adhésif est modélisé par une infinité de ressorts travaillant en cisaillement. Les substrats sont considérés comme travaillant en contraintes planes.

Volkersen a introduit en 1938[31] dans l'analyse de contrainte dans un joint à simple recouvrement une formulation qui suppose que l'adhésif ne se déforme qu'en cisaillement. Les substrats sont traités comme un matériau élastique et isotrope ne se déformant qu'en tension. La contrainte de traction dans les substrats est maximale au point A et nulle au point B (Figure II.4). La contrainte de cisaillement dans l'adhésif n'est plus uniforme mais maximale aux deux extrémités de la couche de colle et minimale au milieu (Figure II.5).

Il obtient la répartition suivante pour une jonction équilibrée (Figure II.5) :

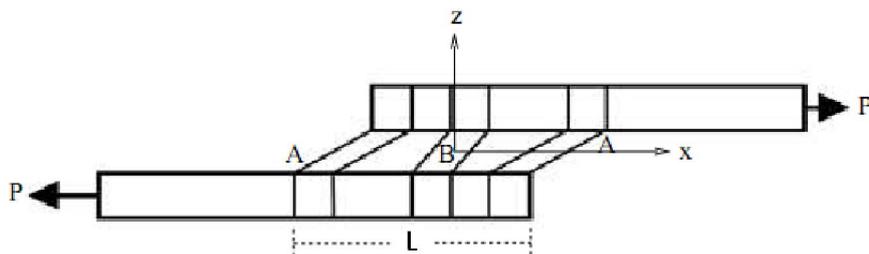


Figure II.4 Déformations de l'adhésif et du substrat, hypothèses de Volkersen [31]

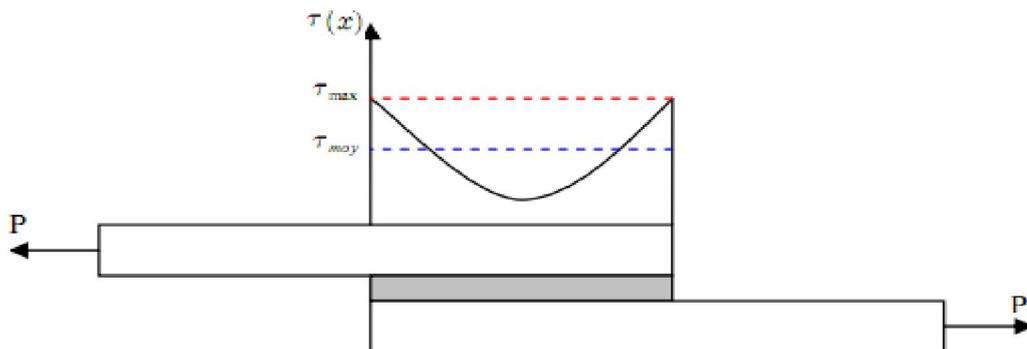


Figure II.5 Répartition des contraintes de cisaillement dans le joint à simple recouvrement (Volkersen, 1938).

Cette contrainte de cisaillement a pour valeur maximale, lorsque les substrats sont de même épaisseur :

$$\tau = G_c \gamma \tag{II-1}$$

$$\tau(x) = \frac{0.5 \eta_V}{b} \cdot \frac{\cosh(\eta_V(0.5L-x))}{\sinh(0.5\eta_V L)} p \tag{II-2}$$

$$\eta_V = \sqrt{\frac{2G_c}{e_a e_s E_s}}$$

$$\tau_{moy} = \frac{P}{b \cdot L} \tag{II-3}$$

Il montre alors que la contrainte de cisaillement est maximale au bord du joint et minimale au centre (Figure II-5).

En notant  $\tau_{moy}$ , la contrainte de cisaillement moyenne appliquée, la contrainte maximale

$\tau_{max}$  s'écrit :

$$\tau_{max} = \frac{\eta_V L}{2 \tanh(0.5 \eta_V L)} \tau_{moy}$$

Avec  $p$  : charge appliquée

$L$  : longueur de recouvrement

$b$  : largeur du joint

$\tau$  : contrainte de cisaillement de l'adhésif

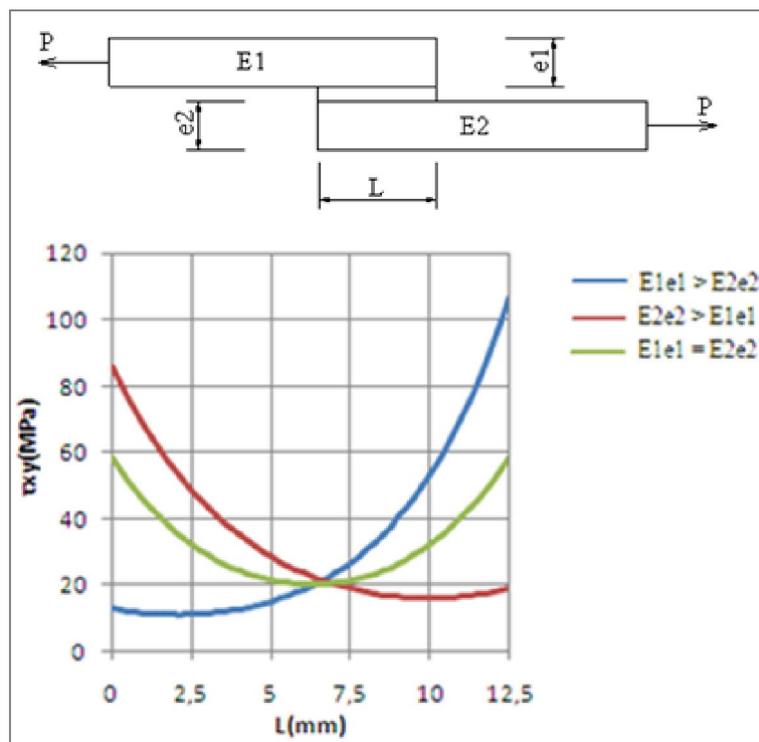


Figure II.6 Répartition des contraintes de cisaillement en fonction de la rigidité des adhérents selon la théorie de Volkersen.

D'un point de vue mécanique, cette formulation ne décrit pas correctement les conditions aux limites et de chargement auxquelles un joint à simple recouvrement est soumis. Ainsi, un désalignement des forces de traction dû à la géométrie particulière de l'éprouvette induit un moment de flexion dans chacun des substrats. En effet, au début de la phase de chargement d'une éprouvette, les forces de traction ne sont pas colinéaires. Il en résulte un moment de flexion dans chacun des substrats, provoquant leur courbure. A chargement croissant, ces courbures s'accroissent, rapprochant la ligne d'action des forces de traction de la ligne neutre des substrats, réduisant par conséquent le moment de flexion. La formule de Volkersen est pour cette raison plus adaptée aux joints à double recouvrement, dans lesquels le flux d'effort est centré.

### **II.2.4 Analyses élastiques biaxiales**

Les analyses suivantes sont présentées de manière progressive au niveau de leur complexité et illustrent les travaux existants qui prennent en compte la flexion des substrats due à l'excentricité de chargement, par l'introduction d'un moment de flexion en bord de joint  $M_0$  (Figure II.7). 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.

#### **II.2.4.1 Analyse de Goland et Reissner**

Goland et Reissner, dans [32], tiennent compte du moment de flexion dans leur analyse, et raisonnent alors dans le cadre des plaques en flexion cylindrique. Ils supposent l'adhésif et les substrats parfaitement élastiques. Ils supposent la profondeur grande devant les épaisseurs des substrats, de sorte qu'ils considèrent un problème de déformations planes.

Ils supposent de plus que la contrainte normale dans la direction  $x$  (Figure II.7) dans la colle est négligeable et que  $T$  dans la colle ne varie pas dans l'épaisseur. Ils procèdent en deux étapes ; ils déterminent premièrement la répartition du chargement sur la section rectangulaire du joint puis dans un second temps ils déterminent 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, soit

$$\text{la relation } \frac{e}{E} \ll \frac{e_1}{E_1}$$

- La couche de colle est fine et ses déformations ne sont pas négligeables, soit

la Relation  $\frac{e}{E} \gg \frac{e_1}{E_1}$  ; c'est ce cas qui s'applique aux assemblages métal/colle/métal.

Ils définissent un facteur de moment fléchissant  $k_{GR}$  et un facteur de force  $k'$  qui relient respectivement le moment de flexion  $M_0$  et l'effort tranchant  $V_0$  en fin de recouvrement, à la charge de traction appliquée à l'assemblage, équilibré ici, afin de tenir compte de la flexibilité des substrats et de l'adhésif.

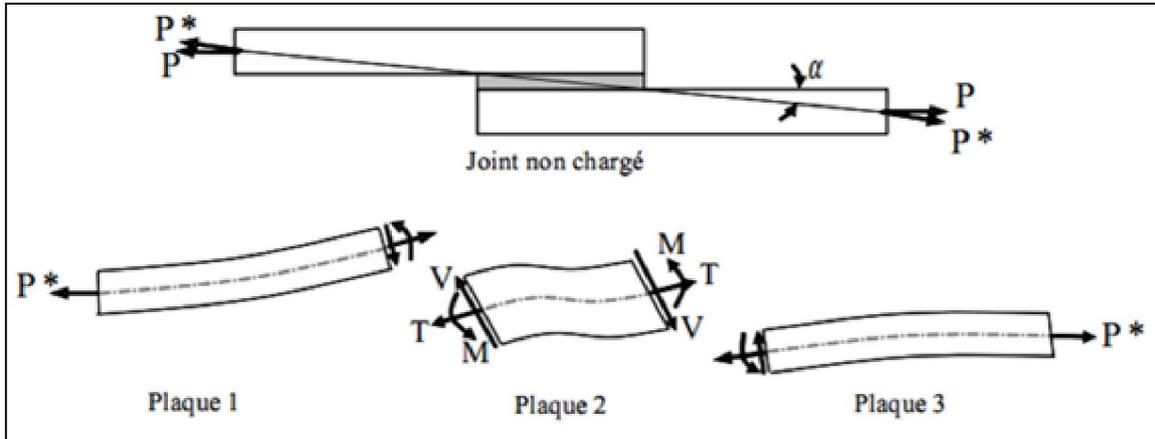


Figure II.7 Modélisation mécanique d'un joint à simple recouvrement, d'après Goland & Reissner [32]

$$M_0 = 0.5k_{GR}e_1 P \quad \text{II-4}$$

$$V_0 = k_{GR}f \sqrt{3(1-\nu_1^2)} \frac{f}{E_1 e_1 b} = 2k' \frac{e_1}{L} P \quad \text{II-5}$$

Où Ils obtiennent ainsi dans le second cas limite :

$$\tau(x) = -\frac{1}{4bL} \left[ (1 + 3k) \frac{\beta L}{2e_1} \frac{\cosh\left(\frac{\beta x}{e_1}\right)}{\sinh\left(0.5 \frac{\beta L}{e_1}\right)} + 3(1 - k_{GR}) \right] P \quad \text{Où} \quad \beta^2 = 8 \frac{G}{E_1} \frac{e_1}{e} \quad \text{II-6}$$

Et

$$\sigma(x) = \frac{e_1}{4L^2 b \Delta} \left[ (0.5R_2 \lambda^2 k_{GR} + \lambda k' \cosh(\lambda) \cos(\lambda)) \cosh\left(\lambda \frac{2x}{L}\right) \cos\left(\lambda \frac{2x}{L}\right) + (0.5R_1 \lambda^2 k_{GR} + \lambda k' \sinh(\lambda) \sin(\lambda)) \sinh\left(\lambda \frac{2x}{L}\right) \sin\left(\lambda \frac{2x}{L}\right) \right] P \quad \text{II-7}$$

$$\text{Où} \quad \lambda = \gamma \frac{L}{2e_1} ; \quad \gamma^4 = 6 \frac{E}{E_1} \frac{e_1}{e}$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda)$$

$$R_2 = \sinh(\lambda) \cos(\lambda) - \cosh(\lambda) \sin(\lambda)$$

$$\Delta = 0.5(\sinh(2\lambda) + \sin(2\lambda))$$

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

$$\tau_{\max} = \left( \frac{1 + 3k_{GR}}{4} \eta_V L \coth(\eta L) + \frac{3(1-k)}{4} \right) \tau_{\text{moy}} \quad (\text{car : } \beta = 2e_1 \eta_V)$$

et

$$\sigma_{\max} = \frac{e_1}{bL^2 \Delta} (0.5 \lambda^2 k_{GR} (\sinh(2\lambda) - \sin(2\lambda)) - \lambda k' (\cosh(2\lambda) + \cos(2\lambda)))$$

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.

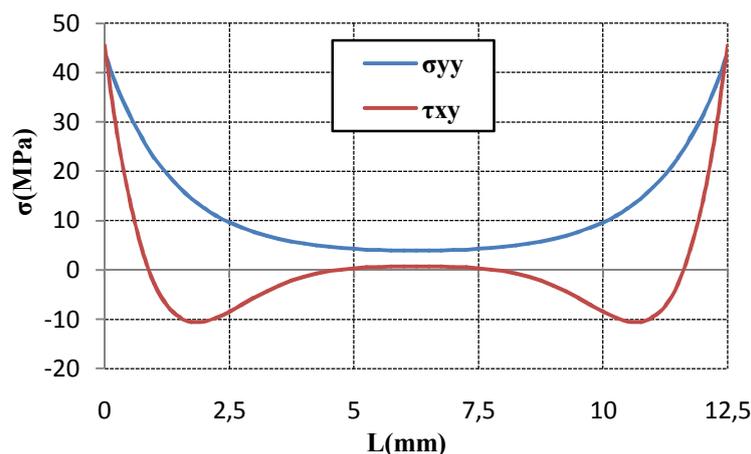


Figure II.8 Répartition des contraintes dans le joint de colle selon Goland et Reissner.

#### **II.2.4.2 Analyse de Hart-Smith**

À la suite de premiers travaux consacrés aux joints collés à double recouvrement, Hart-Smith [33] s'est également penché sur le problème de la détermination des contraintes dans les joints à simple recouvrement.

Afin d'améliorer la description des efforts dans les substrats et de donner ainsi un état plus réaliste des sollicitations agissant sur la couche d'adhésif, Hart-Smith propose un nouveau découpage de la zone de recouvrement. La Figure II-9 montre le détail apporté à la modélisation de la partie recouvrement, en comparaison du modèle de Goland & Reissner [32] représenté Figure II-7. Hart-Smith traite la partie recouvrement comme deux plaques découplées encadrant la couche d'adhésif. La prise en compte de la couche d'adhésif lui permet alors de donner une nouvelle représentation des efforts de section et de formuler une nouvelle expression du facteur  $k$ , plus réaliste.

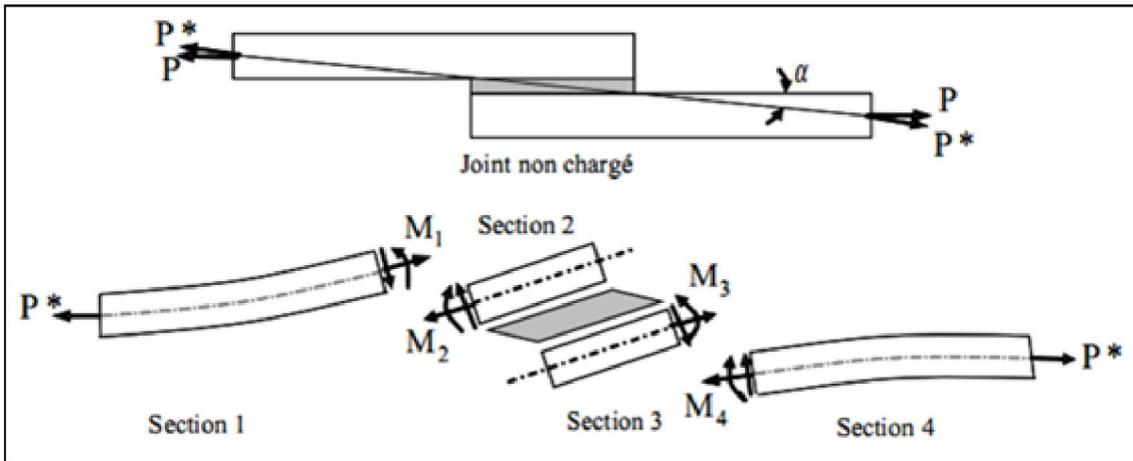


Figure II.9 Modélisation mécanique d'un joint à simple recouvrement, d'après Hart-Smith [33]

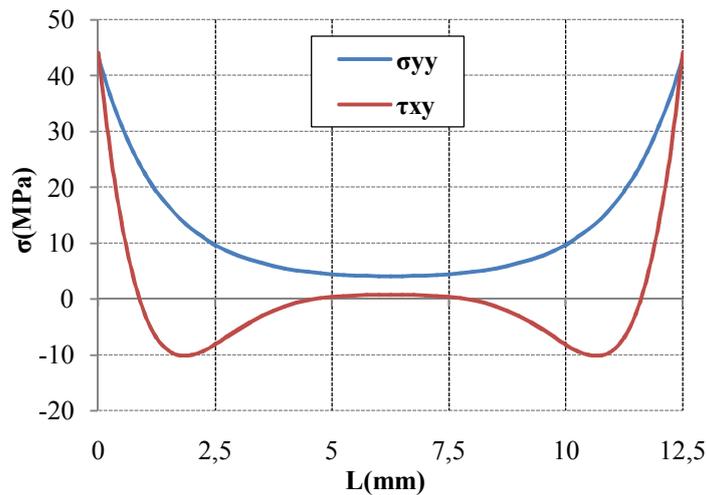


Fig. II.10 Répartition des contraintes dans le joint de colle selon Hart-Smith.

### II.3 Analyse élastoplastique biaxiale de Hart-Smith

De plus, Hart-Smith s'intéresse au comportement non linéaire de l'adhésif : il a développé une approche élastique-plastique parfait (Figure II.11).

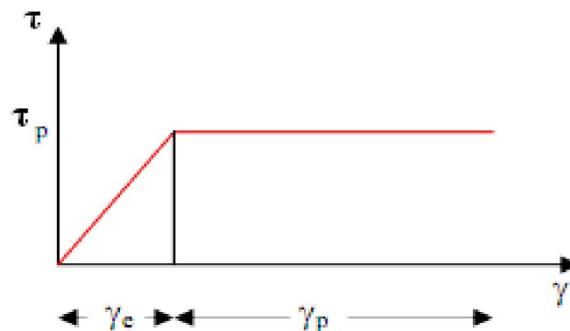


Fig. II.11 Matériau dont le comportement est élastique parfaitement plastique.

La démarche consiste à supposer l'existence d'une longueur (L-d) sur laquelle la colle plastifie, soit

dans le cas d'une jonction équilibrée,  $0.5(L-d)$  à chaque bord (figure II.12). Dans le cas des jonctions en double cisaillement [33], il part de l'analyse de Volkersen (les phénomènes de flexion pouvant être négligés). La jonction peut être déséquilibrée. La prise en compte de la plasticité permet de faire coïncider expérience et théorie. L'auteur 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, la longueur des zones aux extrémités de la jonction ne dépend plus de la longueur de recouvrement.

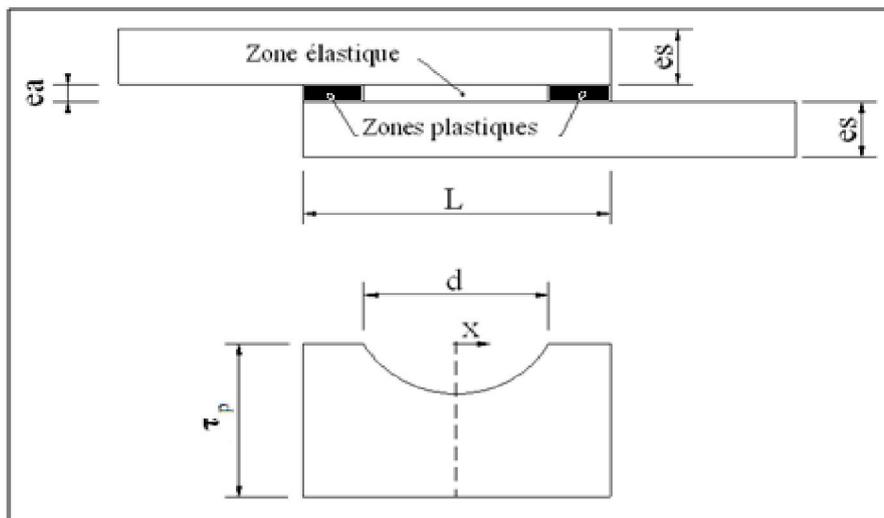


Figure II.12 Zones considérées par Hart-Smith

Il obtient alors :

$$\tau_{\text{moy}} = \left[ \left( 1 - \frac{d}{L} \right) + \frac{\tanh(0.5\eta_{HS}d)}{0.5\eta_{HS}L} \right] \tau_p \quad \text{II-8}$$

Où :

$$\eta_{HS} = \sqrt{\frac{G}{e} \left( \frac{1}{e_1 E_1} + \frac{1}{e_2 E_2} \right)}$$

Et :

$$\left[ 0.5\eta_{HS}(L-d) + \tanh(0.5\eta_{HS}d) \right]^2 = \tanh^2(0.5\eta_{HS}d) + 2 \frac{\gamma_p}{\gamma_e}$$

Ces deux équations peuvent être résolues numériquement. En faisant l'hypothèse d'un long recouvrement, il vient :

$$(L - d) = \frac{2}{\eta_{HS}} \sqrt{\tau_p e^{\left(\frac{\gamma_e}{2} + \gamma_p\right)}} \quad \text{II-9}$$

Exemple de courbe obtenue en utilisant les calculs analytiques de Hart-Smith d'un JSR symétrique en adhérents d'Aluminium 2024-T3 d'épaisseur  $e_s=1.5\text{mm}$ , de largeur  $b=25\text{mm}$  et en adhésif ADEKIT A140 d'épaisseur  $e_a=0.2\text{mm}$  et de longueur de recouvrement  $12.5\text{mm}$ .

Chargement  $p = 20\text{MPa}$

**Propriétés mécaniques :**

	E(MPa)	$\nu$	Rm(MPa)	Tp(Mpa)
2024-T3	68800	0.33	496	/
ADEKIT A140	2690	0.3	31.41	18.13

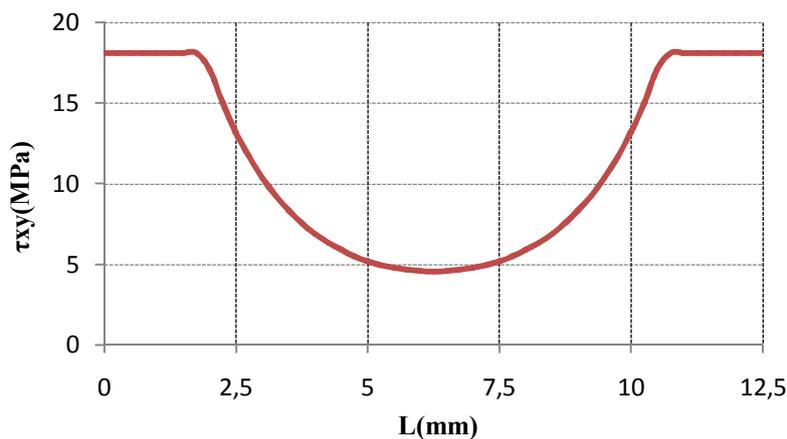


Figure II.13 Courbe élastoplastique - Hart-Smith

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 :

$$(0.5\eta_{HS}L)_{\text{transition}} = \sqrt{2 \frac{\gamma_p}{\gamma_e}} \quad \text{II-10}$$

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  $\gamma_p \equiv 0$ ) , il apparaît  $T_{\text{moy}}(0.5\eta_{HS}L) \rightarrow T_p$ , ce qui est la solution de Volkersen (puisque  $\eta_{HS}L \gg 1$ ) ;
- dans le cas totalement plastique ( $0.5\eta_{HS}L \rightarrow 0$ ),  $T_0 \rightarrow T_p$

Dans le cas des jonctions en simple cisaillement [33] dans le cadre de la flexion cylindrique, il faut rajouter l'effet de l'excentricité de chargement. Il part alors de l'analyse de Goland et Reissner, en tenant compte, en plus, des effets géométriques de l'épaisseur de la colle dans l'expression du facteur  $k$  de moment fléchissant  $M$  :

$$M = 0.5k_{HS}e_1 \left(1 + \frac{e}{e_1}\right) f = 0.5k_{HS}(e + e_1)P \quad \text{II-11}$$

Hart-Smith note que le moment appliqué en bord de joint et calculé à l'aide du facteur k défini par Goland et Reissner, n'est strictement applicable que dans le cas de chargements légers et de petites longueurs de recouvrement, et, considère alors les substrats indépendamment et non en un seul bloc comme le font Goland et Reissner.

$$k_{HS} \approx \frac{1}{1 + \zeta \frac{L}{2} + \zeta^2 \frac{L^2}{24}} \quad \text{II-12}$$

$$\text{Où } \zeta = \sqrt{\frac{P}{D}}$$

Dans la configuration d'un adhésif entièrement élastique, il obtient alors (cas équilibré) :

en notant D la rigidité de flexion des substrats. II-14 II-15 II-13

L'excentricité de chargement domine le comportement de la jonction en simple recouvrement.

La longueur de recouvrement a ici, contrairement au cas du double recouvrement, une influence importante sur la résistance de la jonction.

Comme dans le cas précédent les zones en bord de joint assurent la plus grande part du transfert ; cependant pour de longs recouvrements, la zone intermédiaire est plus efficace que pour le double recouvrement. La contrainte de cisaillement s'écrit :

$$\tau(x) = A_a \cosh\left(2\lambda' \left(x - \frac{L}{2}\right)\right) + C_a \quad \text{II-13}$$

Où :

$$C_a = \frac{f}{bL} - \frac{A_a}{\lambda'L} \sinh(L\lambda') \quad ; \quad A_a = \frac{\lambda'}{b \sinh(\lambda'L)} \frac{1 + 3\left(1 + \frac{e}{e_1}\right)k_{HS}}{1 + 3\left(1 + \frac{e}{e_1}\right)f} \quad ; \quad \lambda' = \frac{\eta_{HS}}{2} \sqrt{1 + 3\left(1 + \frac{e}{e_1}\right)}$$

La contrainte de pelage s'écrit :

$$\sigma(x) = A_b \cosh\left(\sigma \left(x - \frac{L}{2}\right)\right) \cos\left(\sigma \left(x - \frac{L}{2}\right)\right) + B_b \sinh\left(\sigma \left(x - \frac{L}{2}\right)\right) \sin\left(\sigma \left(x - \frac{L}{2}\right)\right) \quad \text{II-14}$$

Où :

$$\sigma = \sqrt[4]{\frac{1 - \nu_1^2}{k_b} \frac{6E}{eE_1e_1^3}} \quad ; \quad A_b = \left[ \cos\left(\sigma \frac{L}{2}\right) - \sin\left(\sigma \frac{L}{2}\right) \right] \frac{12EM_0}{eE_1e_1^3 \sigma^2 e^{\sigma \frac{L}{2}}} \quad ; \quad B_b = \frac{\sin\left(\sigma \frac{L}{2}\right) + \cos\left(\sigma \frac{L}{2}\right)}{\cos\left(\sigma \frac{L}{2}\right) - \sin\left(\sigma \frac{L}{2}\right)} A_b$$

Le paramètre  $k_B$  représente ici la raideur en flexion pour des substrats filamenteux en matériau

composite. De plus, il met en avant trois modes de rupture.

Le premier mode est celui de la rupture des substrats au bord du joint de colle ; ce mode est le plus fréquent et est celui qui se produit pour des substrats de faibles épaisseurs, en conséquence de la flexion importante due à l'excentricité de chargement. Le second mode est celui de la rupture de la couche de colle en cisaillement ; il concerne plus particulièrement les jonctions avec une faible longueur de recouvrement. Le troisième mode est celui qui combine les deux précédents, et est associé aux contraintes de pelage en bord de joint et se produit pour des substrats de forte épaisseur. Le rapport de la longueur de recouvrement à l'épaisseur du substrat joue donc un rôle important dans la prévision du mode de la rupture du joint.

### **II.4 Intérêt des approches analytiques**

Les approches analytiques fournissent des expressions prêtes à l'emploi. Elles sont nombreuses. L'exactitude de ces formules doit être reliée à la validité des hypothèses simplificatrices faites, vis-à-vis du problème posé, 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 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. 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 est fastidieux.

### **II.5 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 ses configurations. Par conséquent, ces travaux offrent la possibilité assez simplement d'être considéré comme référant à d'autres analyses.

De ces analyses, nous pouvons dégager le comportement général en fonction des paramètres suivants :

- la longueur de recouvrement ;
- la largeur de recouvrement ;
- la rigidité (épaisseur) des substrats ;
- la rigidité (épaisseur) de l'adhésif ;
- le comportement mécanique de l'adhésif.

### **II.6 Modèles numériques**

#### **II.6.1 Introduction**

L'approche analytique devient mathématiquement très complexe dès qu'il s'agit de prendre en compte des variations de géométries, des conditions aux limites ou des non linéarités géométriques ou matérielles. Cette difficulté s'accroît encore si on veut prendre en compte des effets tridimensionnels.

C'est pourquoi depuis les années 1970, la méthode des éléments finis a été largement employée pour prédire le comportement des joints collés. Son plus grand avantage est qu'il est très facile de modifier les conditions aux limites et les géométries, d'introduire des non linéarités de comportement, et ainsi de réaliser des études paramétriques complexes.

Une des principales contraintes rencontrées lorsqu'on réalise une analyse éléments finis d'un assemblage collé est la relative différence d'échelle entre la couche de colle et les substrats. L'adhésif demande un maillage très fin si on souhaite accéder aux contraintes qui s'y développent. Mais utiliser une taille de maillage si fine dans tout le modèle conduirait à un nombre de degrés de liberté trop important pour les calculateurs disponibles. Il faut alors mailler de façon plus grossière les substrats, et assurer une transition douce entre les différentes tailles de maillage. Malgré cette adaptation, un modèle éléments finis d'un assemblage collé reste toujours assez volumineux. On peut en voir un exemple sur la figure II-14.

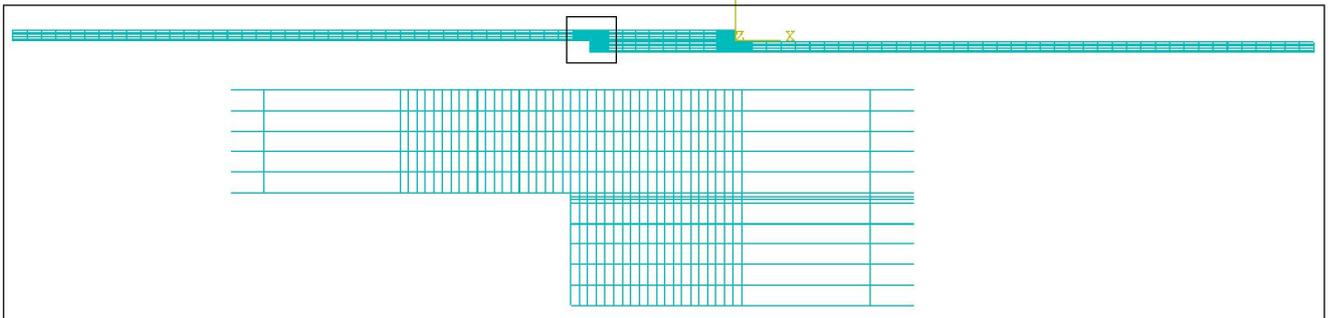


Figure II.14 Raffinement du maillage dans l'adhésif

#### **II.6.2 Comparaison des résultats des différentes théories présentées**

Tous les modèles analytiques s'intéressant aux joints à simple recouvrement n'ont pas été cités mais le choix des modèles présentés permet de se représenter les divers degrés de complexité rencontrés lorsqu'on s'intéresse à la détermination analytique des champs de contrainte dans un joint collé fonctionnant en cisaillement. Pour pouvoir se faire une idée des différences entre les théories présentées ci-dessus, l'analyse d'un joint collé a été réalisée avec les différentes théories

analytiques présentées et un modèle numérique, en l'occurrence un modèle éléments finis 3D sous l'hypothèse de déformations planes réalisé avec le logiciel Abaqus.

On constate que l'excentricité de l'application des efforts entraîne de manière évidente une contrainte de décollement au niveau du joint de colle. Celui-ci n'est pas pris en compte dans la théorie de O. Volkersen, et il est donc normal que les résultats donnés par la théorie de Goland et Reissner (qui pour rappel prend en compte le moment dû à l'excentricité des efforts) conduisent à des résultats assez différents.

Les caractéristiques du joint à simple recouvrement utilisées sont données dans le tableau II.1

Le joint est soumis à une charge de 20MPa.

Couche (mm)	Epaisseur (mm)	E(MPa)	$\nu$	L(mm)
2024-T3	1.5	68800	0.33	12.5
ADEKIT A140	0.2	2690	0.3	12.5

Tableau II.1- Les propriétés du joint du joint à simple recouvrement étudié

On notera que le profil de cisaillement est concentré aux deux extrémités et que le collage initie des phénomènes de concentrations de contrainte. Les profils de cisaillement et de décollement donnés par les théories de O. Volkersen, Goland et Reissner, et Hart et calculés en éléments finis sous Abaqus pour un même chargement sont tracés en figure II-15 et figure II-16.

On notera que la contrainte de décollement est loin d'être négligeable et que dans le cas des joints collés à simple recouvrement, elle peut jouer un rôle prépondérant. La concentration de contrainte observée aux extrémités pour le cisaillement est également observée sur le champ d'arrachement. La correspondance entre les résultats analytiques et le calcul numérique est relativement bonne dans ce cas. Il convient toutefois de rappeler que la théorie de Goland et Reissner ne s'applique que dans un domaine limité.

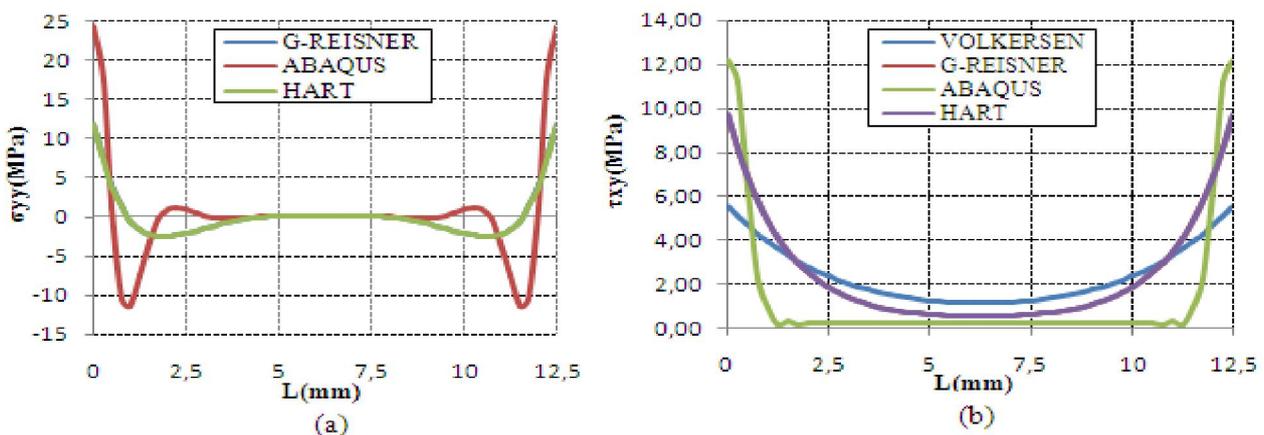


Figure II.15 Contraintes de pelage(a) et de cisaillement(b)-Etudes élastiques

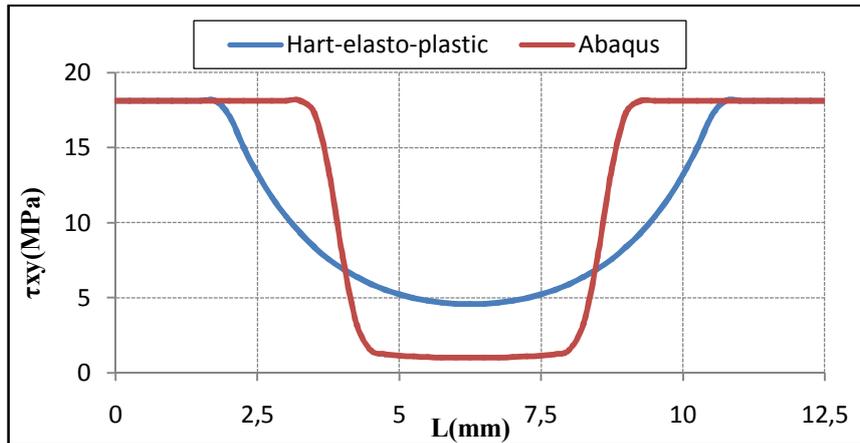


Figure II-16 Contraintes de cisaillement-études élastoplastiques

On remarque d'après la figure II-17 que la plastification s'est propagée quasiment dans toute la couche de colle ( $\sigma_{Mises} = 31.41\text{MPa}$ ) alors que la contrainte dans les substrats n'a pas encore atteint la contrainte de rupture ( $\sigma_{Mises} = 496\text{MPa}$ ) ce qui signifie que la résistance du joint dans notre cas est gouvernée par la résistance de l'adhésif.

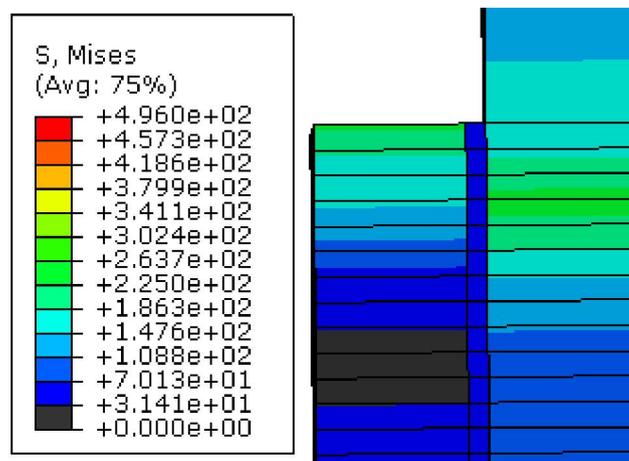


Figure II-17 Contraintes de Mises dans le joint

## CHAPITRE III

### Optimisation du joint à simple recouvrement

**III.1 Introduction**

Dans la conception des assemblages collés la géométrie des substrats et du joint de colle joue un rôle primordial. Les adhésifs sont efficaces quand ils travaillent essentiellement en cisaillement. Ils supportent beaucoup moins bien les efforts de traction et de pelage donc il est préférable d'utiliser des assemblages collés par recouvrement.

Des études analytiques sur les joints adhésifs à simple recouvrement soumis à des chargements en traction montrent que les contraintes de cisaillement au niveau de l'interface adhésif-substrat sont les plus importantes dans les joints adhésifs ductiles.

Par contre les joints adhésifs à comportement fragile se distinguent surtout par l'importance des contraintes de pelage dues au moment de flexion induit par l'excentricité du chargement.

Sous la pression des contraintes de pelage et des contraintes de cisaillement la résistance d'un joint adhésif se trouve fortement affectée.

L'analyse de l'état de contrainte dans un joint adhésif à simple recouvrement soumis à des charges de traction par des méthodes numériques ou éléments finis montre des états de singularité de contrainte au voisinage du bord libre du joint adhésif. L'effet de bord libre est un phénomène complexe car à cause de la discontinuité de géométrie et de matière, les contraintes sont théoriquement singulières. Cette singularité de la contrainte, très localisée, joue un rôle important du point de vue de la résistance de l'assemblage collé.

L'allure de l'état de contrainte le long de la longueur d'un joint adhésif à simple recouvrement (la longueur d'un joint adhésif est égale à la longueur de recouvrement des substrats) montre que seules les extrémités du joint subissent la sollicitation alors que le centre ne supporte presque aucun effort. Cette situation de résistance est particulière aux joints adhésifs. Notre but dans ce travail est de rechercher la manière d'améliorer la résistance d'un joint adhésif. Cette amélioration peut se faire en rendant le champ des contraintes uniforme le long de la longueur du joint. Ceci se traduit par une atténuation des pics de contrainte aux extrémités des joints.

**III.2 Objectifs**

L'objectif de ce chapitre est de déterminer des configurations géométriques du joint qui lui permettent d'acquérir une résistance accrue en amoindrissant les valeurs des contraintes notamment de pelage et de cisaillement.

Ces configurations géométriques sont réalisées par la variation des dimensions du joint (longueur de recouvrement et épaisseurs des substrats et de la colle) ou par le changement de sa forme par biseautage et renforcement des extrémités de la longueur de recouvrement par des bourrelets).

Outre cet aspect quantitatif notre travail a voulu être une étude complémentaire pour consolider Les résultats qui se rapportent aux joints adhésifs à simple recouvrement.

### III.3 Configuration du joint

#### III.3.1 Modèle Géométrique

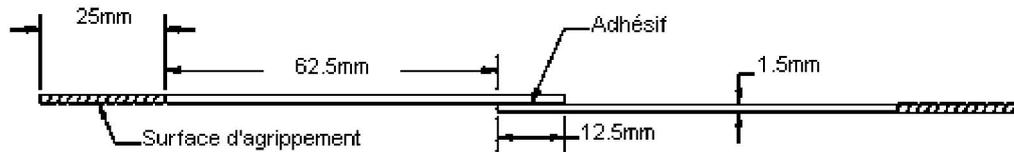


Figure III.1

Modèle géométrique ISO 4587-1995

« Méthode standard d'essai pour déterminer le comportement mécanique des adhésifs sous chargement de traction (métal / métal) ».

Notre modèle géométrique est conforme à la norme ISO4587-1995. C'est le modèle standard d'essai pour déterminer le comportement mécanique des adhésifs sous chargement de traction (métal / métal).

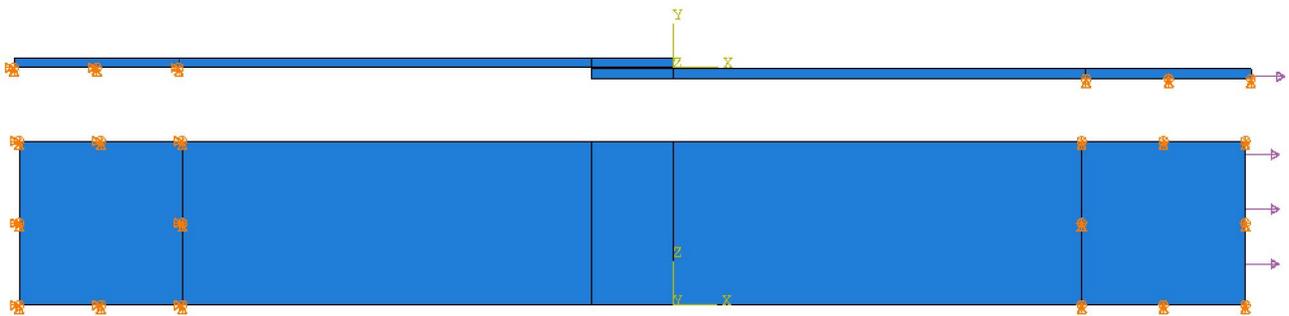


Figure III.2 Modèle géométrique conçue en 3D «photo capturée sur Abaqus

#### III.3.2 Repère Générale

##### **a) Axes principaux**

Le repère global est identique à celui figurant sur la figure III-3. :

L'axe des x ou (1) dirigé suivant le sens du chargement.

L'axe des y ou (2) dirigé normalement à la surface de recouvrement

L'axe des z ou (3) ou axe transverse dirigé suivant la largeur du joint.

##### **b) Plans principaux:**

- Plan (x z) ; plan de cisaillement
- Plan (x y) ; plan de pelage (arrachement).

##### **c) Les déplacements :**

- u1 déplacement suivant l'axe x
- u2 déplacement suivant l'axe y
- u3 déplacement suivant l'axe z

**III.3.3 Chargement**

Contrainte de traction « P » appliquée normalement à la section transversale du substrat mobile et parallèlement à l'axe « x ».

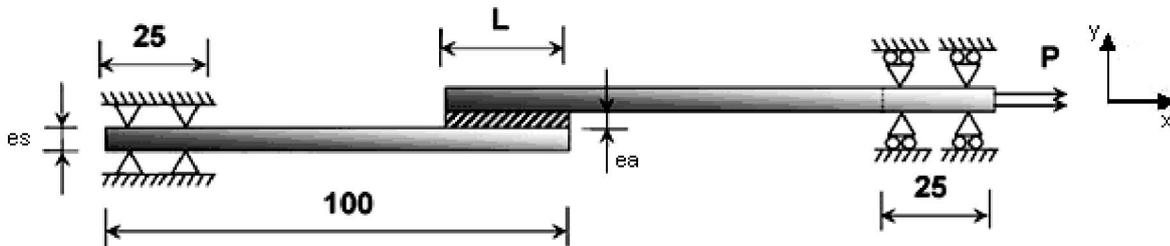


Figure- III.3 Le modèle physique pour le joint collé à simple recouvrement.

**III.3.4 Conditions aux limites**

a) Coté fixe de l'éprouvette :

$$u_1 = u_2 = u_3 = 0.$$

$$R_1 \neq 0 ; R_2 \neq 0 ; R_3 \neq 0$$

b) Coté mobile de l'éprouvette et la face latérale du joint :

$$u_1 \neq 0 ; u_2 = u_3 = 0$$

$$R_1 \neq 0 ; R_2 \neq 0 ; R_3 \neq 0$$

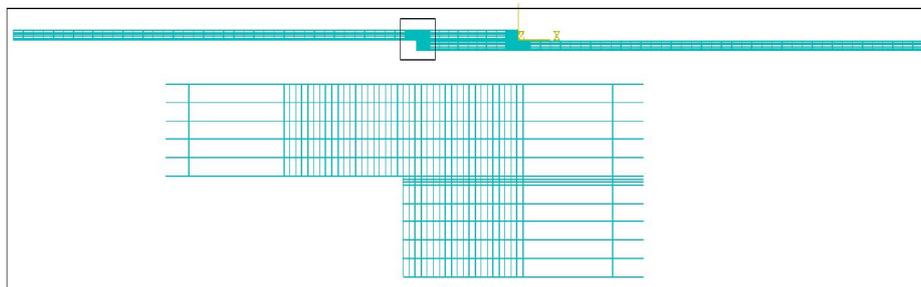
**III.3.5 Maillage**

Figure- III.4 maillage du joint.

Comme les concentrations de contraintes se situent aux extrémités de la longueur de recouvrement et en considération de la relative différence d'échelle entre la couche de colle et les substrats, l'adhésif et les zones extrêmes de la longueur de recouvrement doivent comporter un maillage très fin par rapport aux autres zones qui doivent comporter un maillage grossier pour éviter d'avoir un nombre volumineux de degrés de liberté inutilement

**III.4 Propriétés mécaniques**

**III.4.1 Alliage d'Aluminium 2024 T3**

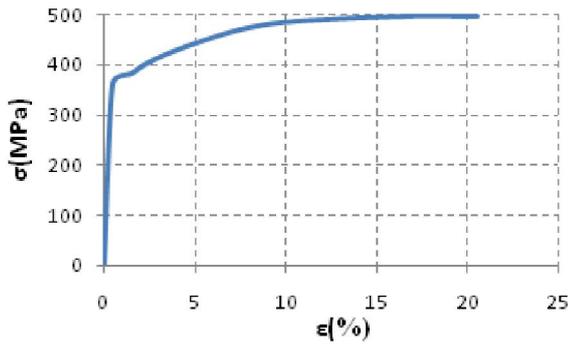


Figure III.5 Courbe de traction 2024-T3

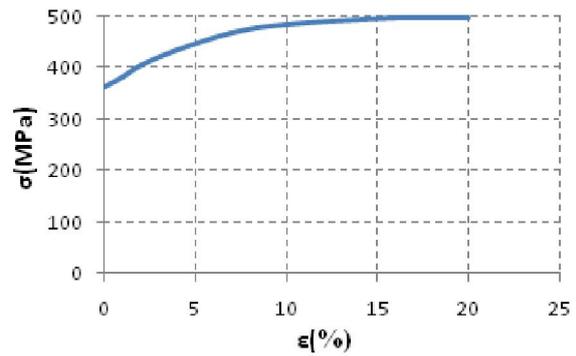


Figure III.6 Courbe de comportement  
Plastique 2024- T3

	R0.2 (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	E (GPa)	G (GPa)	v
2024-T3	391.97	496	2,4	68,8	26.46	0,33

Tableau III.1 Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium.

**III.4.2 Adhésif ADEKIT A140**

	Epaisseur(mm)	E(MPa)	v	L(mm)	σe(Mpa)	σm(Mpa)
2024-T3	1.5	68800	0.33	12.5	361.97	496.42
ADEKIT A140	0.2	2690	0.3	12.5	14.90	31.41

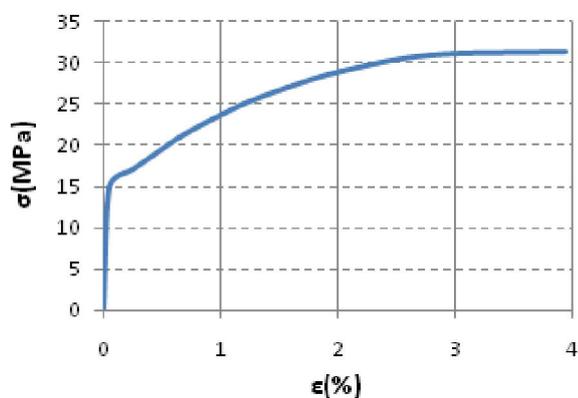


Figure III.7 Courbe de traction ADEKIT A140

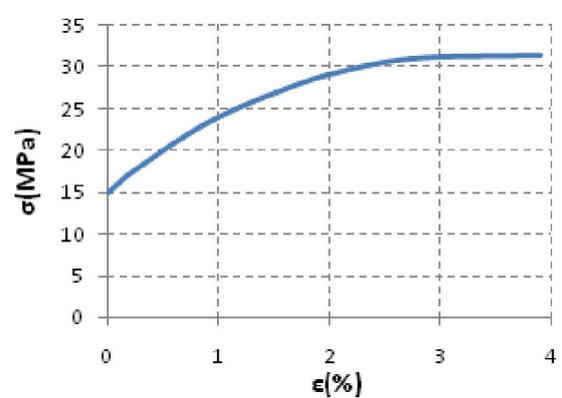


Figure III.8 Courbe de comportement  
plastique ADEKIT A140

	A(%)	E(GPa)	G(GPa)	v
ADEKIT A140	5	2690	1.035	0.3

Tableau III.2 Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium.

**III-5 Optimisation par l'analyse de Volkersen****III-5-1 Influence de la longueur de recouvrement « L »**

$$\tau_{xy} = \frac{G_c}{e_c \cdot \lambda} \cdot \frac{\sigma_{xx}(x=0)}{E_s} \left( \left( \frac{E_s \cdot e_s}{E_a \cdot e_a} + \cosh(\lambda \cdot L) \right) \frac{\cosh(\lambda \cdot x)}{\sinh(\lambda \cdot L)} - \sinh(\lambda \cdot x) \right)$$

$$\lambda^2 = \frac{G_c}{e_c} \cdot \left( \frac{1}{E_s \cdot e_s} + \frac{1}{E_a \cdot e_a} \right)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{p}{b \cdot e_s}$$

$$\tau = G_c \gamma$$

$$\tau(x) = \frac{0.5 \eta_V}{b} \cdot \frac{\cosh(\eta_V (0.5L - x))}{\sinh(0.5 \eta_V L)} p \quad \text{où} \quad \eta_V = \sqrt{\frac{2G_c}{e_a \cdot e_s \cdot E_s}}$$

$$\tau_{\max} = \frac{\eta_V \cdot L}{2 \tanh(0.5 \eta_V L)} \tau_{\text{moy}} \quad \text{où} \quad \tau_{\text{moy}} = \frac{p}{b \cdot L}$$

Avec  $p$  : charge appliquée

$L$  : longueur de recouvrement

$b$  : largeur du joint

$\tau$  : contrainte de cisaillement de l'adhésif

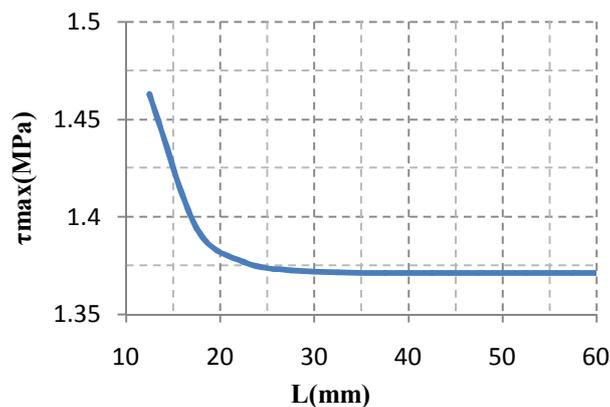


Figure III.9 Longueur optimale de recouvrement en fonction de  $e_s$  et  $e_a$

Les résultats de notre calcul sont montrés sur la figure qui représente les valeurs des contraintes maximales de cisaillement. La seule variable du cas étudié est le chargement.

Pour notre cas nous avons considéré un joint symétrique avec une épaisseur d'adhérents en Aluminium 2024T3  $e_s = 1.5\text{mm}$  ; une épaisseur d'adhésif en ADEKIT A140  $e_a = 0.1\text{mm}$ , une largeur de 25mm et une longueur de recouvrement variant de 10mm à 70mm par pas de 5mm.

Le module de Young de 2024-T3  $E_s = 68800\text{ MPa}$  et  $\nu = 0.33$  ; pour l'ADEKIT A140

$E_a = 2690\text{MPa}$  et  $\nu = 0.3$ . La charge de traction appliquée étant de 750N.

On remarque que plus la longueur de recouvrement augmente plus les contraintes maximales dans le joint diminuent et à partir de 25mm la contrainte reste pratiquement stable, donc la longueur optimale pour notre assemblage est de 25mm.

Il faut donc remarquer que :

$$\eta_v L \ll 1 \text{ implique } \begin{cases} \tau_{max} = \tau_{moy} \\ P_{critique} = bL \tau_{moy} \end{cases}$$

$$\eta_v L \gg 1 \text{ implique } \begin{cases} \tau_{max} = \frac{\eta_v L}{2} \tau_{moy} \\ P_{critique} = \frac{2b}{\eta_v} \tau_{moy} \end{cases}$$

Par conséquent pour  $\eta_v L \gg 1$  la charge critique ne dépend plus de la longueur de recouvrement et il existe donc une longueur optimale quand les deux forces critiques sont égales :

$$L_{op} = \frac{2}{\eta_v} = \sqrt{\frac{2Es.es.ea}{Ga}} = A\sqrt{es.ea} = ; A = \sqrt{\frac{2Es}{Ga}}$$

**III-5-2-Longueur d'adhésif optimale**

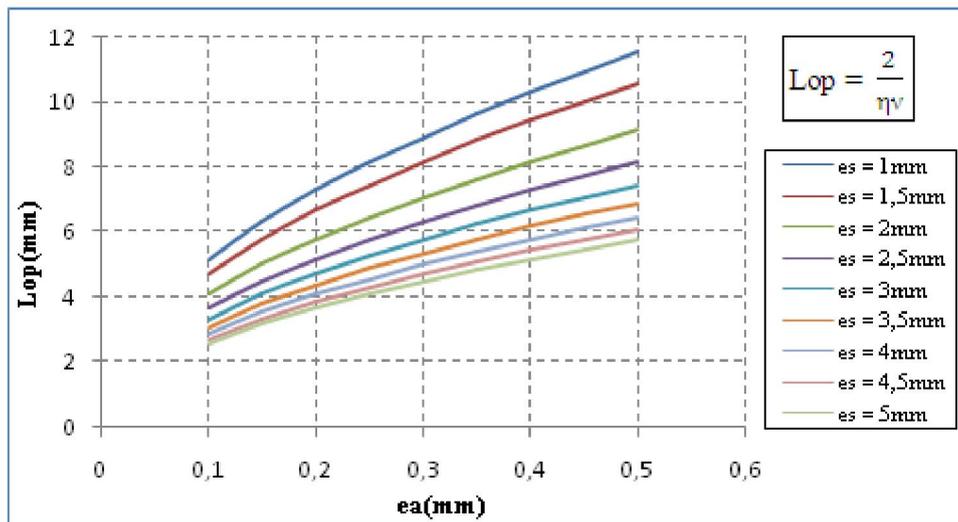


Figure III.10 Longueur optimale de recouvrement en fonction de \$e\_s\$ et \$e\_a\$

La tension de rupture calculée par Volkersen est :

$$\tau_c = \tau_{adh} \cdot \sqrt{\frac{2Es.ea}{Ga}} \cdot \frac{\sqrt{es}}{l}$$

\$\tau\_{adh}\$ est la résistance à la rupture de l'adhésif en cisaillement ; \$Ga\$ son module de cisaillement.

Cette formule fait intervenir les propriétés de l'adhésif

- La tension à la rupture est inversement proportionnelle à la racine de \$Ga\$.

- La tension à la rupture est proportionnelle à la racine de l'épaisseur de l'adhésif.
- La tension à la rupture est indépendante de la largeur de recouvrement (vérifiée par l'analyse numérique)

**III-6 Optimisation par éléments finis**

**III-6-1 Influence de la longueur de recouvrement « L »**

En analysant les courbes obtenues pour les 05 différentes longueurs de recouvrement de 12.5mm à 50mm et avec  $e_{adh} = 0.1mm$  ;  $e_s = 1.5mm$  ;  $b = 25mm$ , nous constatons certes l'influence de ces augmentations sur les valeurs des contraintes de cisaillement, de décollement et la contrainte équivalente de Von Mises.

	L1=12,5mm	L2 =17,5mm	L3 = 22,5mm	L4 = 27,5mm	L5 = 32,5mm	L5=50mm
$\sigma_{Mises}(MPa)$	31,34	31,19	31,03	30,35	29,64	19,49
$\tau_{xy}(MPa)$	17,95	17,74	17,62	17,20	16,78	10,77
$\sigma_{yy}(MPa)$	46,03	43,78	41,59	39,57	37,71	19,72

Tableau III.3 Contraintes Maximales pour différentes longueurs de recouvrement

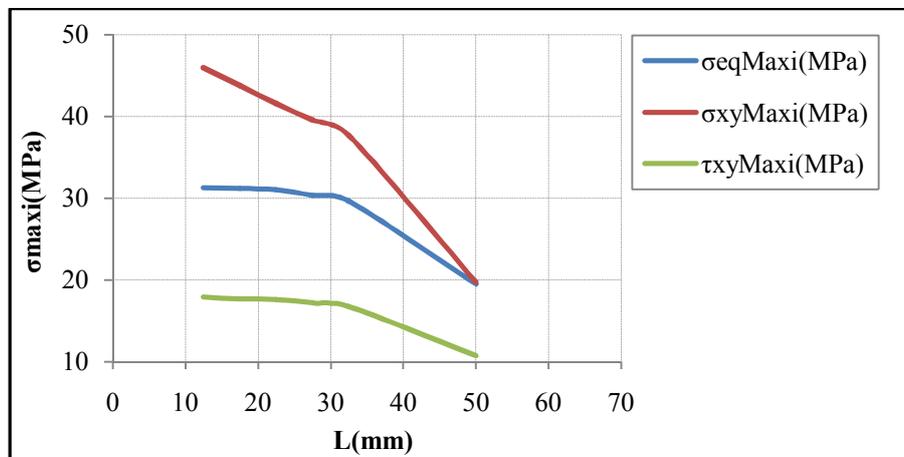


Figure III.11 Contraintes Maximales pour différentes longueurs de recouvrement

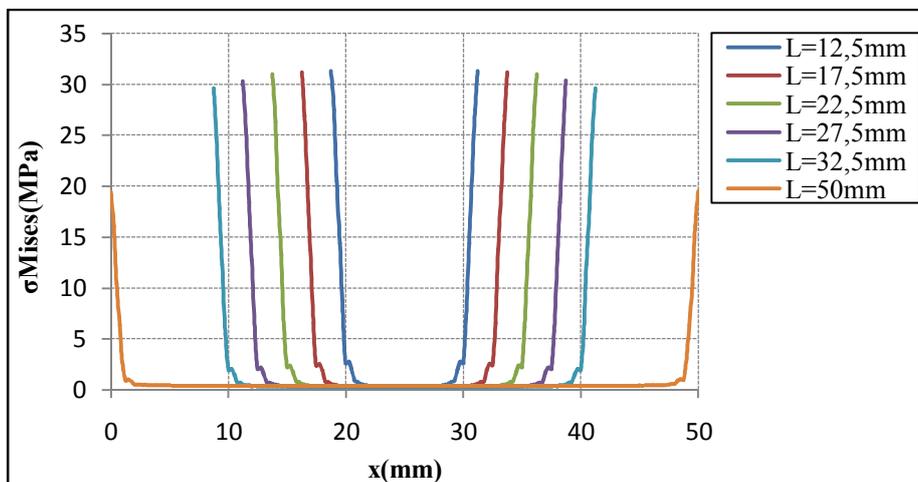


Figure III.12 Contrainte de Von Mises pour différentes longueurs de recouvrement

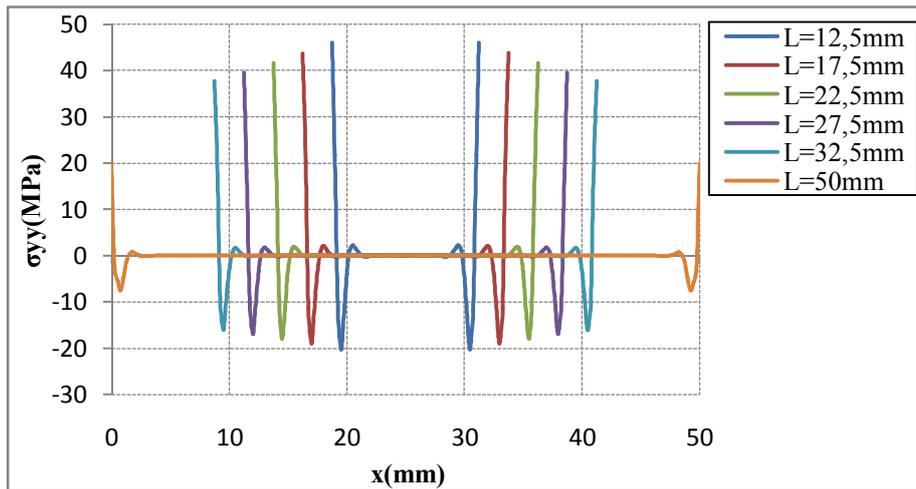


Figure III.13 Contrainte de pelage pour différentes longueurs de recouvrement

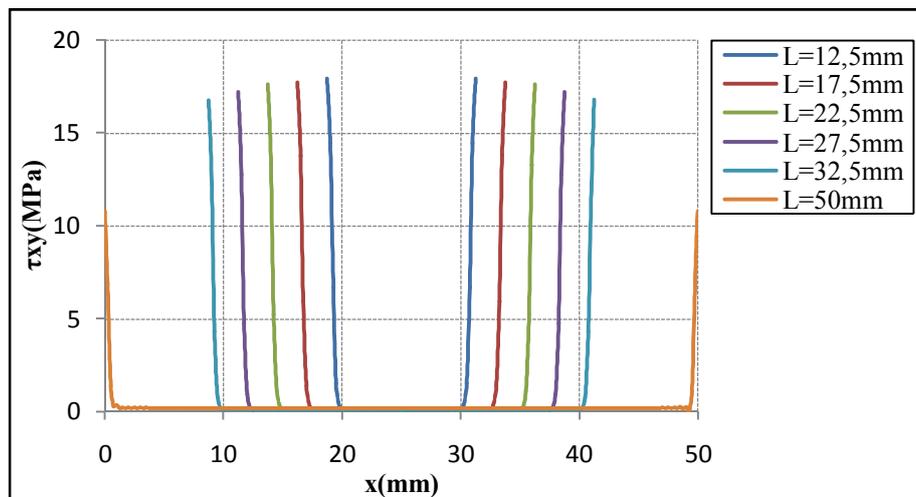


Figure III.14 Contrainte de cisaillement pour différentes longueurs de recouvrement

Les principaux enseignements à tirer sont d'abord les allures des courbes qui ne changent quasiment pas pour les 05 cas étudiés avec un minimum au niveau de la partie centrale et la mise en évidence de l'effet de bord car les valeurs maximales des contraintes se situent aux extrémités de l'adhésif. On remarque aussi qu'avec l'augmentation de la longueur de recouvrement les valeurs maximales de contraintes tendent à se rapprocher de plus en plus des bords. Car pour une longueur de colle de 12.5mm les valeurs maximales significatives se trouve à 0.5mm des bords par contre pour une longueur de colle de 40mm elles se trouvent des bords de 0.25mm.

En outre le rapport des longueurs minimales et maximales est de  $12.5/50 = 0.25$  par contre celui des contraintes est de  $19.49/31,34=0.62$  pour  $\sigma_{Mises}$  ;  $10.77/17.95 = 0.60$  pour  $\tau_{xy}$  et  $19.72/46.03 = 0.43$  pour  $\sigma_{xy}$ .

On déduit de ces rapports que le gain de résistance se réalise plus par rapport de la contrainte de décollement (0.43).de surcroit l'accroissement de « L » se fait au détriment d'une perte de matière (substrats et adhésif).

Dans l'analyse de Volkersen il est supposé que l'adhésif se déforme en cisaillement alors que le substrat est sollicité en tension.

La tension de rupture calculée par Volkersen est :

$$\tau_c = \tau_{adh} \cdot \sqrt{\frac{2Es \cdot ea}{Ga}} \cdot \frac{\sqrt{es}}{l}$$

$\tau_{adh}$  est la résistance à la rupture de l'adhésif en cisaillement ;  $G_a$  son module de cisaillement.

On remarque que la tension à la rupture est indépendante de la largeur de recouvrement (vérifiée par l'analyse numérique).

**III-6-2 -Influence de l'épaisseur de l'adhésif « e<sub>a</sub> »**

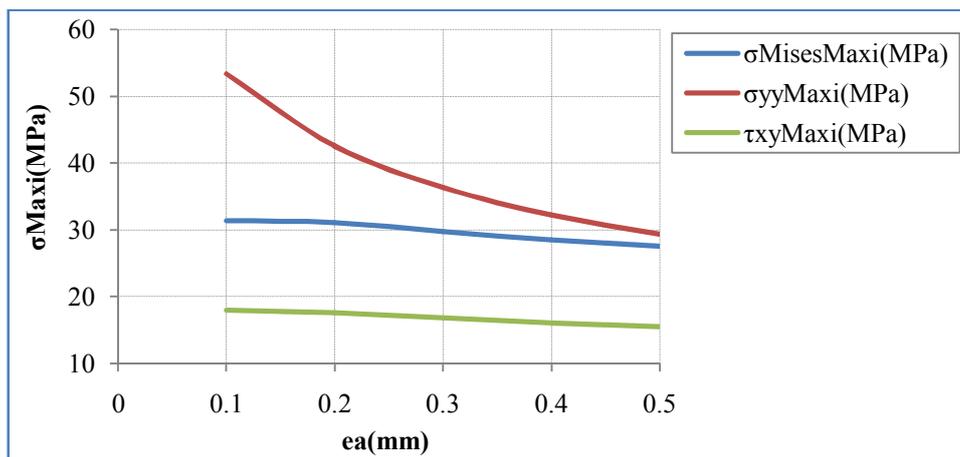


Figure III.15 Contraintes Maximales pour différentes épaisseurs de l'adhésif

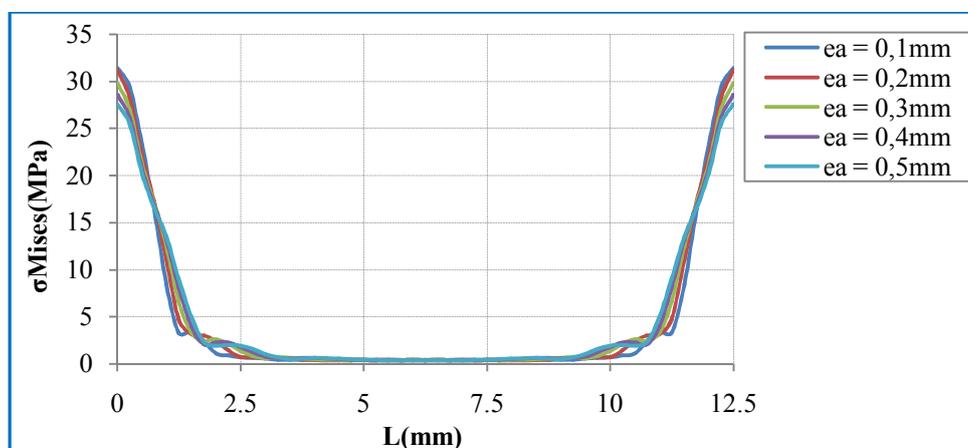


Figure III.16 Contrainte de Von Mises pour différentes épaisseurs de l'adhésif

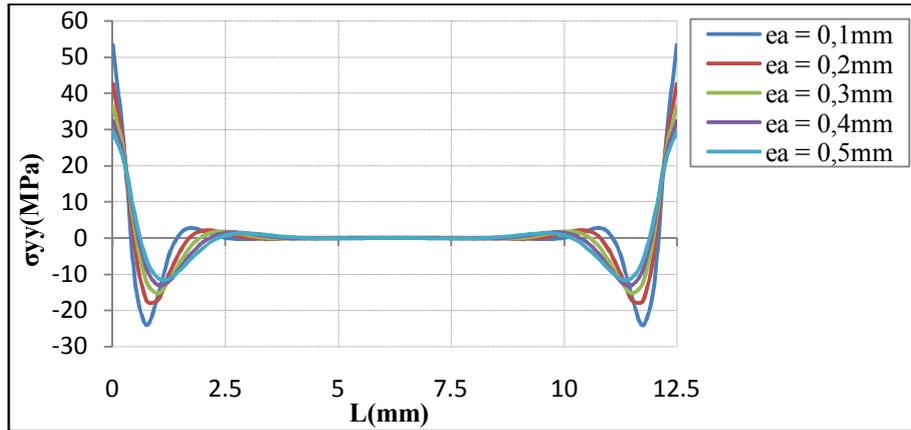


Figure III.17 Contrainte de pelage pour différentes épaisseurs de l'adhésif

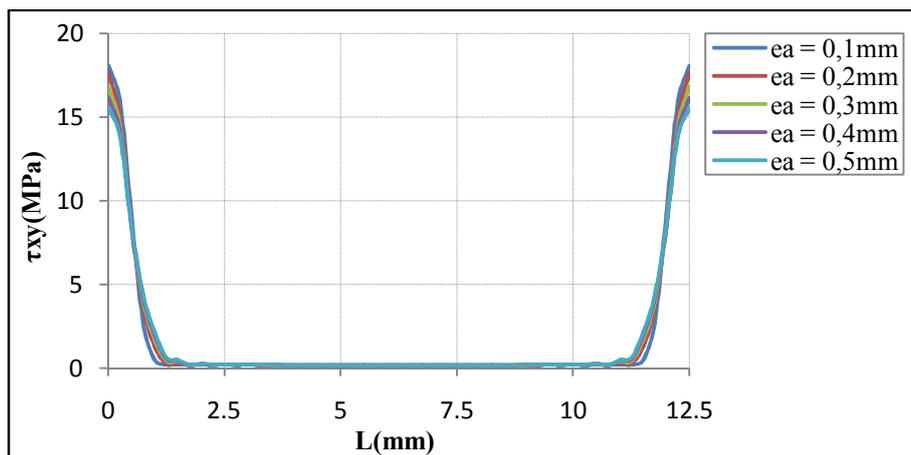


Figure III.18 Contrainte de cisaillement pour différentes épaisseurs de l'adhésif

La figure III-18 montre la variation de la contrainte de cisaillement du joint de colle dans le plan de  $xy$  pour différentes épaisseurs de l'adhésif on peut noter qu'une augmentation de l'épaisseur du joint de colle entraîne une réduction des contraintes de Von Mises, de pelage et de cisaillement.

Théoriquement, la résistance du joint collé augmente avec l'épaisseur de l'adhésif.

Pourtant, les résultats expérimentaux montrent que la charge moyenne à rupture augmente puis décroît au-delà d'une certaine épaisseur jusqu'à une certaine limite. C'est le développement des contraintes d'arrachement aux extrémités du joint, croissant avec l'épaisseur de l'adhésif, qui entraîne une diminution de la résistance au cisaillement [34].

Son 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 montre par ailleurs que les ruptures du joint de colle tendent à être adhésives et non cohésives quand l'épaisseur augmente (ce n'est donc pas la structure interne de la colle qui s'affaiblit quand

l'épaisseur croît) : les contraintes sont d'autant plus élevées à l'interface substrat/adhésif que le joint est épais.

Notre étude confirme ce qui a été démontré expérimentalement car d'après la figure III-19, la résistance de l'assemblage augmente avec l'épaisseur du joint de colle, passe par un optimum puis décroît ensuite très rapidement. Dans notre cas l'épaisseur optimale avoisine les 0.3mm pour une charge de 12MPa.

Ce phénomène est expliqué par l'augmentation des surcontraintes (notamment des contraintes de pelage) lorsque l'épaisseur du joint augmente. L'épaisseur optimale est donc le moment où ces surcontraintes sont moindres [85].

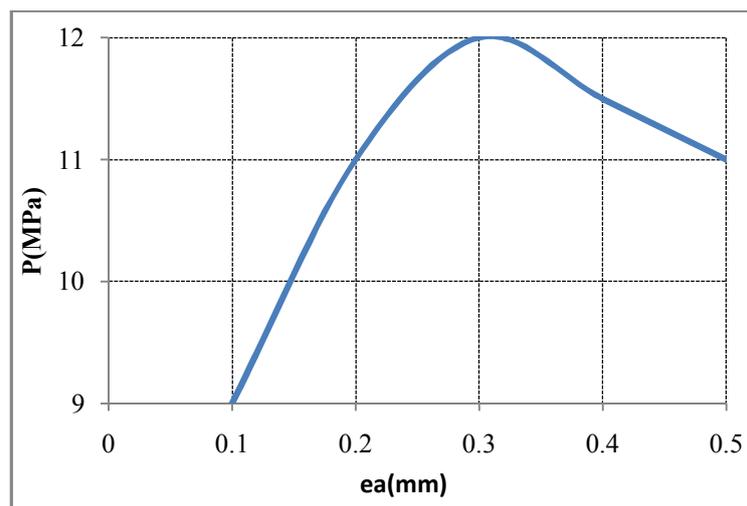


Figure III.19 Contrainte ruine pour différentes épaisseurs de l'adhésif

### III-6-3 -Influence de l'épaisseur du substrat « $e_s$ »

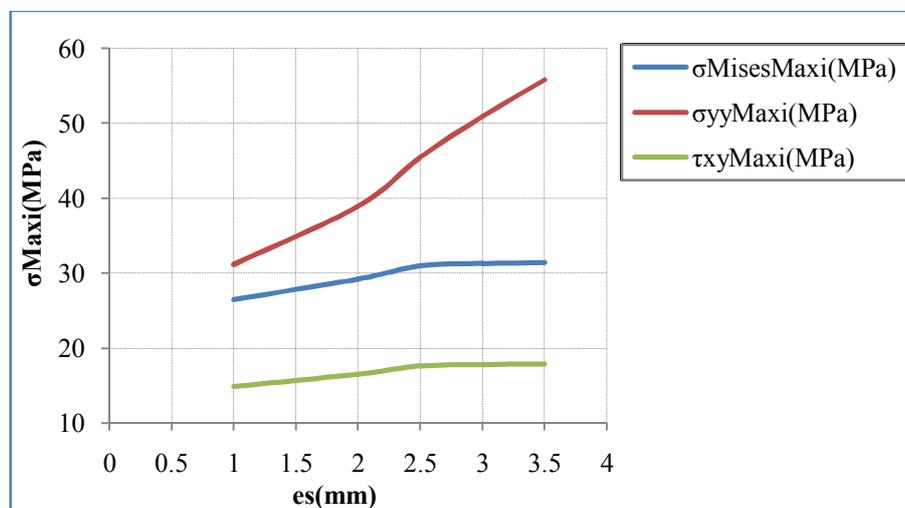


Figure III.20 Contraintes Maximales pour différentes épaisseurs des adhérents

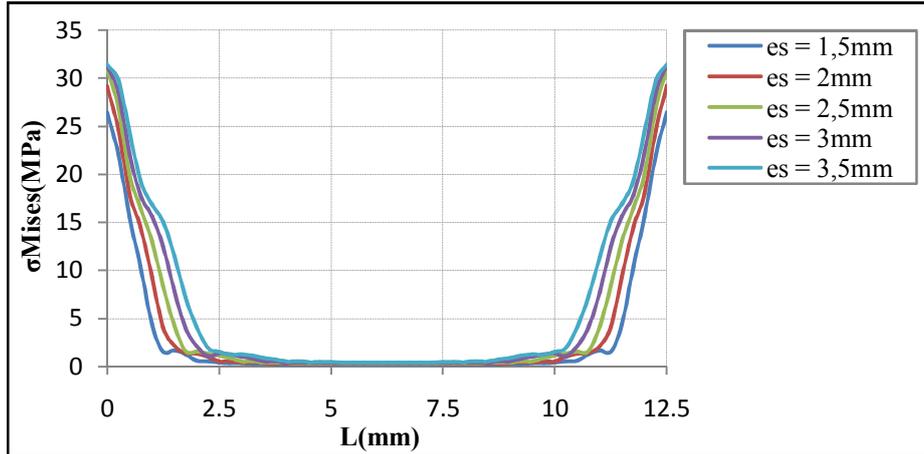


Figure III.21 Contrainte de Von Mises pour différentes épaisseurs des adhérents

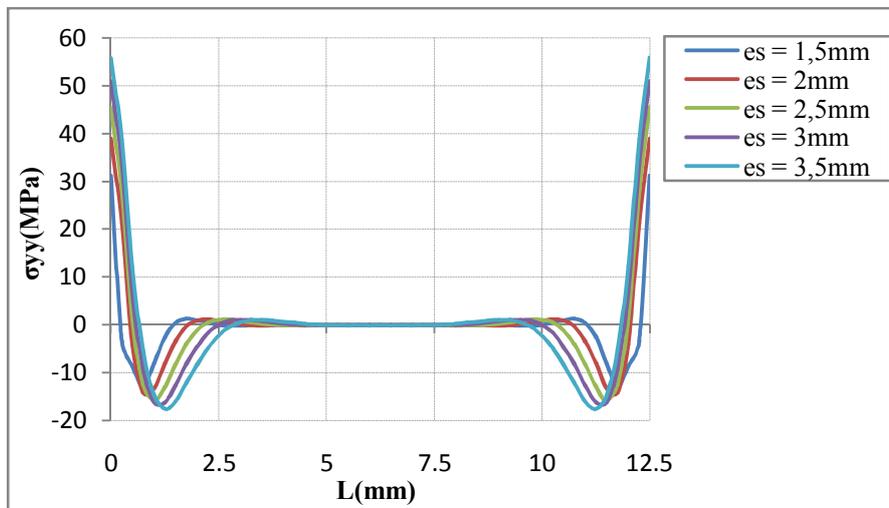


Figure III.22 Contrainte de pelage pour différentes épaisseurs des adhérents

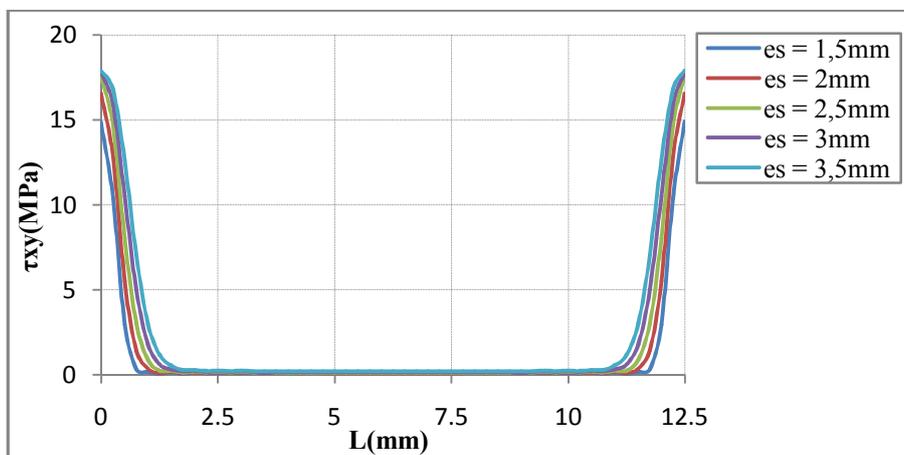


Figure III.23 Contrainte de cisaillement pour différentes épaisseurs des adhérents

La figure III.23 montre la variation de la contrainte de cisaillement du joint de colle dans le plan de xy pour différentes épaisseurs de l'adhésif on peut noter qu'une augmentation de l'épaisseur du joint de colle entraîne une réduction de la contrainte de cisaillement  $\tau_{xy}$ .

Augmenter l'épaisseur des supports a pour conséquences deux effets contradictoires ; d'une part, ceci entraîne une aggravation de l'excentricité des efforts et une augmentation du moment fléchissant induit et d'autre part une augmentation de la rigidité des plaques qui tend à atténuer le clivage.

On remarque sur les trois figures III-21, III-22 et III-23 que plus l'épaisseur du substrat augmente, plus la surface active de collage n'augmente mais elle est plus importante pour la courbe de pelage. Ce qui explique que le pelage s'accroît avec l'importance de l'épaisseur du substrat par contre la courbe de Von Mises augmente progressivement puis atteint une asymptote qui a comme valeur dans notre cas 2.5mm.

C'est la valeur optimale du substrat pour notre étude.

**III-6-4 -Influence de la charge «P »**

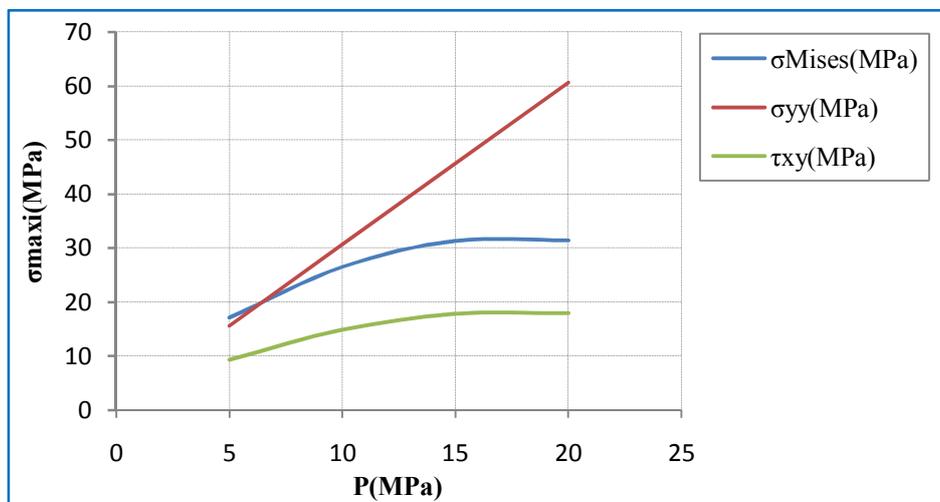


Figure III.24 Contraintes Maximales de cisaillement pour différentes valeurs de la charge

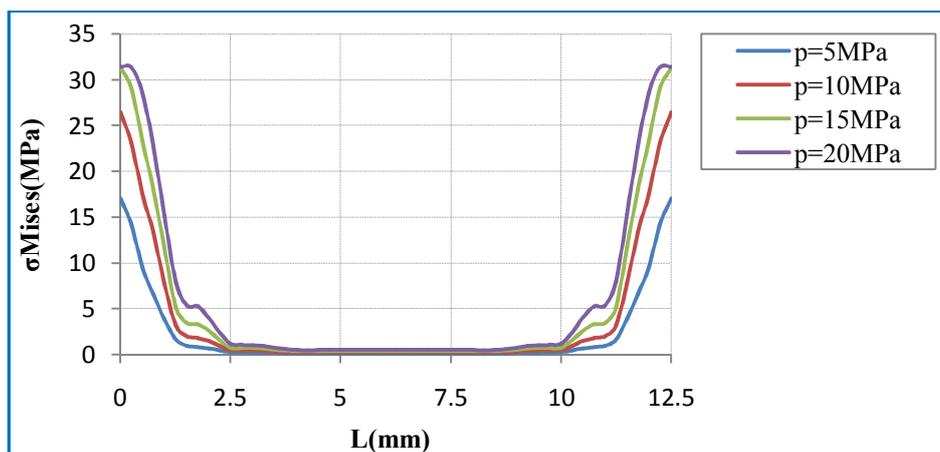


Figure III.25 Contrainte de Von Mises pour différentes valeurs de la charge

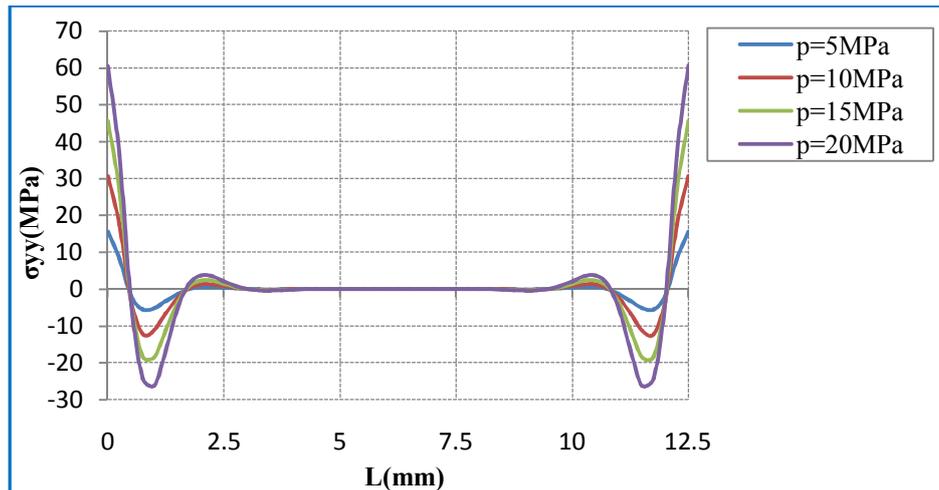


Figure III.26 Contrainte de pelage pour différentes valeurs de la charge

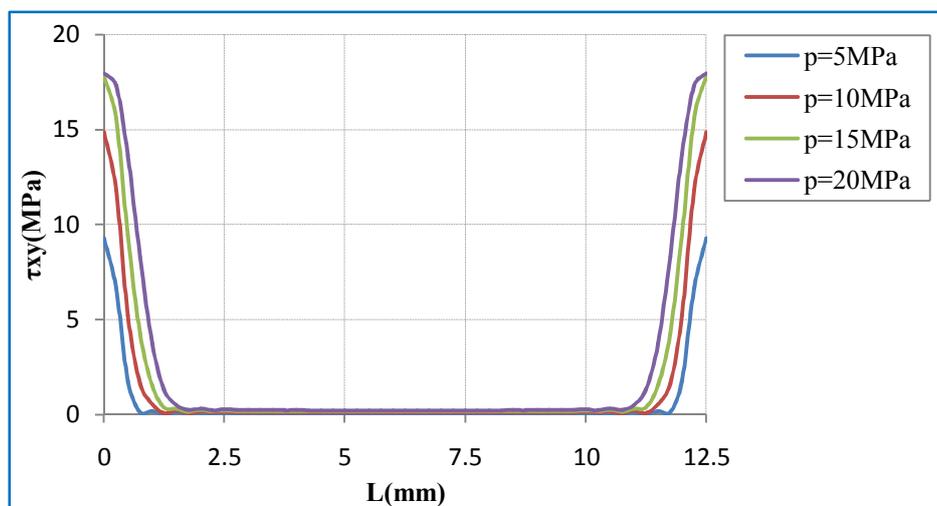


Figure III.27 Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge

	P1 = 5MPa	P2 = 10MPa	P3 = 15MPa	P4 = 20MPa
$\sigma_{Mises}$ (MPa)	17,06	26,49	31,33	31,41
$\tau_{xy}$ (MPa)	9,28	14,88	17,81	17,97
$\sigma_{yy}$ (MPa)	15,59	30,63	45,64	60,60

Tableau III.4 Valeurs des contraintes en fonction Chargement.

D'après la figure III-24 on remarque que la contrainte de décollement augmente linéairement avec la charge ; c'est une fonction linéaire donc elle est proportionnelle à la charge. En outre toutes les courbes se croisent aux mêmes points ce qui veut dire que la zone de concentration de contraintes ne varie pour ce cas.

D'après la figure III-27 on remarque que la contrainte de cisaillement augmente avec la charge mais

d'une façon non-linéaire. Elle devient asymptotique à la limite élastique lorsqu'elle se rapproche de cette valeur. On remarque également que la zone de concentration de contraintes augmente aussi avec la charge ce qui a pour conséquence une mobilisation accrue de la partie centrale de la colle quasiment passive.

D'après la figure III-25 on remarque que la contrainte de Von Mises a un comportement identique que celle de cisaillement à l'exception des zones extrêmes qui ne varient pratiquement pas car les valeurs des contraintes de Von Mises commence à augmenter aux mêmes points.

# CHAPITRE IV

## Optimisation de la forme du joint

**IV.1 Optimisation par biseautage des substrats****IV.1.1 Biseautage intérieur des substrats**

Dans cette étude l'alliage d'aluminium 2024-T3 et le polymère époxy ADEKIT A140 ont été utilisés respectivement comme adhésif et adhérents. Un joint équilibré a été considéré dans cette étude avec une épaisseur d'adhérents( $e_s$ ) de 1.5mm et une largeur( $b$ ) de 25 mm d'une part et avec une épaisseur de l'adhésif ( $e_a$ ) de 0.15mm de longueur de recouvrement( $L$ ) de 20mm d'autre part.

Le joint est soumis à un chargement de traction dirigé suivant l'axe x ou parallèle à la longueur de recouvrement.

La figure IV.1 représente le schéma du joint étudié.

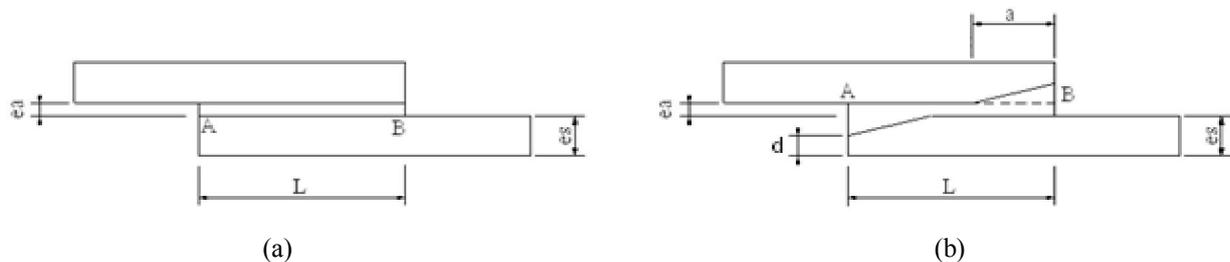


Figure IV.1 Configuration de JSR-a) sans angle et b) avec angles.

Douze éprouvettes ont été étudiées par la combinaison des dimensions du talon d'adhérent « d » et celles de la longueur « a » conformément aux données du tableau IV.1.

l(mm)	L(mm)	b(mm)	d(mm)	a(mm)				
100	20	25	0	0	5	10	15	20
100	20	25	0.5	0	5	10	15	20
100	20	25	1.0	0	5	10	15	20
100	20	25	1.5	0	5	10	15	20

Tableau IV.1 Combinaison des dimensions des joints

**Résultats et discussions**

La surface totale de collage est égale au produit de la longueur totale de recouvrement c'est-à-dire la ligne l'interface adhésif-adhérent par la largeur d'adhésif « w ». Cette surface varie en fonction des longueurs « a » et « d ».

Pour pouvoir distinguer le cas optimal des autres, les éprouvettes étudiées ont été soumises à une contrainte de tension de 15MPa.

Sur la base des résultats obtenus à partir des courbes des différents cas étudiés, il s'est avéré

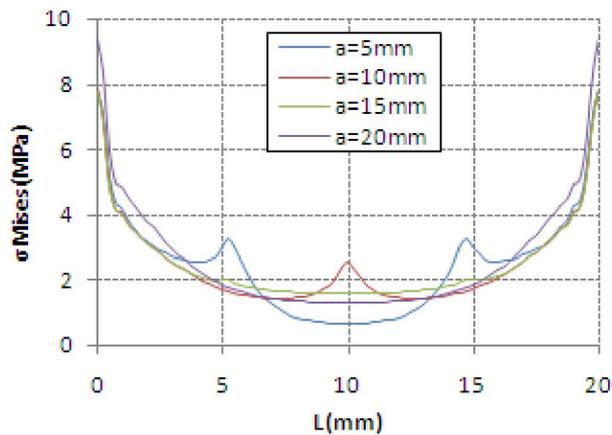
que le cas où le talon  $d = 0$  constitue le cas où le joint collé est le plus résistant et par suite les analyses qui vont suivre concerneront uniquement ce cas pour la détermination de la configuration optimale du joint.

Le tableau IV.2 représente les contraintes maximales pour les 12 cas étudiés

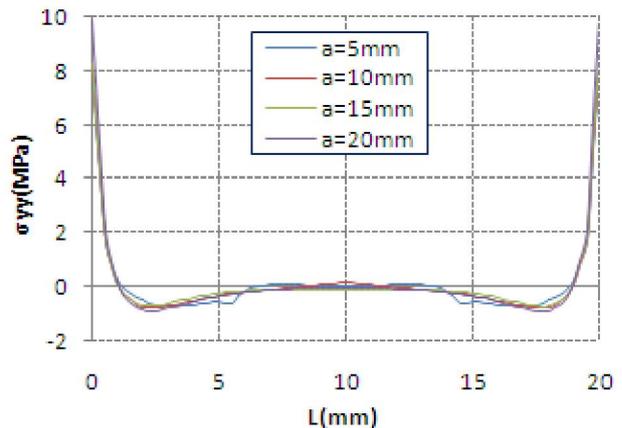
d(mm)	a(mm)	$\sigma_{eq}$ (MPa)	$\sigma_{yy}$ (MPa)	$\sigma_{xy}$ (MPa)
0	5	7.83	8.016	3.22
0	10	7.825	8.24	3.16
<b>0</b>	<b>15</b>	<b>7.812</b>	<b>8.28</b>	<b>3.127</b>
0	20	9.401	9.92	3.81
0.5	5	28.101	27.58	11.839
0.5	10	28.966	28.007	13.583
0.5	15	28.912	27.996	13.606
0.5	20	29.022	28.355	13.452
1.0	5	29.01	27.744	13.648
1.0	10	29.089	28.307	13.564
1.0	15	29.129	28.479	13.491
1.0	20	29.142	28.479	13.5
1.5	20	31.36	49.303	17.975

Tableau IV.2 Récapitulation des contraintes maximales.

NB : Les figures IV-2(a),(b) et(c) se rapportent au cas le plus défavorable avec  $b = 0$



a)



(b)

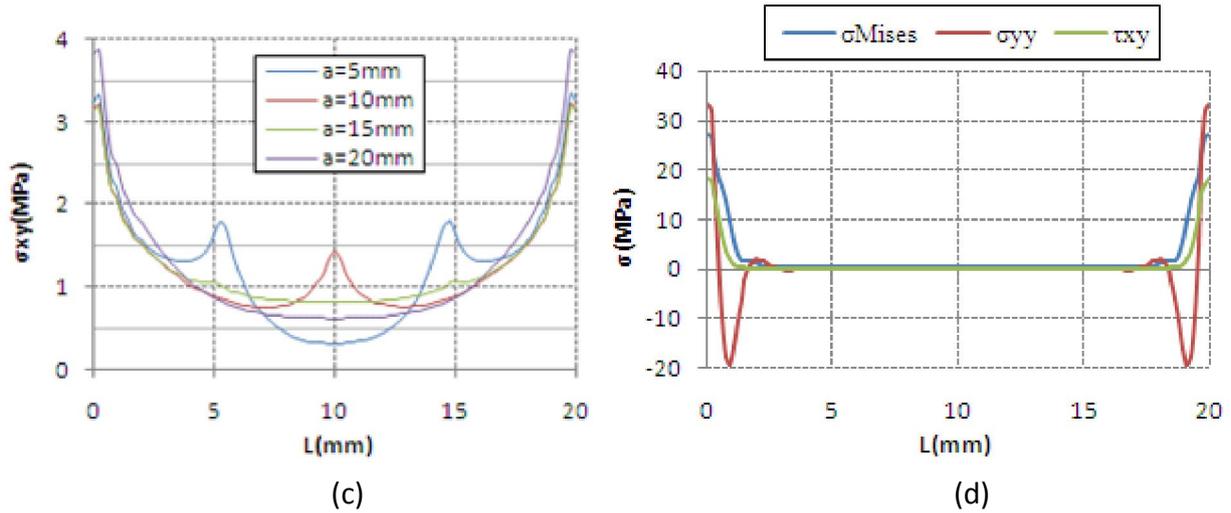


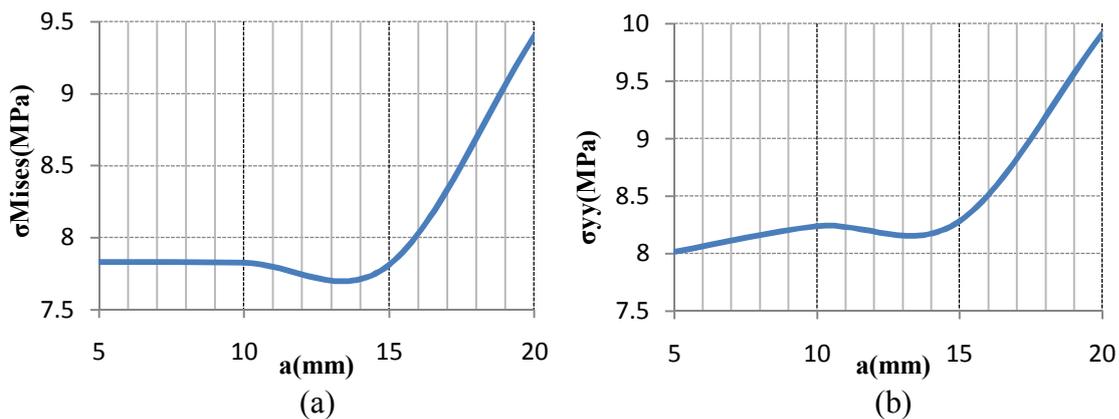
Figure IV.2 Distribution des contraintes dans la couche adhésive suivant la ligne A-B :  
 (a)  $\sigma_{eq}$  ; (b)  $\sigma_{yy}$  ; (c)  $\sigma_{xy}$  ; (d) Joint à bord droit

Les contraintes équivalentes ( $\sigma_{Mises}$ ), de pelage ( $\sigma_{yy}$ ) et de cisaillement ( $\sigma_{xy}$ ) suivant la ligne A-B de la longueur de recouvrement  $L = 20\text{mm}$  sont représentées dans la figure III-29(a)

Un examen général de cette figure a révélé que des valeurs maximales des contraintes situées aux extrémités à  $L = 0$  et  $L = 20\text{mm}$  donc aux extrémités de la longueur de recouvrement ce qui équivaut à l'effet de bords ou singularités des joints.

D'après les figures IV.2 (b) et (d) la contrainte maximale de décollement est de  $32.99\text{MPa}$  pour le cas où  $a = 0$  qui est 4.12 fois plus importante que pour le cas où  $a = 10\text{mm}$  où on constate une contrainte de décollement de  $8.016\text{MPa}$  d'où on déduit que les de JSR à bord droit constitue le cas de joint le moins résistant.

On constate aussi dans les figures IV-2(a), (b) et (c) que les courbes de contraintes présentent des pics aux sommets des angles d'inclinaison de l'adhésif plus accentués pour les contraintes équivalentes et de cisaillement que pour les contraintes de décollement à l'opposé des courbes Figure IV-2(d) où les contraintes sont homogènes et presque rectilignes.



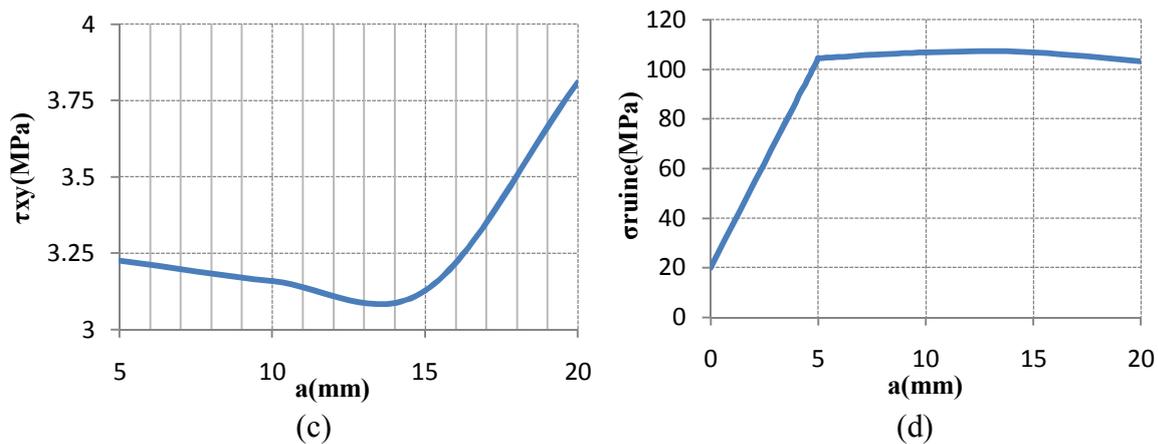


Figure IV.3 (a) $\sigma$ Mises - (b) $\sigma_{yy}$  - (c) $\tau_{xy}$  sous  $P = 15\text{MPa}$  ; (d)Contraintes de ruine Talon  $b = 0$

Les courbes figureIV-3(a),(b) et (c) montrent le comportement du joint en fonction des valeurs de la longueur de biseautage. Le comportement des trois courbes (a),(b)et (c) est presque similaire avec une contrainte minimale pour une longueur de biseautage égale à 13.5mm et un maximum pour une longueur de biseautage égale à la longueur de recouvrement.

En effet la charge de ruine passe de 20MPa(Tableau IV-3) pour un joint à bord droit à 108MPa pour un joint biseauté sur toute la longueur de recouvrement(20mm).

Sur la base des résultats on peut conclure que dans notre cas le joint avec un talon  $d = 0$ et une longueur de biseautage égale 13.5mm constitue le cas optimal.

l(mm)	L(mm)	b(mm)	d(mm)	a(mm)	$\sigma_{ruine}$ (MPa)
100	20	25	0	0	20.0
100	20	25	0	5	104.4
100	20	25	0	10	106.8
100	20	25	0	15	106.8
100	20	25	0	20	103.2

Tableau IV.3 Contraintes de ruine

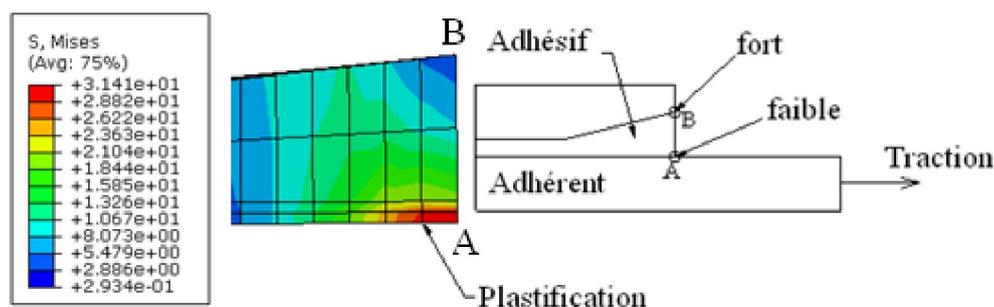


Figure IV.4 Etat de contrainte le long du joint adhésif

On constate d'après la figure IV.4 que la plastification de l'adhésif débute à l'extrémité (point A) où la résistance est la plus faible.

Au point «B» la contrainte équivalente est de 2.886 MPa soit quasiment 11 fois plus résistante qu'au point «A»

Sur la base de la figure IV.3(b) et(c) on peut déduire que les variations des contraintes maximales équivalentes, de décollement et de cisaillement présentent un comportement quasi similaire avec une pente négative faible de  $a=5\text{mm}$  à  $a=15\text{mm}$  puis une pente positive plus accentuée à partir de  $a=15\text{mm}$  jusqu'à  $a=20\text{mm}$ .

Cette similitude se confirme par les rapports entre les valeurs minimales et maximales car on trouve pour  $\sigma_{eq}$  :  $r = 0.833$  ; pour  $\sigma_{yy}$  :  $r = 0.845$  et pour  $\sigma_{xy}$  :  $r = 0.808$  .

Sur la base de la figure IV.3(d) on peut apercevoir que la contrainte de ruine  $\sigma_{ruine} = 106.8\text{MPa}$  se situe entre les cas où  $a=10\text{mm}$  et  $a=15\text{mm}$  soit environ  $13.5\text{mm}$  ce qui représente le cas optimal pour ce genre de configuration.

**IV.1.2 Biseautage extérieur des substrats**

Dans cette étude l'alliage d'aluminium 2024T3 et le polymère époxy ADEKIT A140 ont été utilisés respectivement comme adhésif et adhérents. Un joint équilibré a été considéré dans cette étude avec une épaisseur d'adhérents( $e_s$ ) de 1.5mm et une largeur( $b$ ) de 25 mm d'une part et avec une épaisseur de l'adhésif ( $e_a$ ) de 0.15mm de longueur de recouvrement ( $L$ ) de 20mm d'autre part(figureIV.5). Le JSR est soumis exclusivement à un chargement de traction dirigé suivant l'axe x ou parallèle à la longueur de recouvrement.

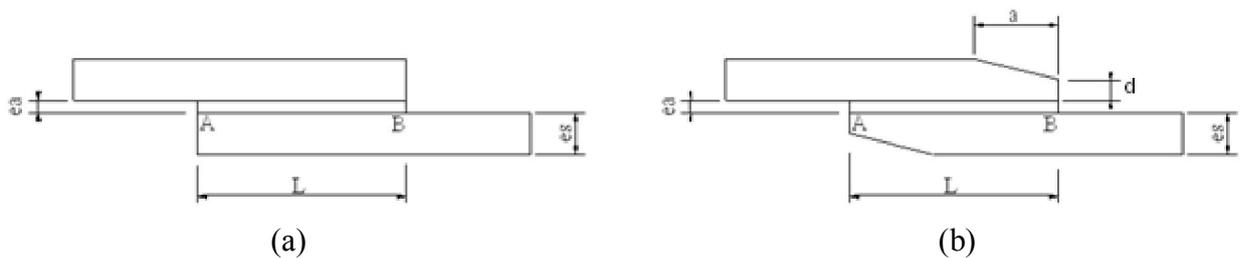


Figure IV.5 Configuration du joint a) sans angle et b) avec angles.

Douze éprouvettes ont été étudiées par la combinaison des dimensions du talon d'adhérent « d » et celles de la longueur « a » conformément aux données du tableauIV.4

l(mm)	L(mm)	b(mm)	d(mm)	a(mm)				
100	20	25	0	0	5	10	15	20
100	20	25	5	0	5	10	15	20
100	20	25	10	0	5	10	15	20
100	20	25	15	0	5	10	15	20
100	20	25	20	0	5	10	15	20

Tableau IV-4 Combinaison des dimensions des joints

### Résultats et discussions

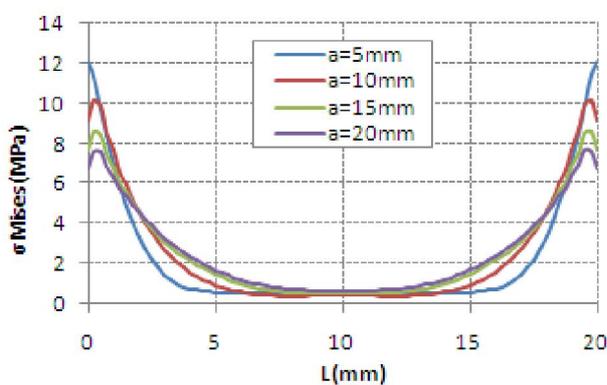
Pour pouvoir distinguer le cas optimal des autres, les éprouvettes étudiées ont été soumises à une contrainte de tension de 15MPa.

Sur la base des résultats obtenus à partir des courbes des différents cas étudiés, il s'est avéré que le cas où le talon  $d = 0$  constitue le cas où le joint est le plus résistant et par suite les analyses concerneront uniquement ce cas pour la détermination de la configuration optimale du joint.

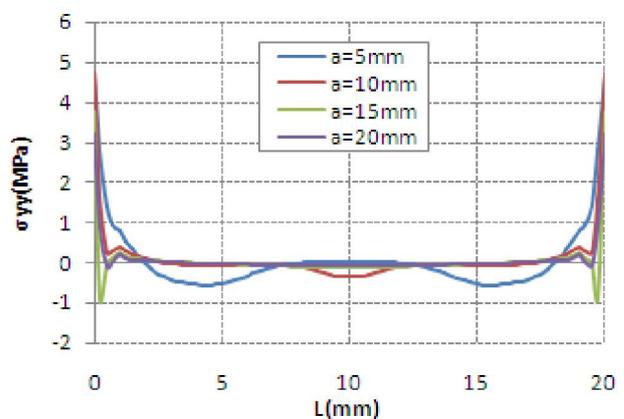
Le tableau IV.5, représente les contraintes maximales pour les 12 cas étudiés

d(mm)	a(mm)	$\sigma_{eq}$ (MPa)	$\sigma_{yy}$ (MPa)	$\sigma_{xy}$ (MPa)
0	5	12.057	4.747	6.83
0	10	9.177	4.75	5.209
0	15	7.692	3.78	4.374
<b>0</b>	<b>20</b>	<b>6.774</b>	<b>3.228</b>	<b>3.849</b>
0.5	5	29.415	24.171	14.511
0.5	10	29.424	23.211	14.694
0.5	15	29.435	22.894	14.756
0.5	20	29.429	22.775	14.774
1.0	5	29.377	29.869	13.391
1.0	10	29.38	29.583	13.451
1.0	15	29.381	29.487	13.472
1.0	20	29.377	29.448	13.478

Tableau IV.5 Récapitulation des contraintes maximales.



(a)



(b)

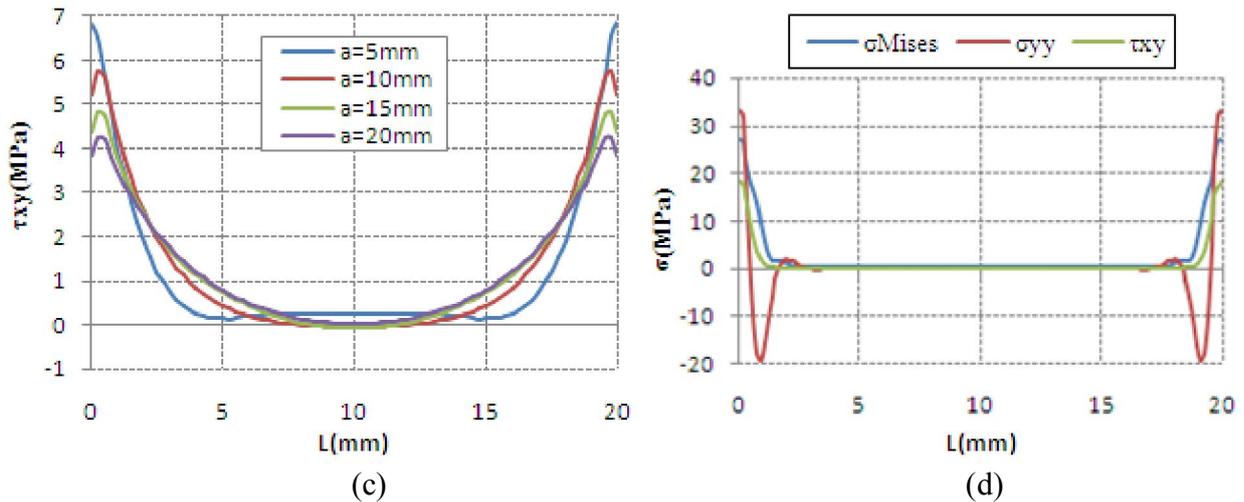


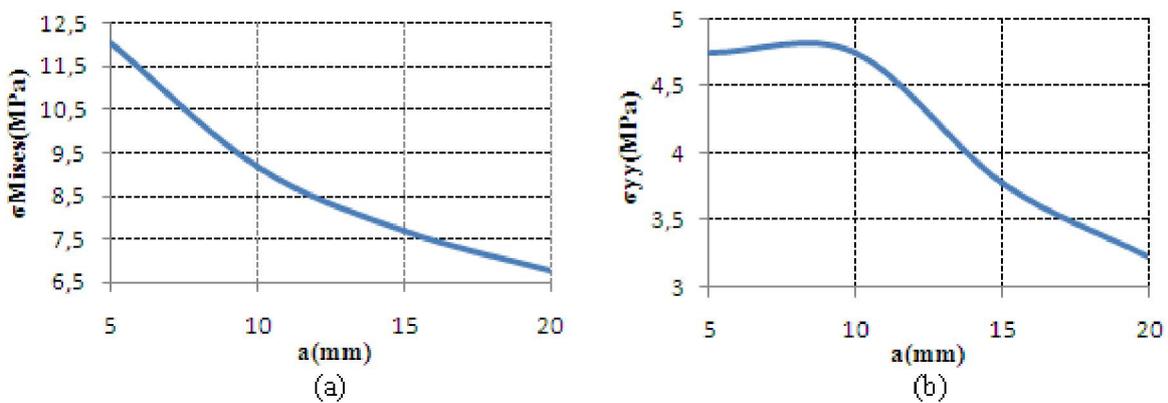
Figure IV.6 Distribution des contraintes dans la couche adhésive suivant la ligne A-B :  
 (a)  $\sigma_{eq}$  ; (b)  $\sigma_{yy}$  ; (c)  $\tau_{xy}$  ; (d) JSR à bord droit

Les contraintes équivalentes ( $\sigma_{eq}$ ), de pelage ( $\sigma_{yy}$ ) et de cisaillement ( $\sigma_{xy}$ ) suivant la ligne A-B de la longueur de recouvrement  $L = 20\text{mm}$  sont représentées dans la figure IV.6

Un examen général de cette figure a révélé que les contraintes maximales sont situées aux extrémités à  $L = 0$  et  $L = 20\text{mm}$  donc aux extrémités de la longueur de recouvrement ce qui équivaut à l'effet de bords ou singularités des joints.

Selon les figures IV.6 (b) et (c) la contrainte maximale de décollement est de  $32.99\text{MPa}$  pour le cas où  $a = 0$  qui est 10.22 plus importante que pour le cas où  $a = 20\text{mm}$  où on constate une contrainte de décollement de  $3.228\text{MPa}$ .

On constate aussi dans les figure IV.3(a) et (c) que les courbes des contraintes de Von Mises et de cisaillement s'aplatissent quand la dimension «  $a$  » augmente ce qui a pour conséquence un rétrécissement de la zone (extrémités) de fortes contraintes.



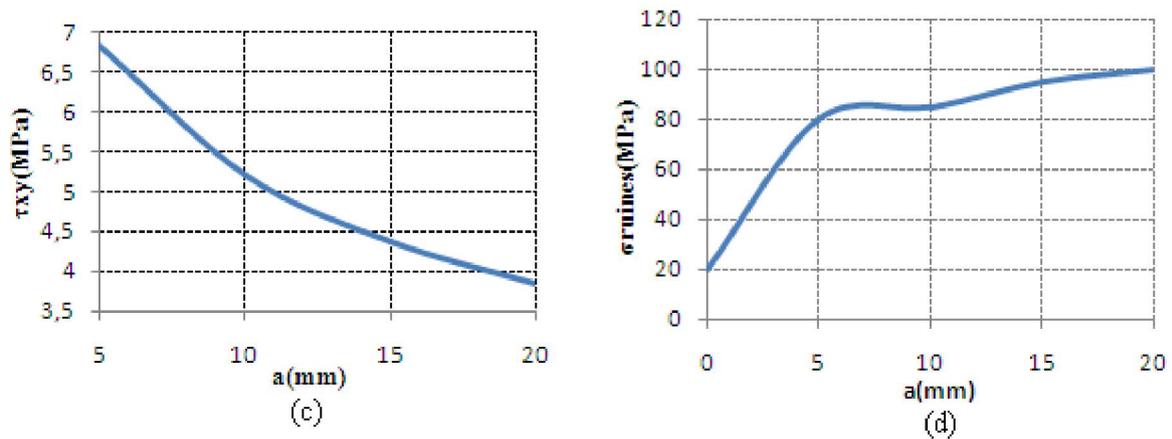


Figure IV.7 (a)σMises - (b)σyy - (c)τxy sous P = 15MPa ; (d)Contraintes de ruine Talon b = 0

Les courbes figureIV-7(a),(b),(c) et(d) montrent explicitement l'accroissement de la résistance du joint par l'augmentation de du biseautage. En effet la charge de ruine passe de 20MPa(Tableau IV.6) pour un joint à bord droit à 100MPa pour un joint biseauté sur toute la longueur de recouvrement(20mm).

Sur la base des résultats on peut conclure que dans notre cas le joint avec un talon b=0mm et une longueur de biseautage égale à la longueur de recouvrement constitue le cas optimal.

l(mm)	L(mm)	b(mm)	d(mm)	a(mm)	σruine(MPa)
100	20	25	0	0	20.0
100	20	25	0	5	80
100	20	25	0	10	85
100	20	25	0	15	95
100	20	25	0	20	100

Tableau IV-6 Contraintes de ruine.

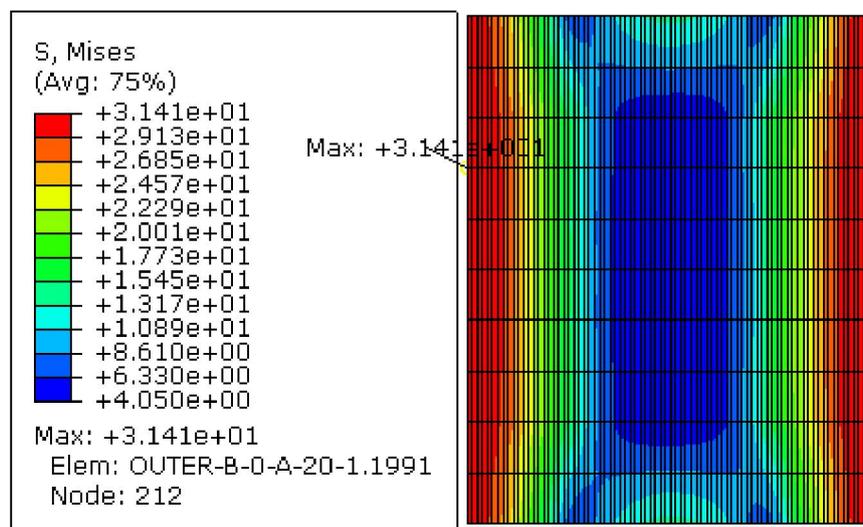


Figure IV.8 Niveau de contrainte le long du joint adhésif a=L=20mm

La figure montre que la plastification de l'adhésif débute à l'extrémité du joint adhésif ce qui confirme l'effet de bords ou singularité.

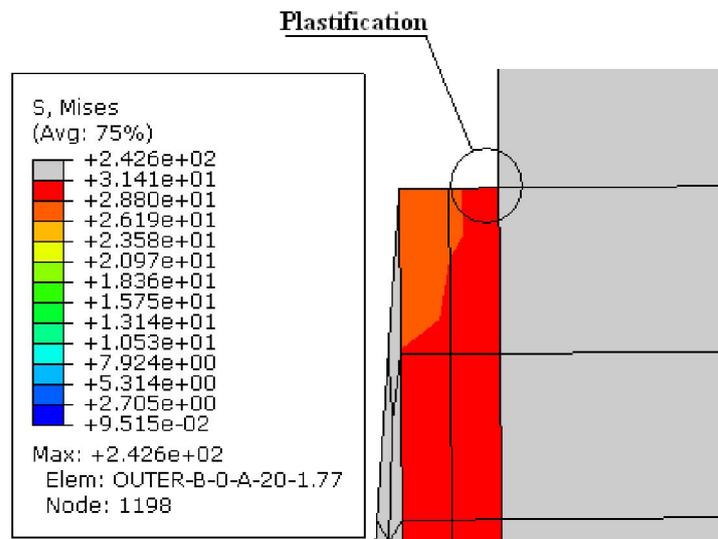


Figure IV.9 Début de plastification de l'adhésif

On constate d'après la figure IV.9 que la plastification commence d'abord aux extrémités de l'adhésif alors que le substrat est encore loin du seuil plastique.

## IV.2 Optimisation par ajout de bourrelet

### IV.2.1 Joint avec bourrelet

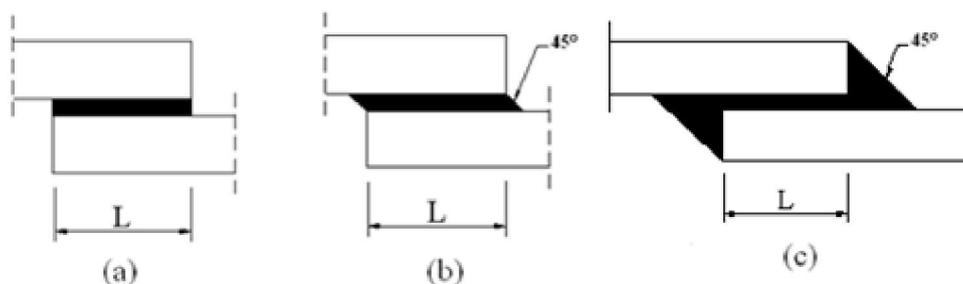


Figure IV.10 Joints avec bourrelet - (a) bord droit - (b) Bourrelet sur adhésif - (c) Bourrelet sur adhérent

Dans le but de comparer les comportements des joints (a),(b) et (c) (figureIV.10) nous avons étudié trois joints différents composés d'adhérents en aluminium 2024-T3 et d'adhésif en ADEKIT A140 et de dimensions géométriques :  $L=20\text{mm}$  , $b=25\text{mm}$  , $e_s=1.5\text{mm}$  , $e_a =0.15\text{mm}$  .

Les joints sont chargés avec contrainte de traction de 15MPa.

Deux cas de bourrelets concernent notre étude ; l'un avec bourrelet à 45° sur toute la hauteur du substrat (figureIV.10(c)) et l'autre avec un bourrelet sur la hauteur de l'adhésif (figureIV.10(b)).

Les figuresIV.11, IV.12 et IV.13 montrent le comportement des joints étudiés.

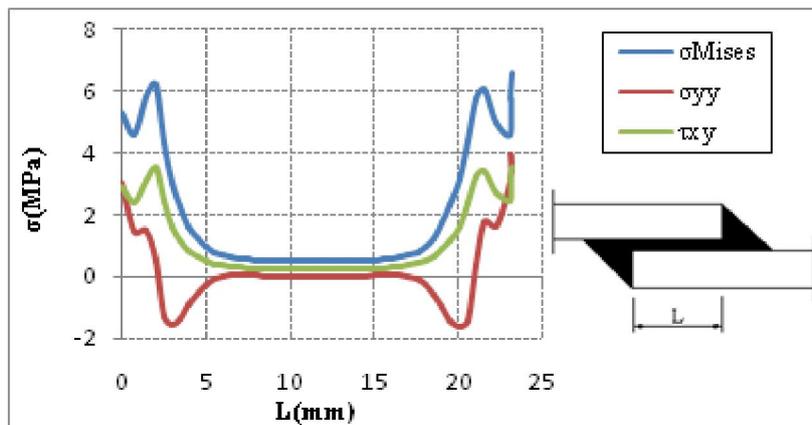


Figure IV.11 Joint avec bourrelet sur adhérent

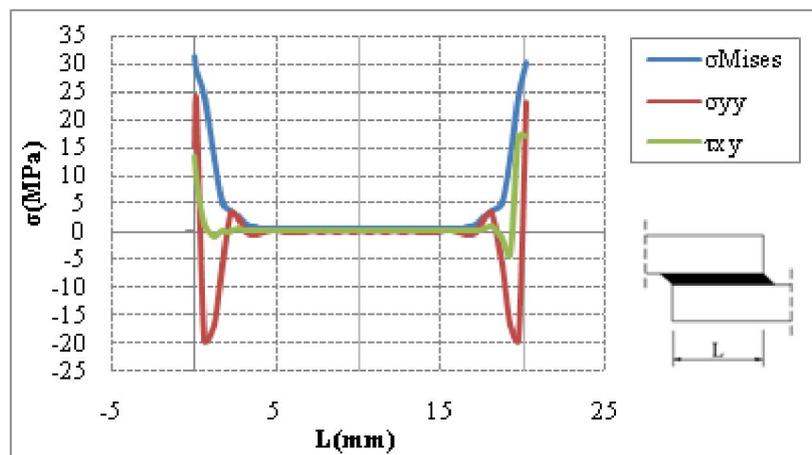


Figure IV.12 Joint avec bourrelet sur adhésif

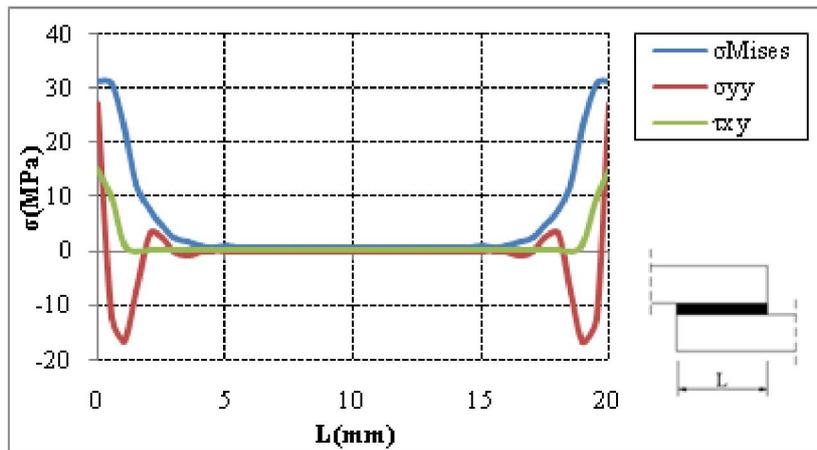


Figure IV.13 Joint à bord droit

D’après les figures IV.11, IV.12 et IV.13 on constate immédiatement que le joint avec bourrelet sur toute la hauteur de l’adhérent subit les contraintes de Von Mises, de pelage, et de cisaillement les plus faibles et par conséquent il constitue le modèle de joint le plus résistant.

En comparant le joint à bord droit avec le joint à bourrelet sur adhésif on constate que l’ajout du bourrelet sur adhésif (Figure IV.10) apporte une amélioration par rapport au joint à bord droit de 16% (Tableau IV.7) concernant la contrainte de pelage.

Joint	$\sigma_{Mises}$	$\sigma_{yy}$	$\sigma_{xy}$
Joint à bord droit(1)	31.404	27.219	14.852
Bourrelet sur adhésif(2)	30.199	23.475	17.166
Bourrelet sur adhérent(3)	6.570	3.962	3.572

Tableau IV.7 Contraintes maximales des joints(a), (b) et (c)

On remarque d’après les figures IV.14 et IV.15 que la plastification apparaît en premier lieu à l’extrémité de la colle puis se propage avec l’accroissement du chargement.

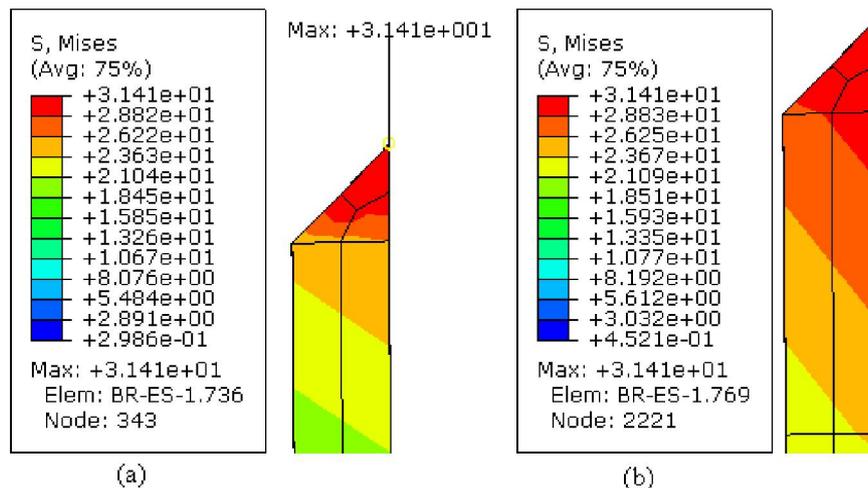


Figure IV.14 Plastification du joint-Bourrelet sur adhésif-(a)P=10MPa et (b)P=15MPa

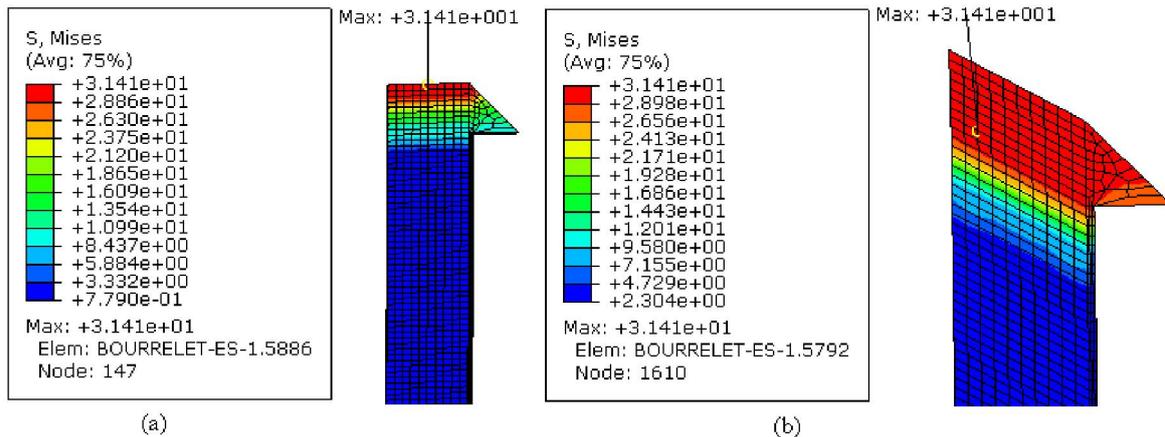


Figure IV.15 Plastification du joint-Bourrelet sur substrat-(a)P=20MPa et (b)P=60MPa

### IV.2.2 Optimisation du joint à bourrelet sur adhérent

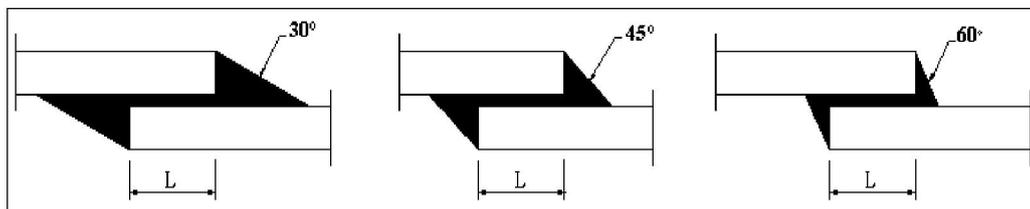


Figure IV.16 Joint avec bourrelet à  $30^\circ$  -  $45^\circ$  -  $60^\circ$

Sur la base des résultats des études sur les joints à bourrelet qui ont fait ressortir comme joint optimal celui avec bourrelet à  $45^\circ$  sur toute la hauteur de l'adhérent, nous avons jugé intéressant d'optimiser d'avantage le joint en modifiant l'angle du bourrelet.

A cet effet nous choisis trois angles caractéristiques à savoir  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , et  $60^\circ$ .

La figure IV.16 représente les joints étudiés.

Les figures IV.17, IV.18 et IV.19 représentent les allures des courbes concernant les contraintes de Von Mises, de pelage et de cisaillement.

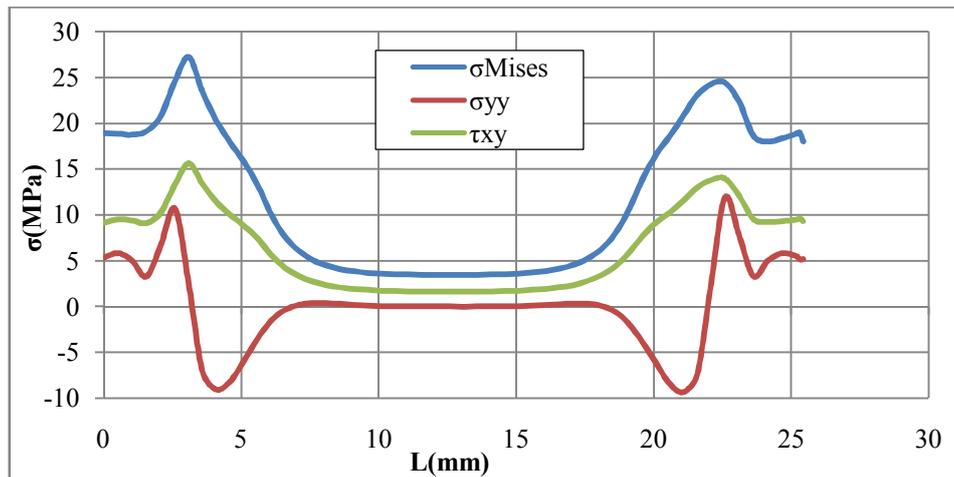


Figure IV.17 Bourrelet à 30%

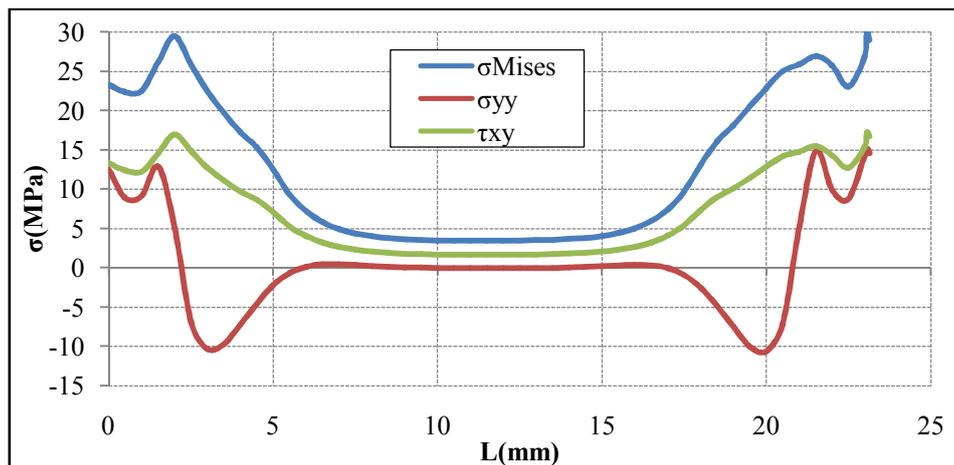


Figure IV.18 Bourrelet à 45%

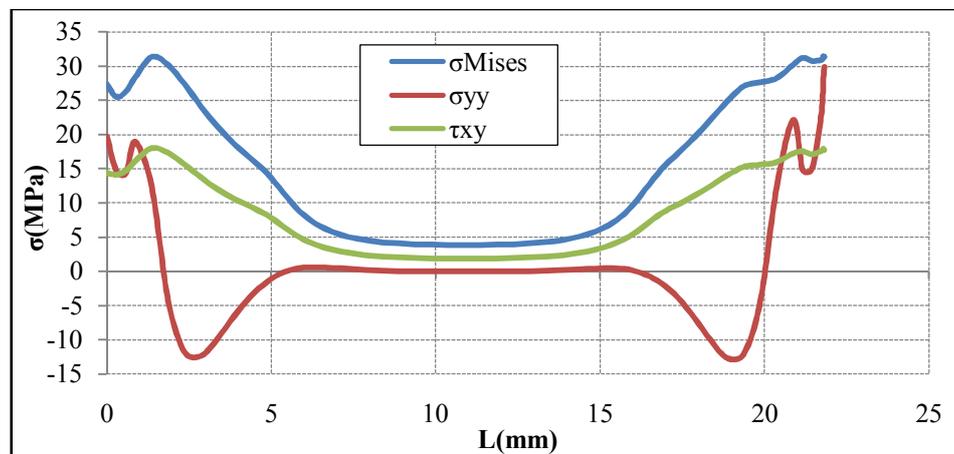


Figure IV.19 Bourrelet à 60%

Les résultats récapitulatifs sont donnés sur la figure III-47

On constate que sur la figure IV.20(b) que plus l'angle du bourrelet augmente, plus la résistance du joint diminue avec une diminution plus accentuée pour la contrainte de pelage.

Ceci s'explique par le fait que la surface de collage diminue avec l'accroissement de l'angle du bourrelet.

La figureIV.20(a) montre l'allure de la courbe de ruine dont la pente s'accroît avec l'augmentation de l'angle du bourrelet.

A noter que  $P_{max}$ (figureIV-20(a)) correspond à la valeur du chargement lorsque  $\sigma_{Mises}$  atteint le palier de plastification de l'adhésif qui est dans notre cas égal à 31.41MPa pour les trois cas étudiés .

Effectivement entre  $30^\circ$  et  $45^\circ$  constate une diminution de la contrainte de ruine de 10MPa et entre  $45^\circ$  et  $60^\circ$  une diminution de la contrainte de ruine de 20MPa.

Sur la lumière des résultats le joint avec un angle du bourrelet de  $30^\circ$  constitue le cas optimal.

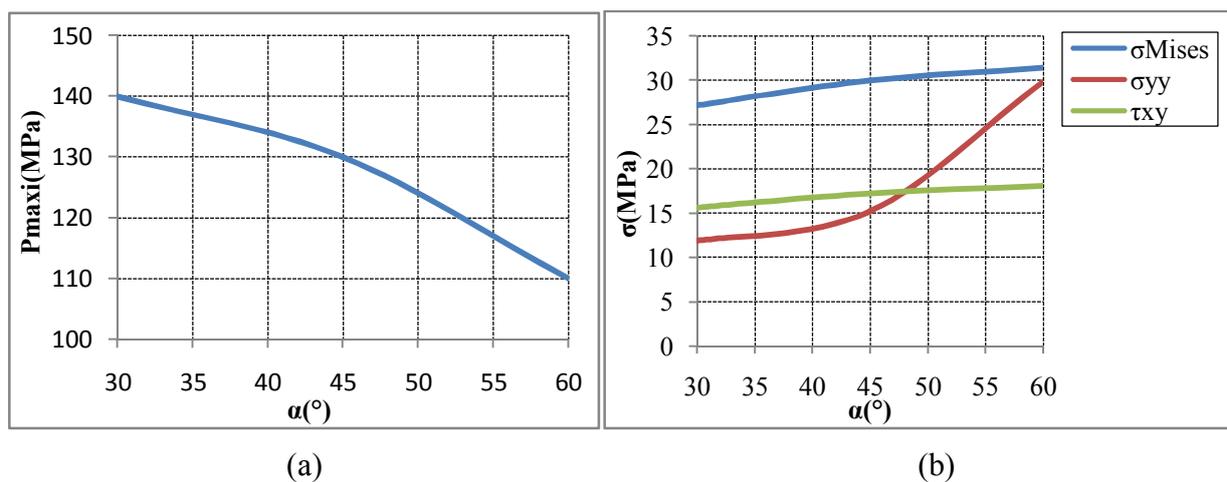


Figure IV.20 (a) Charges pour lesquelles l'adhésif se plastifie (b) contraintes  $\sigma_{Mises}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\tau_{xy}$

**IV.3 Joint avec ondulation**

Le joint étudié comporte 02 adhérents en Aluminium 2024T3 et un adhésif en ADEKITA140.

Les dimensions des joints étant de 20mm pour la longueur de recouvrement, 25mm pour la largeur du joint, 1.5mm pour les épaisseurs des substrats et 0.15mm pour l'épaisseur de la colle. La partie ondulée de rayon 17.5mm commence avec un angle de  $12^\circ$ (figureIV.21(a)).

Le chargement des joints en tension est égal à 15MPa. On remarque suivant la figureIV-21(a) que les forces de tension sont alignées ce qui a pour effet l'élimination du moment généralement induit par l'excentrement de la contrainte de chargement.

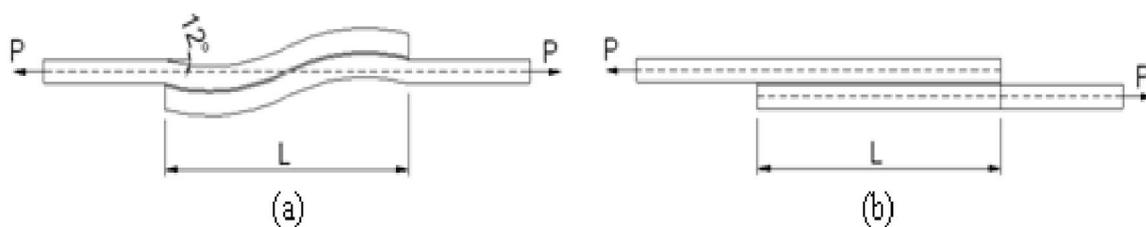
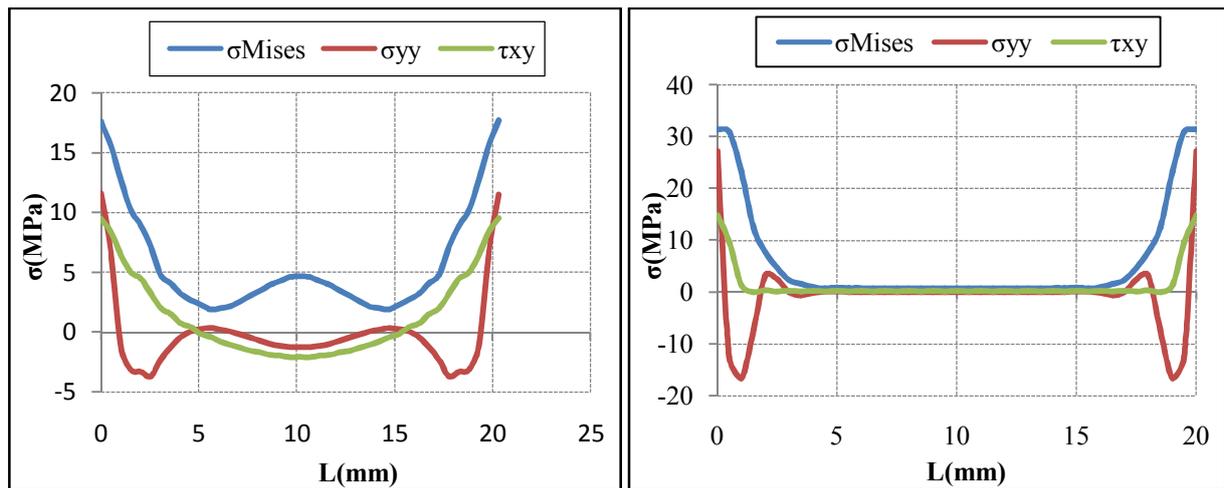


Figure IV.21 (a) joint ondulé - (b) joint droit



(a) (b)  
Figure IV.22 Courbes de contraintes (a)- Joint ondulé-(b)Joint à bord droit

	$\sigma_{Mises}$	$\sigma_{pelage}$	$\sigma_{cisaillement}$
L-ondulée	17,6843	11,507	9,52068
L-droite	31,4042	27,2192	14,8521
%	77	136	56

Tableau IV.8 Contraintes maximales dans les joints(a) et (b)

Sur la base des résultats de la figures IV.22(a) et (b) nous pouvons déduire que l’ajout des ondulations des joints au niveau de la longueur de recouvrement apporte une amélioration appréciable aux valeurs des différentes contraintes.

On remarque par exemple pour les contraintes des améliorations de 77% pour la contrainte de Von Mises, 136% pour la contrainte de pelage et 56% pour la contrainte de cisaillement.

Ces améliorations sont dues vraisemblablement à l’absence du moment induit par l’excentrement des forces de tension et à l’augmentation de la surface de collage plus importante à cause des ondulations. On remarque aussi d’après les courbes que les ondulations ont pour effet l’augmentation des zones d’extrémité de la longueur de recouvrement ce qui a pour effet une résistance accrue du joint.

**IV.4 Influence de la surface de collage**

Afin de vérifier l’influence de la surface de collage sur la contrainte de rupture, nous avons étudié trois joints collés à simples recouvrements par éléments finis en utilisant Abaqus.

Les caractéristiques des joints sont les suivantes :

- Substrats en Aluminium 2024-T3 et adhésif en ADEKIT A140
- Longueur de recouvrement L = 22.5mm

- Epaisseur adhésif  $e_a = 0.1\text{mm}$
- Epaisseurs substrats  $e_s = 1.5\text{mm}$
- Largeur du joint  $b = 25\text{mm}$

Trois cas de joints ont été étudiés :

1. Un joint avec collage sur toute la surface de recouvrement (figure IV.23).
2. Un joint avec un évidement de la colle de longueur 13.5mm au milieu de la longueur de recouvrement (figure IV.24).
3. Un joint avec deux évidements symétriques de la colle de longueurs 4.25mm (figure IV.25).

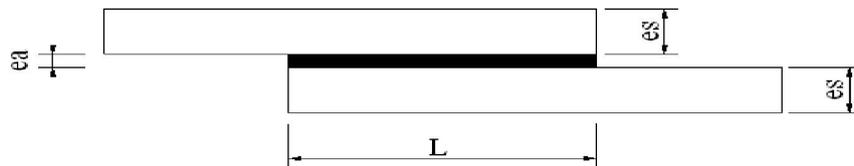


Figure IV.23 Joint sans évidement

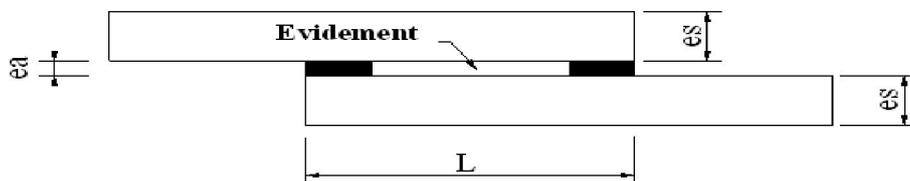


Figure IV.24 Joint avec un évidement

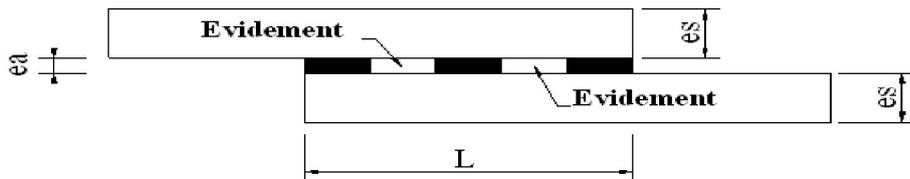


Figure IV.25 Joint avec deux évidements

Du fait que les zones extrêmes du joint sont celles qui supportent essentiellement le chargement appliquée, la surface de collage n'a pas une grande influence sur la résistance du joint.

En effet sur la base des résultats de notre étude, les chargements provoquant la rupture 31.41MPa (voir figures IV.26, IV.28 et IV.30) des trois joints ont été trouvés égaux à une contrainte de 11.25MPa ce qui confirme que la résistance de Von Mises est constante et indépendante de la surface de collage entière ou en parties évidée.

On déduit aussi de ce résultat que le fait de diviser le chargement de rupture par la surface de recouvrement n'a aucun sens.

On remarque aussi que les allures des courbes des contraintes de Von Mises (figures III.53, III.55 et III.57) sont quasiment identiques et que les contraintes se concentrent aux bords.

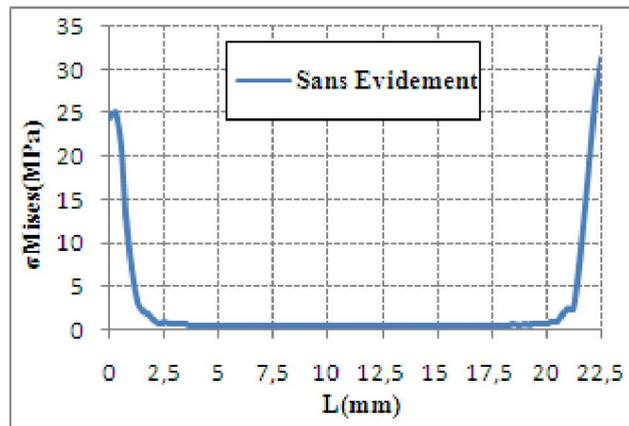
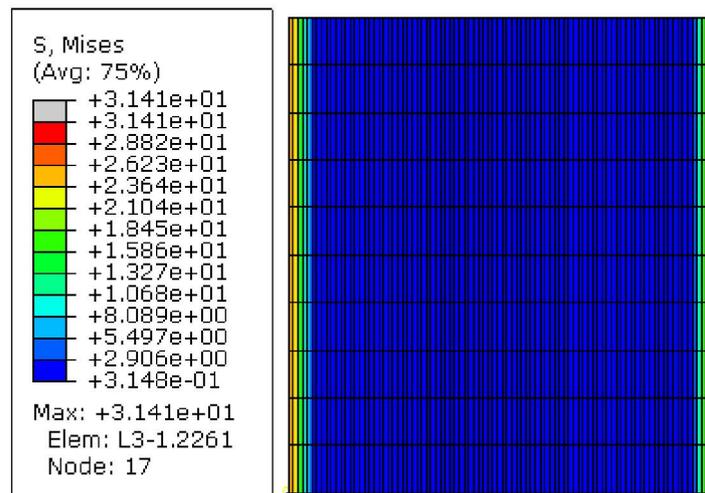


Figure IV.26 Contrainte de Von Mises

Joint à simple recouvrement sans évidement



Max: +3.141e+001

Figure IV.27 Niveau de contraintes  $\sigma_{Mises}$ -Résultat Abaqus

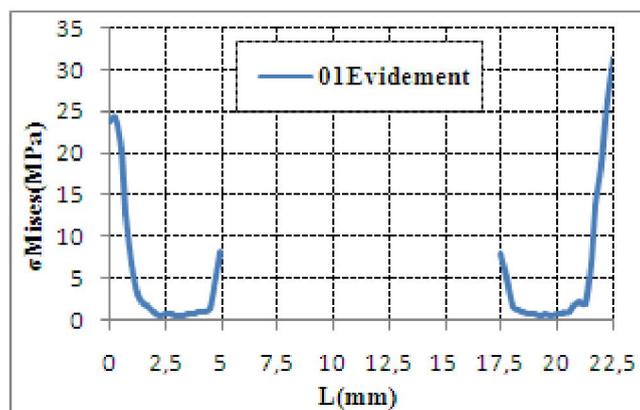


Figure IV.28 Contrainte de Von Mises

Joint à simple recouvrement avec 01 évidement

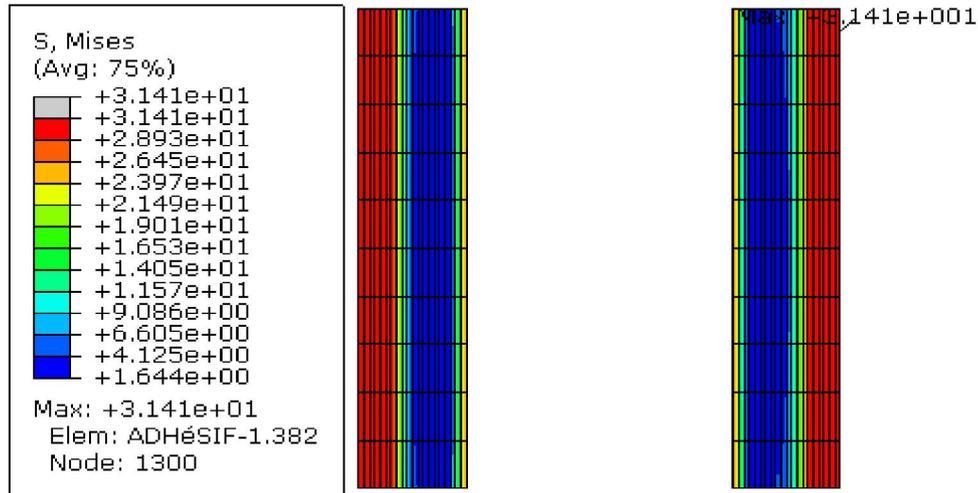


Figure IV.29 Niveau de Contrainte  $\sigma$ Mises-Résultat Abaqus

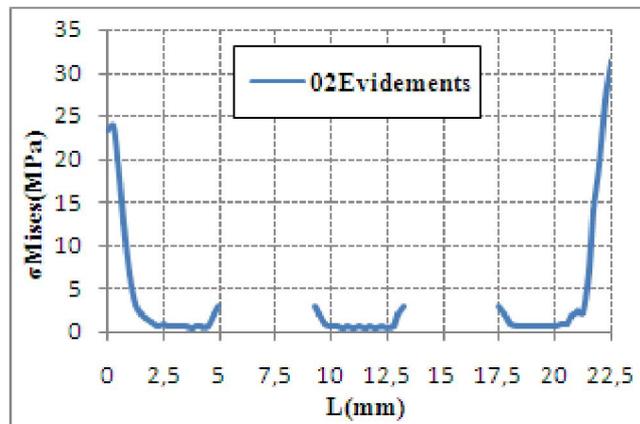


Figure IV.30 Contrainte de Von Mises

Joint à simple recouvrement avec 02 évidements

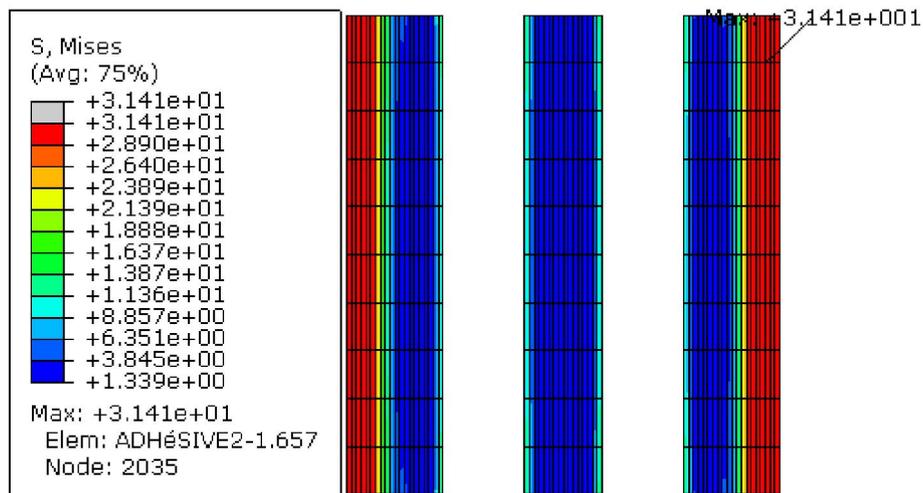


Figure IV.31 Contrainte de  $\sigma$ Mises-Résultat Abaqus

# Conclusion et perspectives

L'objectif de notre mémoire est l'étude de l'influence de la forme du joint d'adhésif et la plaque sur la réduction des contraintes dans l'adhésif. A cet effet, on a procédé à des simulations numériques par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel (Abaqus) et par des méthodes analytiques. Les effets des paramètres géométriques des éléments d'assemblage ont été mis en évidence. Les résultats obtenus nous permettent de déduire les conclusions suivantes:

Cette étude nous a permis d'acquérir de nouvelles connaissances concernant la technique d'assemblage par collage ; discipline récente, intéressante et en permanente évolution.

De telles connaissances se sont réalisées par la consultation d'ouvrages et de publications se rapportant à ce sujet et aussi par l'assimilation et l'application des analyses analytiques et théories de scientifiques spécialisés dans cette discipline tels que MM.Volkersen, Roland , Reissner, Hart, smith etc..

L'analyse par éléments finis nous a permis de nous initier à l'apprentissage d'un nouveau logiciel de calcul en l'occurrence le code ABAQUS , outil puissant , utile et d'une grande efficacité.

Les différents chapitres nous ont permis successivement de connaître l'historique et l'évolution du collage à travers le temps tant sur les plans de l'élaboration, de la caractérisation du joint et des domaines d'application du collage tel que l'aéronautique, l'automobile pour ne citer que ceux là.

A travers les études analytiques et numériques nous avons pu comprendre plus clairement le fonctionnement mécanique où transfert des efforts à travers le joint à simple recouvrement et par suite de mettre en exergue les paramètres fondamentaux essentiels aux différentes analyses notamment les contraintes équivalentes, de pelage et de cisaillement.

L'optimisation des joints collés est obtenue en variant les dimensions du joint tel que longueur de recouvrement, épaisseurs des adhérents et adhésifs etc. , en modifiant les formes géométriques par biseautage intérieur et externe des adhérents ou le profil de l'adhésif comme par exemple l'ajout de bourrelets aux extrémités du joint.

Les enseignements à tirer de l'analyse des dimensions du joint à bord droit est que la longueur de recouvrement et l'épaisseur des adhésifs constituent les principaux paramètres à modifier pour obtenir des dimensions optimales c'est-à-dire une augmentation la résistance du joint accompagné d'un choix économique.

Le biseautage externe sans talon des adhérents exécuté sur toute la longueur de recouvrement donne les meilleurs résultats pour l'atténuation des singularités ou effets de bords.

L'ajout de bourrelets sur toute la hauteur de l'épaisseur de l'adhérent diminue notablement les contraintes de Mises, de pelage et de cisaillement.

Le maillage constitue aussi un facteur déterminant sur la précision des résultats. A cet effet le nombre de mailles minimal préconisé pour l'épaisseur de l'adhésif est de trois.

Concernant les bords du joint, ils doivent comporter un maillage nettement plus fin par rapport aux autres endroits car les contraintes maximales se situent exclusivement aux extrémités de la longueur de recouvrement.

Dans les travaux des recherches actuelles, les adhérents et l'adhésif sont les principaux composants des joints collés à simple recouvrement, ils sont considérés comme élastiques et isotropes mais le même modèle d'éléments finis peut être étendu à n'importe quelle autre propriété telle que le matériau orthotropique ou viscoélastique pour l'un des composants.

En outre le travail peut être enrichi en considérant des formes plus complexes tel que le raidissement des adhérents sur la longueur de recouvrement à l'aide de simples plis ou ondulations à l'instar des tôles nervurés ou carrosseries de voiture. De tels procédés permettent d'accroître la rigidité. On peut également imaginer des formes qui nous permettent de réduire les effets du moment induit par l'excentrement des forces appliquées ce qui procure d'avantage de résistance à l'assemblage et à ce sujet nous pouvons citer l'exemple du joint comportant des ondulations étudié dans ce mémoire.

La rugosité extérieure des adhérents peut également être considérée en tant qu'un des facteurs influents dans l'étude paramétrique. Le frottement entre l'adhésif et les adhérents dans le joint collé peut également être inclus dans le modèle en utilisant des propriétés de contact dans l'analyse par éléments finis.

Par ailleurs il ne faut pas perdre de vue que les analyses par éléments finis ne peuvent à elles seules suffire pour donner des résultats précis; des travaux expérimentaux sont nécessaires car ils nous orientent vers les résultats qui se rapprochent le plus du comportement réel du joint.