الجمهـوريـــة الجزائـريـــة الديمقـراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـيـــم العـــالـــي والبـحـــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle et Eléctromécanique

Thème

Le renforcement des assemblages collés avec couvre-joint

Présenté et soutenu publiquement par :

BENMALEK Mohammed Mokhtar & BELMILOUD Abdesslam

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BELARIFI farid	PR	UNIV. D'ORAN 2	**Président**
BACHIR BOUIADJRA Bachir	MCA	UNIV. D'ORAN 2	**Encadreur**
ACHACHE habib	PR	UNIV. D'ORAN 2	**Examinateur**

Année 2025/2026

Remerciement

Nous remercions avant tout **Allah**, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos **chers parents** pour leur soutien, leurs sacrifices et leurs encouragements tout au long de notre parcours universitaire.

Nos sincères remerciements s'adressent également à notre encadrant, **Mr. Bachir Bouiadjra Bachir**, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Résumé :

Ce travail de fin d'études est consacré à l'étude et à l'optimisation des performances mécaniques des assemblages collés renforcés par un couvre-joint, une solution de plus en plus privilégiée dans les secteurs industriels de pointe tels que l'aéronautique et les transports. Les technologies d'assemblage collé offrent des avantages majeurs, notamment une répartition plus continue des efforts et une réduction significative de la masse structurale par rapport aux fixations mécaniques traditionnelles (rivets, vis). Cependant, ces jonctions restent particulièrement vulnérables aux concentrations de contraintes de cisaillement et de pelage localisées aux extrémités du joint adhésif, favorisant l'amorce de fissures sous chargements statiques ou cycliques. À travers une approche méthodologique combinant un état de l'art approfondi et une modélisation numérique tridimensionnelle sous le logiciel ABAQUS, ce mémoire analyse l'impact des paramètres géométriques (longueur de recouvrement, épaisseur) et matériels sur la distribution des contraintes à l'interface adhésive. Les simulations numériques menées sur des plaques en alliage d'aluminium 2024-T3 assemblées avec la colle Adekit A140 permettent de quantifier le gain mécanique apporté par l'ajout du couvre-joint. Les résultats mettent en évidence l'influence cruciale de la forme et de la disposition du renfort (parallèle ou perpendiculaire au chargement) sur l'atténuation des pics de contrainte. Enfin, des recommandations de conception et de maintenance sont formulées pour maximiser la durabilité, la tolérance aux dommages et la fiabilité à long terme de ces liaisons en environnements industriels sévères.

Mots-clés : Assemblage collé, Couvre-joint, Modélisation numérique, ABAQUS, Concentrations de contraintes, Cisaillement, Pelage, Maintenance Industrielle.

Abstract :

This master's thesis focuses on the mechanical performance evaluation and optimization of bonded joints reinforced with a strap (couvre-joint), a repair and strengthening technique widely adopted in high-tech industries such as aerospace and transportation. Adhesive bonding technologies offer significant advantages, including a continuous load distribution and weight reduction compared to conventional mechanical fasteners (rivets, bolts). However, these structural joints remain highly susceptible to high shear and peeling stress concentrations localized at the edges of the adhesive layer, leading to crack initiation under static or cyclic loading. Using a dual approach that combines an in-depth literature review and a three-dimensional finite element analysis (FEA) using ABAQUS software, this study investigates the impact of geometric configurations (overlap length, thickness) and material properties on stress distributions at the adhesive interface. Numerical simulations conducted on 2024-T3 aluminum alloy plates bonded with Adekit A140 adhesive quantify the mechanical gain provided by the reinforcement strap. The findings highlight the critical influence of the strap's geometry and placement (parallel or perpendicular to the loading direction) on mitigating peak stresses. Finally, structural design guidelines and maintenance

recommendations are established to maximize durability, damage tolerance, and long-term reliability under severe operating conditions.

Keywords: Bonded joint, Reinforcement strap, Finite Element Method (FEM), ABAQUS, Stress concentrations, Shear stress, Peeling, Industrial maintenance.

الملخص:

تتمحور هذه المذكرة حول دراسة وتحسين الأداء الميكانيكي للوصلات الملصقة المعززة بغطاء المفصل(couvre-joint) ، وهي تقنية شائعة الاستخدام في القطاعات الصناعية المتقدمة مثل صناعة الطيران والنقل. توفر تقنيات اللصق الهيكلي مزايا رئيسية مقارنة بوسائل التثبيت التقليدية (كالبراغي والبرشمة)، أبرزها التوزيع المنتظم للإجهادات وتخفيف الوزن الإجمالي للهياكل. ومع ذلك، تظل هذه الوصلات حساسة للغاية لتركيزات إجهادات القص والتقشير (pelage) المتمركزة عند أطراف طبقة المادة اللاصقة، مما يحفز ظهور التشققات تحت تأثير الأحمال الساكنة أو الديناميكية المتكررة.

من خلال نهج يعتمد على مراجعة شاملة للأدبيات العلمية والنمذجة الرقمية ثلاثية الأبعاد باستخدام برنامجABAQUS ، تقيد هذه الدراسة تأثير المعايير الهندسية (مثل طول التداخل والسمك) وخصائص المواد على توزيع الإجهادات عند السطح البيني للاصق. حيث سمحت المحاكاة الرقمية التي أُجريت على صفائح من سبيكة الألمنيوم 2024 T3-والموصولة بغراء Adekit A140بتحديد القياس الكمي للكسب الميكانيكي الذي يوفره غطاء المفصل. أظهرت النتائج الأهمية البالغة لشكل وموقع التعزيز (سواء كان موازيًا أو عموديًا على اتجاه التحميل) في تقليص ذروة الإجهادات. وفي الختام، تم صياغة توصيات هندسية وتوجيهات صيانة تهدف إلى رفع مستويات الديمومة، ومقاومة الكلال، وضمان الموثوقية طويلة الأمد لهذه الوصلات الهيكلية في البيئات الصناعية القاسية .

الكلمات المفتاحية :الوصلات الملصقة، غطاء المفصل، النمذجة الرقمية، ABAQUS، تركيز الإجهادات، القص، التقشير، الصيانة الصناعية.

.

Sommaire :

Remerciement .....

Résumé :.....

Introduction Générale : **1**

Chapiter I : Technique du collage..... 3

I.1. context et motivation: 3

1.1. Définition du couvre-joint : 3

1.1.1. Patch :.....3

1.1.2. Doublure : 6

1.1.3. Renfort secondaire : 7

1.2. Enjeux industriels :.....8

1.2.1.Réparation structurale :.....8

1.2.2.Renforcement localisé : 8

1.2.3.Amélioration de la tenue mécanique : 9

1.3. Avantages par rapport aux autres méthodes de renforcement : 9

1.3.1.Géométrie simple et continuité structurale : 9

1.3.2.Absence de perçage et limitation des concentrations de contraintes :.....9

1.3.3.Facilité de mise en œuvre industrielle :.....9

1.3.4.Optimisation du rapport résistance/masse : 9

1.3.5.Compatibilité avec les matériaux modernes :.....9

I.2. Problématique scientifique: 10

2.1. Mécanismes de transfert de charge dans les assemblages à couvre-joint: 10

2.2. L'optimisation de conception: 11

2.3. Interaction entre le joint principal et le couvre-joint:.....12

2.4. Durabilité et vieillissement des assemblages renforcés:.....13

Chapitre II : État de l'art approfondi..... **15**

II.1. Typologie des couvre-joints: 15

1.1.Classification par matériaux: 15

1.1.1.Couvre-joints métalliques : 16
1.1.2.Couvre-joints composites : 16
1.1.3.Couvre-joints hybrides (métal–composite) : 17
1.2.Classification des couvre-joints selon la géométrie : 21
1.2.1.Couvre-joints rectangulaires : 22
1.2.2.Couvre-joints circulaires ou ovales : 23
1.2.3.Couvre-joints profilés : 24
1.2.4.Formes optimisées : 25
1.3.Classification des couvre-joints selon la fonction : 25
1.3.1.Renforts structuraux : 26
1.3.2.Réparation de dommages : 26
1.3.3.Renforts anti-fatigue : 28
II.2. Mécanique des assemblages avec couvre-joint : 29
2.1. Théories analytiques de transfert de charge : 29
2.2. Distribution de contraintes dans les assemblages multi-matériaux : 33
2.3. Effets de bord et concentrations de contraintes : 35
2.4. Comportement en fatigue et tolérance aux dommages : 39
II.3. Technologies de mise en oeuvre: 41
3.1. Technique de collage(positionnement,pression,temperature): 41
3.1.1. Positionnement des pièces: 41
3.1.2. Pression appliquée lors du collage: 41
3.1.3. Température de collage et de durcissement: 43
3.2. Préparation des surfaces (traitements mécaniques, chimiques): 44
3.2.1 Objectifs de la préparation des surfaces: 44
3.2.2. Traitements mécaniques des surfaces: 44
3.2.3. Traitements chimiques des surfaces: 47
3.3. Contrôles non destructifs des interfaces: 50
3.3.1. Contrôle ultrasonore: 51
3.3.2. Thermographie infrarouge active: 52

3.3.3. Shearographie laser: 54
3.3.4. Radiographie et micro-tomographie X : 54
3.4. Compatibilité avec les procédés industriels: 55
Chapitre III Objectifs de la recherche 56
III.1 Objectifs principaux : 56
1.1. Comprendre les mécanismes fondamentaux de renforcement par couvre-joint : 56
1.2. Développer des modèles prédictifs pour la conception optimale : 57
1.3. Évaluer expérimentalement les performances : 57
1.4. Établir des recommandations de conception pour applications industrielles : 58
III.2. Objectifs spécifiques: 58
2.1. Quantifier le gain mécanique en fonction des paramètres du couvre-joint: 58
2.1.1. Comment quantifier le gain mécanique: 58
2.1.2. Influence des paramètres du couvre-joint: 59
2.2. Analyser la sensibilité aux paramètres géométriques et matériaux: 60
2.3. Étudier le comportement en environnement sévère: 61
2.4. Évaluer la fiabilité à long terme: 61
Chapitre IV : Approche numérique 63
IV.1. Introduction : 63
IV.2. Modules : 63
2.1. Module PART : 64
2.2. Module PROPERTY : 67
2.3. Module ASSEMBLY : 70
2.4. Module STEP : 72
2.5. Module Interaction : 73
2.6. Module LOAD : 76
2.7. Module MESH : 78
2.8. Module JOB : 80
2.9. Module VISUALIZAION : 82
Conclusion générale : 101
Références bibliographies : 103

Liste des figures :

Chapitre I : Technique du collage

Figure 1.1 : Couvre-joint patch
Figure 1.2 : Schéma de réparation par patch externe
Figure 1.3 : Schéma de la réparation biseautée par patch intérieur
Figure 1.4 : Procédé final pour la réparation par patchs mous
Figure 1.5 : Schéma de principe du montage de réparation par patchs durs
Figure 1.6 : Couvre-joint Doublure
Figure 1.7 : Couvre-joint renfort secondaire
Figure 1.8 : Renforcement localisé
Figure 1.9 : Avant et après renforcement localisé
Figure 1.10 : les Contraintes cisaillement et pelage

Chapitre II : État de l'art approfondi

Figure 2.1 : Classification par matériaux
Figure 2.2 : Composition d'un matériau composite
Figure 2.3 : Exemple de stratifié hybride métal-composite
Figure 2.4 : Microstructure d'un composite unidirectionnel
Figure 2.5 : Construction d'un patch composite et d'un stratifié (séquence d'empilement [0/±45/90])
Figure 2.6 : Différents types d'orientation des fibres dans les composites
Figure 2.7 : Classification des couvre-joints selon la géométrie
Figure 2.8 : Modélisation tridimensionnelle d'un assemblage collé renforcé par un couvre-joint rectangulaire et directions des contraintes de cisaillement
Figure 2.9 : Couvre-joint rectangulaire
Figure 2.10 : Couvre-joint circulaire
Figure 2.11 : Assemblage collé renforcé par un couvre-joint ovale
Figure 2.12 : Couvre-joint biseauté optimisé
Figure 2.13 : Renforcement structural d'un assemblage collé par l'ajout d'un couvre-joint pour

augmenter la capacité de charge de la structure
Figure 2.14 : Réparation de dommages structuraux par patch composite collé
Figure 2.15 : Réparation de dommages
Figure 2.16 : Distribution des contraintes (FEM)
Figure 2.17 : Comparaison de la distribution des contraintes autour d'un dommage avec et sans patch collé
Figure 2.18 : Réparation anti-fatigue d'une structure aéronautique par patch composite
Figure 2.19 : Volkersen model
Figure 2.20 : Distribution des contraintes selon Volkersen
Figure 2.21 : Goland & Reissner model
Figure 2.22 : Contraintes de pelage (Goland-Reissner)
Figure 2.23 : Géométrie d'un assemblage à couvre-joint multi-matériaux
Figure 2.24 : Distribution des contraintes dans l'assemblage (résultats FEM)
Figure 2.25 : Comparaison entre modèle analytique et résultats FEM
Figure 2.26 : Patch effilé permettant de réduire les concentrations de contraintes
Figure 2.27 : Configurations de patchs effilés (tapered patches) pour la réduction des concentrations de contraintes
Figure 2.28 : Effet des congés adhésifs (fillets) sur la réduction des concentrations de contraintes
Figure 2.29 : Concentration des contraintes aux extrémités et redistribution par modification géométrique
Figure 2.30 : Phases d'endommagement en fatigue
Figure 2.31 : Évolution de la vitesse de propagation des fissures
Figure 2.32 : Pression maîtrisée et homogène
Figure 2.33 : Pression insuffisante
Figure 2.34 : Pression inégale
Figure 2.35 : Cinétique de durcissement en fonction de la température
Figure 2.36 : Le ponçage
Figure 2.37 : Le sablage
Figure 2.38 : Brossage métallique
Figure 2.39 : Peel ply et préparation des composites
Figure 2.40 : Dégraissage au solvant

Figure 2.41 : Nettoyage alcalin et détergents
Figure 2.42 : Attaque chimique
Figure 2.43 : Primaires d'adhésion
Figure 2.44 : Anodisation phosphorique des alliages d'aluminium
Figure 2.45 : Traitement par plasma atmosphérique pour l'amélioration de l'adhérence
Figure 2.46 : Contrôle ultrasonore
Figure 2.47 : Thermographie infrarouge active
Figure 2.48 : Shearographie laser
Figure 2.49 : Radiographie / Micro-CT

Chapitre IV : Approche numérique

Figure 4.1 : Le module a réalise
Figure 4.2 : Désignation de la plaque
Figure 4.3 : Création de la plaque
Figure 4.4 : Désignation de l'épaisseur
Figure 4.5 : Confirmation de l'extrusion
Figure 4.6 : Part copy plaque 1
Figure 4.7 : Confirmation de l'extrusion
Figure 4.8 : Création de la colle
Figure 4.9 : Désignation de la colle
Figure 4.10 : Désignation de l'épaisseur de colle
Figure 4.11 : Confirmation de l'extrusion
Figure 4.12 : Création du couvre-joint
Figure 4.13 : Désignation du couvre-joint
Figure 4.14 : Désignation de l'épaisseur du couvre-joint
Figure 4.15 : Confirmation de l'extrusion
Figure 4.16 : Le Module Property
Figure 4.17 : Définition des propriétés du matériau
Figure 4.18 : Définition de la section de la plaque
Figure 4.19 : Sélection de la section
Figure 4.20 : Sélection la pièce entiére

Figure 4.21 : Choix de section
Figure 4.22 : Affectation la section
Figure 4.23 : Sélection la pièce entiére
Figure 4.24 : Choix de section
Figure 4.25 : Affectation la section
Figure 4.26 : Sélection la pièce entiére
Figure 4.27 : Choix de section
Figure 4.28 : Affectation la section
Figure 4.29 : Module ASSEMBLY
Figure 4.30 : Créer une instance
Figure 4.31 : Création de Step
Figure 4.32 : Création display group
Figure 4.33 : Création display group (éléments)
Figure 4.34 : Création la contrainte t1 et choisir les maîtres surfaces (plaques 1 et 2) de la plaque
Figure 4.35 : Modification de la contrainte (t1) et choisir le maître surface (la colle)
Figure 4.36 : Création contrainte t2
Figure 4.37 : Choisir de l'esclave surface (couvre-joint) puis la modification de contrainte (t2)
Figure 4.38 : Résultat d'interaction
Figure 4.39 : Création de l'encastrement
Figure 4.40 : Sélection de la face à encastrer
Figure 4.41 : Affectation de l'encastrement
Figure 4.42 : Création de la force
Figure 4.43 : Sélection de la face de traction
Figure 4.44 : Affectation du champ Magnitude
Figure 4.45 : Module MESH
Figure 4.46 : Affectation la taille des éléments
Figure 4.47 : Affectation le nombre d'éléments
Figure 4.48 : Confirmation de maillage
Figure 4.49 : la première création de Job
Figure 4.50 : la deuxième création de Job

Figure 4.51 : Affichage le message de réussite
Figure 4.52 : Visualisation des résultats

Figure 4.53 : influence de la position du raidisseur sur les contraintes de pelage pour une épaisseur de 5mm, positionné parallèlement à la direction du chargement

Figure 4.54 : influence de la position du raidisseur sur les contraintes de cisaillement pour une épaisseur de 5mm, positionné parallèlement à la direction du chargement

Figure 4.55 : influence de la position du raidisseur sur les contraintes de pelage pour une épaisseur de 5mm, positionné perpendiculairement à la direction du chargement

Figure 4.56 : influence de la position du raidisseur sur les contraintes de cisaillement pour une épaisseur de 5mm, positionné perpendiculairement à la direction du chargement

Figure 4.57 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort en rive de la zone de recouvrement)

Figure 4.58 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort en rive de la zone de recouvrement)

Figure 4.59 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort décalé de 10mm par rapport à l'extrémité du recouvrement)

Figure 4.60 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort décalé de 10mm par rapport à l'extrémité du recouvrement)

Figure 4.61 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort au centre de la zone de recouvrement)

Figure 4.62 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort au centre de la zone de recouvrement)

Figure 4.63 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort en rive de la zone de recouvrement)

Figure 4.64 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort en rive de la zone de recouvrement)

Figure 4.65 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort décalé de 10mm par rapport à l'extrémité du recouvrement)

Figure 4.66 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort décalé de 10mm par rapport à l'extrémité du recouvrement)

Figure 4.67 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort au centre de la zone de recouvrement)

Figure 4.68 : influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort au centre de la zone de recouvrement)

Introduction Générale :

Dans le paysage industriel contemporain, la quête permanente d'optimisation des structures se traduit par un besoin crucial de réduire la masse globale des composants tout en augmentant leur résistance mécanique, leur sécurité et leur durée de vie. Pour répondre à ces exigences, les industries de pointe — à l'instar de l'aéronautique, du transport ferroviaire et des énergies renouvelables — se détournent progressivement des modes de fixation mécanique traditionnels, tels que le rivetage ou le boulonnage, au profit des techniques de collage structural. Le collage présente des atouts techniques indéniables : il assure une excellente continuité structurale, permet d'assembler des matériaux de natures différentes (hybridation métal/composite) en limitant les risques de corrosion galvanique, et évite le perçage des pièces qui introduit intrinsèquement des zones de faiblesse géométrique. Plus encore, il favorise une répartition plus homogène des flux de déformation sur l'ensemble de la surface en contact. Toutefois, la viabilité à long terme de ces liaisons se heurte à une problématique scientifique majeure : l'apparition de fortes concentrations de contraintes aux extrémités de la zone de recouvrement. Sous l'action de forces externes, l'excentricité des charges induit des sollicitations combinées de cisaillement et de pelage (flexion secondaire) capables de provoquer un décollement prématuré ou l'initiation de microfissures au sein du joint adhésif. Face à ces modes de défaillance, la maintenance industrielle doit mettre en œuvre des solutions fiables et reproductibles pour restaurer ou maximiser l'intégrité des structures endommagées ou hautement sollicitées. C'est dans ce cadre que s'inscrit la technique du renforcement par couvre-joint (ou patch adhésif). Appliqué localement, le couvre-joint agit comme une voie alternative de transfert de charge, permettant de délester le joint principal et de lisser les pics de contraintes critiques. L'efficacité d'une telle solution dépend néanmoins d'un grand nombre de paramètres couplés, qu'ils soient géométriques (longueur de recouvrement, épaisseur, profil géométrique des bords) ou liés aux propriétés intrinsèques des matériaux en présence. Problématique et Objectifs de la recherche : Bien que l'efficacité globale des couvre-joints soit reconnue, la quantification précise du gain mécanique et la prédiction du comportement de l'interface en fonction des paramètres de conception restent des sujets d'investigation complexes. L'objectif principal de ce travail est donc de comprendre les mécanismes fondamentaux qui régissent le transfert de charge au sein d'un assemblage multi-matériaux renforcé, et de développer des modèles prédictifs rigoureux pour aboutir à une conception optimale. Pour répondre à cette problématique, la présente étude adopte une démarche structurée en quatre chapitres : Le Chapitre

I pose le contexte industriel et scientifique de la technique du collage, définit la typologie des couvre-joints (patchs, doublures) et explicite les enjeux mécaniques sous-jacents.

Le Chapitre II dresse un état de l'art approfondi de la mécanique des assemblages, détaillant les modèles analytiques classiques (Volkersen, Goland & Reissner), les technologies de préparation de surface et les méthodes de contrôle non destructif (CND) indispensables à la fiabilité de l'interface. Le Chapitre III formule de manière précise les objectifs de la recherche, définissant les indicateurs de performance mécanique et analysant la sensibilité des assemblages aux paramètres d'influence. Le Chapitre IV expose l'approche numérique développée sous le code de calcul par éléments finis ABAQUS. Ce chapitre détaille la méthodologie de modélisation (Modules Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job et Visualization) d'un assemblage de plaques en aluminium 2024-T3 renforcé. L'analyse des résultats de simulation permettra de quantifier l'influence de la géométrie et de la position des raidisseurs sur la réduction des contraintes de cisaillement et de pelage, ouvrant ainsi la voie à des recommandations directes pour les applications de maintenance industrielle.

Chapiter I : Technique du collage

I.1. context et motivation:

Les assemblages collés sont aujourd'hui très utilisés dans plusieurs secteurs grâce à leurs avantages, comme une bonne répartition des contraintes, l'absence de perçage et la réduction du poids. Ils améliorent ainsi les performances et la durée de vie des structures [1]. Cependant, ils peuvent être endommagés par la fatigue, les chocs ou les variations de température, ce qui peut affaiblir la zone collée [1]. Il est donc important de trouver des solutions de réparation adaptées. Le patch adhésif est une solution efficace, car il renforce localement la structure et réduit les contraintes au niveau des fissures, tout en augmentant la durée de vie en fatigue [2]. Enfin, l'efficacité de cette solution dépend du bon choix des caractéristiques du patch, ce qui rend son optimisation essentielle pour améliorer la fiabilité des structures [3].

1.1. Définition du couvre-joint :

1.1.1. Patch :

Le patch, ou joint de couverture collé, est un renfort appliqué localement sur une zone critique à l'aide d'un adhésif, afin de restaurer ou améliorer les propriétés mécaniques d'une structure [1]. Il permet une meilleure répartition des charges et réduit les concentrations de contraintes, notamment au niveau des fissures ou des zones fragilisées [1]. Dans le domaine aéronautique, le patch composite diminue les contraintes au front de fissure et augmente la durée de vie en fatigue, en limitant la propagation des fissures [2].



Figure 1.1 couvre-joint patch

a) **Réparation par collage de patchs :**

- **Réparation par patchs externes:**

Réparation à l'aide de patchs externes. L'intervention par patch externe nécessite l'introduction d'un bouchon dans la zone « épurée », suivie de la pose d'une couche de colle et d'un patch extérieur. Cette approche nécessite peu de mise en place. Son déploiement est aisé et rapide. Cependant, la réparation entraîne un renforcement de la structure ainsi qu'une augmentation de son épaisseur. Naturellement, la qualité de cette réparation est fortement liée à celle du joint appliqué.

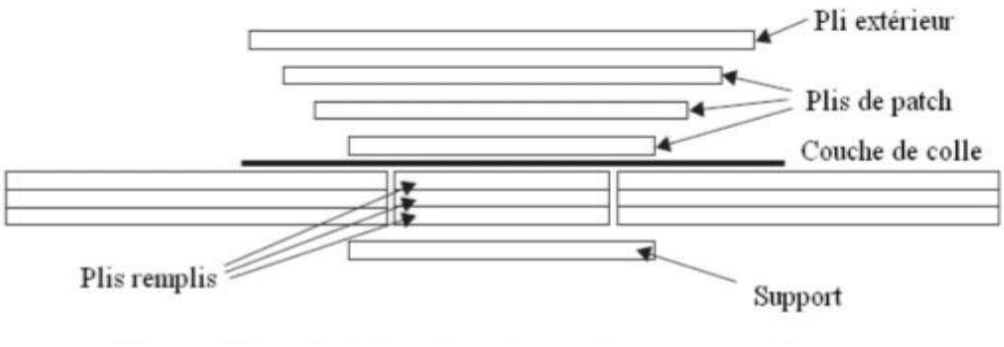


Figure 1.2 Schéma de réparation par patch externe

- **Réparation par patch intérieur :**

La réparation par patch biseauté intérieur nécessite d'abord de nettoyé la zone abîmée avec un angle biseauté de 2 à 3° afin d'obtenir une surface pour le collage plus importante. Par la suite, le remplissage se réalise stratification par stratification. Essentiellement, les charges sont transmises par l'interface reliant le patch et la plaque composite. Cette approche, fréquemment employée dans le secteur industriel, est reconnue pour les excellents résultats mécaniques finaux qu'elle produit. De plus, la géométrie du système réparé subit peu de modifications. Par contre, obtenir un petit angle biseauté peut s'avérer assez ardu. Il est indispensable de disposer de plusieurs équipements et le délai d'achèvement est important. Pour finir, la réparation nécessite une méthode de mise en œuvre adéquate.

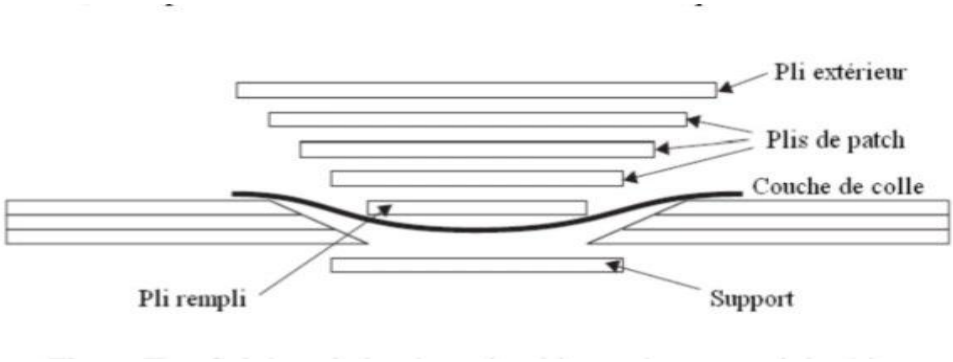


Figure 1.3 Schema de la réparation biseautée par patch intérieur

b) Procédé pour la réparation par patchs mous :

La polymérisation des patchs et de la colle nécessite un cycle de cuisson sous pression lors de l'application de patchs mous. Il est crucial que l'emplacement des patchs sur la plaque endommagée soit exact et que l'épaisseur du joint de colle soit constante pour garantir une répétabilité et une fiabilité adéquates. Les observations indiquent que : L'emplacement des patchs peut varier lors de leur installation dans la presse chauffante. Il est donc recommandé de chauffer le système sous vide. Une fois ramollis lors du processus de polymérisation, les patchs sont susceptibles de glisser par rapport à la plaque à réparer.

Il est donc nécessaire de trouver une méthode pour fixer les patchs. Si le trou n'est pas comblé, les patchs subissent une déformation notable au niveau de cet endroit. Il faut donc élaborer une installation symétrique. Pour une évaluation précise de la qualité de la réparation, il est essentiel d'examiner la performance de la réparation pour une géométrie identique a été mise en place pour chaque procédé, en prenant en compte la charge à la rupture. Les réparations effectuées sont soumises à des tests de traction à une vitesse de déplacement imposée de 0,5 mm/min. Suite à de multiples tentatives et diverses modifications du processus de réparation, l'écart des résultats tend à diminuer progressivement. Il y a une amélioration de la force à la rupture pour les systèmes réparés, passant de 67,6% à 85,3% par rapport à celle mesurée sur des plaques vierges (sans perforation). [38]

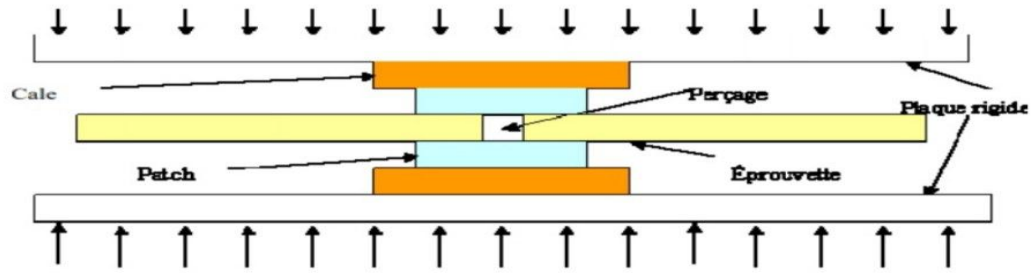


Figure 1.4 Procède final pour la réparation par patchs mous

c) Procédé pour la réparation par patchs durs :

Pour des raisons de praticité, la réparation par patchs durs présente davantage d'avantages. Effectivement, les patchs durs peuvent être préparés à l'avance, permettant ainsi un collage rapide. Concernant la méthode de réparation à l'aide de patchs mous, la mise en œuvre est plus facile, puisqu'il est uniquement nécessaire de polymériser l'adhésif. En réalité, la répartition de la colle n'est pas maîtrisable et l'épaisseur du joint adhésif fluctue de manière imprévisible et significative en raison du flux de colle. Les tests ont démontré que, à certains endroits, l'épaisseur de la colle est si minime qu'elle peut conduire à un détachement des patchs et à une défaillance prématurée du système réparé. La performance du système réparé est fortement liée à la régularité de l'épaisseur du joint adhésif [38].

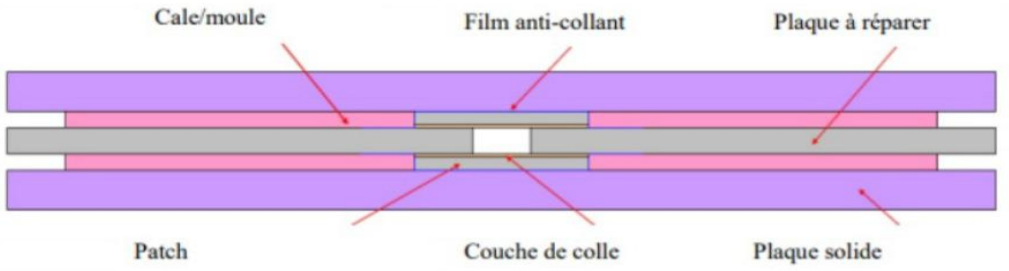


Figure 1.5 Schéma de principe du montage de réparation par patchs durs

1.1.2. Doublure :

La doublure est un élément de renforcement ajouté sur une surface structurale pour augmenter localement sa rigidité et sa capacité de charge. Contrairement au patch, elle couvre une zone plus large et est souvent utilisée pour prévenir les zones à fortes contraintes ou soumises à des charges

répétées [1]. Elle peut être fixée par collage, rivetage ou combinaison des deux. Lorsqu'elle est collée, elle permet un transfert progressif des charges, assurant une meilleure répartition des contraintes et réduisant les concentrations locales [1]. Ainsi, la doublure est un moyen efficace pour améliorer la rigidité, la résistance et la durabilité d'une structure existante [1].

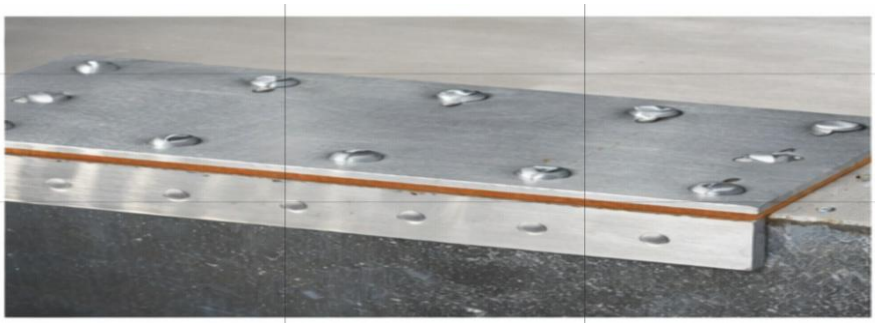


Figure 1.6 couvre-joint Doublure

1.1.3. Renfort secondaire :

Le renfort secondaire est un élément ajouté après la conception d'une structure pour améliorer ses performances ou corriger une faiblesse. Il peut être un patch, une doublure ou un autre renforcement, appliqué par collage ou fixation mécanique [1][2]. Il permet de mieux répartir les contraintes, d'augmenter la rigidité locale et de retarder les dommages, sans faire partie de la structure initiale [2]. Dans les assemblages collés, il assure un transfert progressif des charges, réduisant les concentrations de contraintes et améliorant la résistance à la fatigue [1].



Figure 1.7 couvre-joint Renfort Secondaire

1.2. Enjeux industriels :

1.2.1. Réparation structurale :

La réparation des structures est un sujet primordial dans les domaines comme l'aéronautique, les transports ou encore l'énergie, car il faut garantir la sécurité. Au fil du temps et avec l'application de plusieurs efforts, de fissures ou de zones vulnérables peuvent se développer, réduisant ainsi la résistance des structures à l'effort. Pour éviter l'inévitable remplacement des pièces entières, on recourt généralement à la technique de collage structurel. Cette technologie est très utilisée dans les réparations, puisque non seulement elle permet de restaurer les structures endommagées, mais également d'équilibrer la distribution des efforts et de les répartir plus homogènement que lors de la fixation par les moyens traditionnels, rivets et vis [1].Par ailleurs, dans l'aéronautique, plusieurs travaux montrent que le collage d'un patch composite permet non seulement de diminuer les contraintes autour de la fissure, mais aussi d'augmenter la durée de vie de la structure en fatigue [2].

1.2.2. Renforcement localisé :

Le renforcement localisé vise à améliorer la résistance des zones d'une structure soumises à de fortes contraintes. Il peut être utilisé de manière préventive sur des zones critiques ou pour corriger des dommages déjà existants. L'ajout d'un couvre-joint adhésif permet d'augmenter la rigidité locale et de mieux répartir les charges, grâce à un transfert progressif via la couche adhésive [1]. Par rapport aux méthodes mécaniques, le collage présente l'avantage de ne pas nécessiter de perçage, ce qui réduit les concentrations de contraintes et améliore le comportement de la structure sous des charges statiques et répétées [3].



Figure 1.8 Renforcement localisé

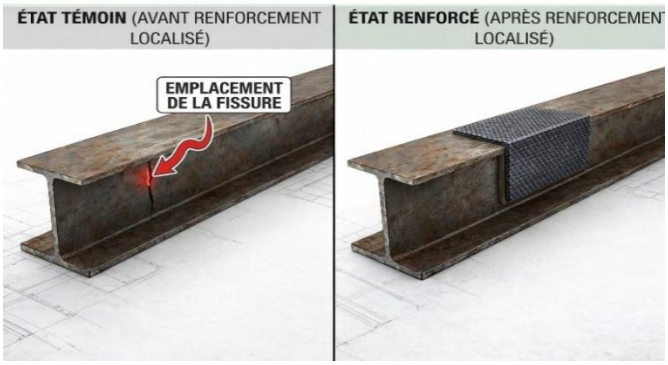


Figure 1.9 Avent et Apres renforcement localise

1.2.3. Amélioration de la tenue mécanique :

Le renforcement par couvre-joint améliore les performances mécaniques en augmentant la résistance, la tenue en fatigue et en réduisant les concentrations de contraintes. Sur une structure fissurée, le patch collé diminue l'intensité des contraintes et ralentit la propagation des fissures, ce qui prolonge la durée de vie [2]. L'adhésif permet aussi une meilleure répartition des charges sur toute la surface du patch, ce qui optimise le comportement global de la structure [3]. À l'échelle industrielle, cela se traduit par une meilleure fiabilité, une durée de vie plus longue et une réduction des coûts de maintenance [1].

1.3. Avantages par rapport aux autres méthodes de renforcement :

1.3.1. Géométrie simple et continuité structurale :

Le couvre-joint collé ne modifie pas la forme de la structure et évite le perçage. Il permet une répartition continue des charges, ce qui réduit les concentrations de contraintes et protège l'intégrité de la structure [1].

1.3.2. Absence de perçage et limitation des concentrations de contraintes :

Contrairement aux fixations mécaniques, le collage évite les trous qui créent des zones de faiblesse et des concentrations de contraintes. Il améliore ainsi la durée de vie en fatigue [3]. En aéronautique, il permet de restaurer les performances sans introduire de nouveaux défauts [2].

1.3.3. Facilité de mise en œuvre industrielle :

Le collage est plus simple à appliquer (préparation, collage, polymérisation) et peut être réalisé sur site avec peu de moyens, ce qui réduit le temps d'arrêt [1].

1.3.4. Optimisation du rapport résistance/masse :

Le couvre-joint collé utilise des matériaux légers (comme les composites) et améliore le transfert de charge, ce qui permet d'augmenter les performances sans ajouter beaucoup de poids [3].

1.3.5. Compatibilité avec les matériaux modernes :

Le collage permet d'assembler différents matériaux (métal/composite) en réduisant les contraintes et les risques de corrosion, grâce au rôle d'interface de l'adhésif [1].

I.2. Problématique scientifique:

2.1. Mécanismes de transfert de charge dans les assemblages à couvre-joint:

La mise en place du couvre-joint se réalise à travers la jonction de deux éléments de structure placés côte à côte et qui sont tenus ensemble par l'usage de plaques renforcées appelées couvre-joints par collage, vis, rivets ou soudage. Ce mode de jointure est communément utilisé dans le domaine de la mécanique, de la construction métallique et composite, de même que celui de l'aéronautique, car il facilite le transfert progressif des charges. [11]

Le transfert des charges n'est pas immédiat entre les deux composants, mais passe par le couvre-joint pour diffuser les efforts de la première plaque vers la deuxième plaque dans la zone de contact. Le phénomène dominant est le cisaillement dans la zone de contact, toutefois, la distribution des contraintes n'est pas uniforme : elle est intense aux bords et plus faible au milieu de la raison de la flexibilité des matériaux. [4] [11]

Outre le cisaillement, une autre contrainte appelée contrainte de pelage se produit en raison de la flexion de la pièce sous effort. Elle aide au décollement, étant donné que dans l'assemblage collé, la résistance à la traction normale est plus faible. Flexion secondaire liée à l'excentricité de l'effort provoque également l'augmentation de la valeur des efforts torsionnels. Le recours aux assemblages symétriques avec double couvre-joint permet de minimiser l'influence de cette action. [1]

Le niveau élevé des efforts est caractéristique des extrémités du recouvrement, ce qui est associé à l'apparition de fissures et à la destruction de l'assemblage en cas de dépassement des limites de résistance du matériau ou de l'adhésif. Cette zone est le plus sensible à des défaillances de l'assemblage. [1] [11]

La résistance des assemblages est déterminée par de nombreux paramètres: longueur du recouvrement (favorable pour la répartition des efforts à un certain niveau), rigidité du couvre-joint (réduit l'équilibre des charges), épaisseur de l'adhésif (devrait être la plus faible possible pour minimiser déformation), ainsi que les caractéristiques mécaniques du matériau. [2]



Figure 1.10: les Contraintes cisaillement et pelage

2.2. L'optimisation de conception:

Le principal objectif concernant l'optimisation de la technique de soudure couvre-joint est de réduire les zones de hauts niveaux de pression afin de favoriser le transfert de charges. Effectivement, il faut tenir compte d'un grand nombre de paramètres lors de l'optimisation de cette technique qui sont le couplage, la hauteur de la renfort, la rigidité de la pièce à souder et le profil de sa finition car ils affectent directement l'état de la jointure. [1]

La longueur de recouvrement est un paramètre primordial en optimisation de l'assemblage. Avec une augmentation de celle-ci, les efforts se répartissent sur une plus large surface, et donc la contrainte de cisaillement diminue. Cependant, au-delà de certain seuil, une longueur de recouvrement. [1]

L'épaisseur du couvre-joint est également très importante. Une épaisseur trop faible réduit la rigidité et rend le transfert de charge moins efficace. À l'inverse, une épaisseur trop importante peut générer des contraintes de pelage au niveau des extrémités à cause du déséquilibre de rigidité entre les pièces assemblées. [4]

La forme des extrémités du couvre-joint joue aussi un rôle important dans la répartition des contraintes. Des formes progressives ou effilées permettent de diminuer les concentrations de contraintes et d'améliorer la tenue de l'assemblage dans le temps.[2]

Enfin, la simulation numérique, en particulier par la méthode des éléments finis, est largement utilisée pour l'optimisation de la conception. Cela aide à comprendre l'effet des divers paramètres sur la contrainte et améliore la conception avant les tests physiques. [18]

2.3. Interaction entre le joint principal et le couvre-joint:

L'interaction entre le joint et le couvre-joint favorise une meilleure distribution de forces lors de la charge. La force n'est plus portée uniquement par une pièce mais par les deux qui forment ainsi un système de transfert de charges multi-routes. Cette distribution est fonction de la compatibilité des déformations ainsi que de la rigidité relative des pièces.[1] [11]

La rigidité du couvre-joint joue un rôle très important dans le comportement du couple joint-couvre-joint. En effet, un couvre-joint rigide absorbera une plus grande quantité de charge ce qui diminuera ainsi les contraintes dans le joint principal. Au contraire, un couvre-joint peu rigide ne jouera qu'un petit rôle. Par ailleurs, il existe une flexion secondaire due à la charge excentrique ce qui génère de grandes contraintes de pelage aux extrémités du joint.[4] [11]

L'optimisation des joints couverts facilite la diminution des concentrations de contraintes. Une utilisation de joints couverts symétriques et un réglage des paramètres géométriques tels que la longueur de recouvrement et l'épaisseur contribuent à une meilleure répartition des efforts et à une minimisation des points faibles. [1] [2]

En plus de renforcer la résistance statique de l'assemblage, le couvre-joint augmente également sa résistance au niveau de la fatigue. Ce système permet donc de retarder la formation et la propagation des fissures.[2]

En revanche, l'assemblage couvre-joint comporte deux pièces principales qui sont :

- le joint principal, garantissant la continuité mécanique du montage,
- le couvre-joint, garantissant la rigidification de l'assemblage.

La charge est transférée sur deux supports distincts, conduisant donc à un phénomène d'hyperstabilité en raison de la présence de plusieurs chemins de transfert de charge. [1]

En présence de traction, la charge est partagée entre le joint principal et le couvre-joint. L'échange de charges est effectué par le cisaillement des adhésifs, les forces des fixations et les efforts normaux provenant de la flexion. Toutefois, cette opération peut engendrer des contraintes de pelage, surtout au niveau des extrémités, en raison de la flexion, ce qui peut entraîner la formation de fissures ou le décrochement en cas de mauvaise conception. [15]

Le rapport de rigidité des deux pièces est également crucial. Un couvre-joint rigide absorbe une forte proportion de charge et garantit une protection pour le joint principal contre la charge. Un couvre-joint flexible ne présente pas d'intérêt. La similitude des déformations est primordiale pour prévenir les glissements et les concentrations de contraintes. [1]

L'influence des paramètres géométriques est très élevée. L'augmentation de la longueur de recouvrement favorise également l'équilibre des efforts jusqu'à sa valeur optimale. Cependant, une épaisseur de joint trop importante peut augmenter la flexion de la structure. L'assemblage double couvre-joint est plus efficace du fait de son effet stabilisateur par rapport à la flexion de l'ensemble des couches. [2] [15]

Les endroits les plus sensibles sont situés aux bouts, là où la tension de cisaillement et de pelage atteint son maximum, alors que le milieu de la longueur du joint reste relativement homogène par rapport au transfert de la charge. [11] [15]

En général, la performance de cette technologie permet de garantir une amélioration de la stabilité statique, prolongation de la durée de vie de la construction, et une plus grande résilience en raison de la redondance du couvre-joint, qui peut absorber la charge lors d'une défaillance. [1]

L'analyse de ces phénomènes se réalise avec l'aide de divers modèles théoriques de Goland & Reissner, Hart-Smith, et modélisation numérique (éléments finis, modèle cohésif). [11] [15]

2.4. Durabilité et vieillissement des assemblages renforcés:

La durabilité des assemblages avec couvre-joint est une question importante à prendre en compte lors de la conception d'assemblages soumis à des charges continues et des conditions extrêmes. Les assemblages sont soumis à des forces mécaniques, à des écarts de température et à un milieu agressif, résultant dans une altération de leurs caractéristiques. Celle-ci concerne le joint lui-même, le couvre-joint et la zone d'interface entre eux, ce qui change l'échange et la distribution de charges. Il est nécessaire de comprendre cette question pour garantir la sécurité. [1]

L'un des problèmes les plus urgents est la fatigue sous l'influence de chargement répété. Il entraîne formation de microfissures dans les zones de concentration de contrainte, en particulier à la périphérie du joint. Elles se développent lentement jusqu'à rupture du matériel. Cependant, grâce

au couvre-joint, il est possible de diminuer les contraintes et freiner développement de fissurations, augmentant ainsi l'endurance. [1]

Les environnements ont une forte influence sur la durabilité de l'œuvre. La présence d'humidité peut s'infiltrer dans le produit pour diminuer sa rigidité et sa résistance mécanique. Les changements de température causent des différences de dilatations entre les différentes parties, produisant ainsi des contraintes supplémentaires internes. Dans les assemblages métalliques, on peut observer une corrosion au niveau de l'interface. La bande peut jouer le rôle de barrière, mais n'élimine pas tous les problèmes. [2]

L'adoucissement des liens chimiques se produit au fil du temps en raison du vieillissement physique et chimique des adhésifs polymère. Ces liaisons peuvent subir des altérations en raison de la température, du temps et des environnements environnants. Cette situation a un impact direct sur la résistance mécanique de l'adhesif et par conséquent de son aptitude à transmettre des forces. [2]

Par conséquent, avec le vieillissement, les caractéristiques de l'adhésif s'altèrent et les forces s'équilibrent différemment parmi les composants de l'assemblage. Le couvre-joint est capable de prendre en charge davantage des forces au lieu du joint principal. Dans certains cas extrêmes de la détérioration, cela peut mener à un équilibrage défavorable des charges et à une défaillance prématurée. [11]

Le renforcement de la durabilité nécessite une analyse systématique qui englobe tous les aspects: la forme géométrique de l'assemblage, la composition matérielle et les conditions de service. Les formes symétriques, telles que le double couvre-joint, diminuent les contraintes de pelage. En outre, les procédures de préparation de surface, les couches de protection et les adhésifs à haute résistance à l'humidité et aux températures peuvent servir de moyens de prolonger la durée de vie de l'assemblage. [1]

Chapitre II : État de l'art approfondi

II.1. Typologie des couvre-joints:

L'utilisation de renforts externes comme les couvre-joints ou patches est une solution courante pour améliorer les performances des assemblages collés. Ces renforts permettent de modifier la répartition des contraintes dans les zones critiques et de réduire les concentrations de contraintes aux extrémités du joint, où apparaissent souvent les fissures ou le décollement [1][2]. Les études montrent que le patch améliore la rigidité, la résistance et la durée de vie en fatigue des structures [2][4]. Son rôle principal est d'assurer un transfert progressif des charges dans l'adhésif et de limiter les efforts de pelage [3]. L'efficacité du renforcement dépend de plusieurs facteurs, comme les matériaux utilisés, la géométrie du couvre-joint et les conditions mécaniques. Ces éléments sont essentiels pour optimiser la performance et adapter le renforcement selon le besoin (réparation ou prévention).

1.1. Classification par matériaux:

Le comportement mécanique du renforcement dépend fortement du matériau du couvre-joint. Ce matériau influence non seulement la rigidité et le transfert des charges, mais aussi la durabilité, la souplesse de l'interface et la résistance dans des conditions difficiles. En général, les couvre-joints sont classés en trois types : métalliques, composites et hybrides.

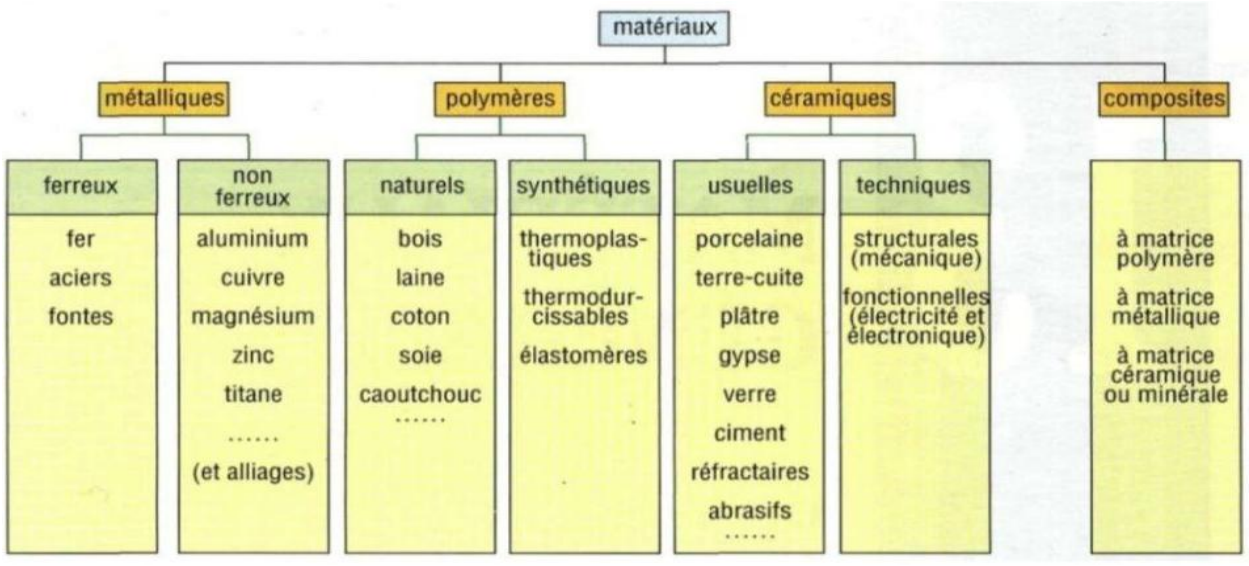


Figure 2.1 Classification par matériaux

1.1.1. Couvre-joints métalliques :

Le choix de la matière première dans le processus de l'application du revêtement est extrêmement important, car cela affecte directement la qualité du travail réalisé. L'utilisation des revêtements métalliques se fait assez souvent, surtout en aéronautique [3]. Le métal de choix est l'aluminium, car il présente des avantages liés au bon rapport masse-résistance et possibilité d'utilisation avec les matériaux légers [3]. Par ailleurs, c'est un matériau qui adhère très bien et offre une grande résistance à la corrosion [7]. On utilise l'acier lorsque le besoin de rigidité et de résistance est plus grand [3]. On utilise le titane dans des conditions difficiles à cause de sa forte résistance et de sa durabilité bien qu'il soit cher [1]. Toutefois, ces matériaux comportent plusieurs limitations. En effet, le métal peut avoir une corrosion galvanique avec la fibre composites [16]. La rigidité différente peut conduire à un gradient de contrainte [4]. Ce qui conduit parfois à un détachement des enduits ou aux dommages lors de mauvaise conception [11].

1.1.2. Couvre-joints composites :

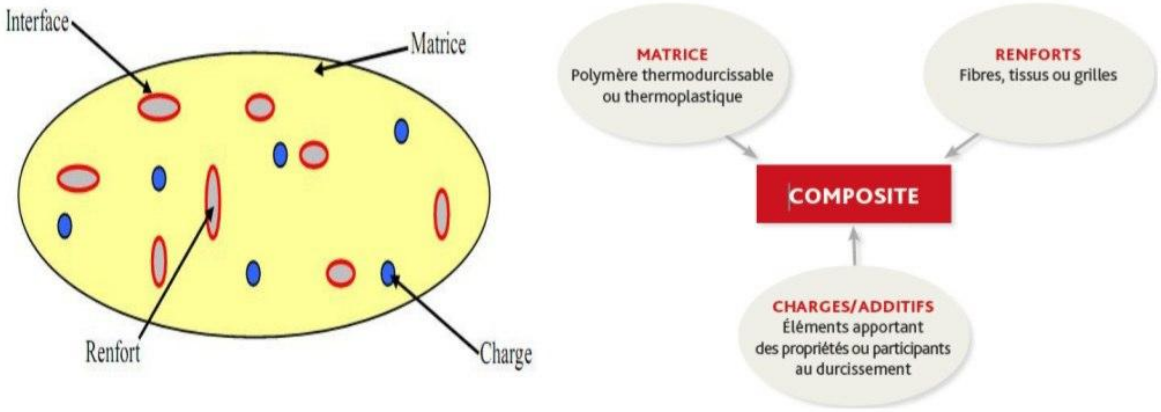


Figure 2.2 Composition d'un matériau composite

Les matériaux composites ont beaucoup amélioré les techniques de renforcement des couvre-joints. Les composites (carbone, verre, aramide) permettent d'ajuster facilement les propriétés mécaniques en jouant sur l'orientation et les couches des fibres [5]. Leur principal avantage est leur faible poids et leur bonne rigidité, surtout lorsqu'ils sont utilisés avec des structures composites [6]. Cette compatibilité permet de réduire les différences de rigidité et les concentrations de contraintes [16].

1.1.3. Couvre-joints hybrides (métal–composite) :

Les configurations hybrides combinent métal et composite pour profiter des avantages des deux matériaux. Cela permet d'obtenir un bon équilibre entre rigidité, poids et résistance aux dommages [9]. Dans la réparation des structures fissurées, les patches composites aident à redistribuer les contraintes et à ralentir la propagation des fissures sous charges répétées [9]. Ils améliorent aussi la durée de vie en fatigue. La différence de rigidité entre métal et composite peut être utile pour mieux contrôler les charges, si la conception (géométrie et épaisseur de l'adhésif) est bien adaptée [4]. Cela dépend aussi des paramètres mécaniques du système [8]. Cependant, ces solutions peuvent poser des problèmes, comme les différences de dilatation thermique ou la corrosion galvanique [16]. Il est donc important de bien étudier les conditions mécaniques et environnementales pour garantir la durabilité de la structure.

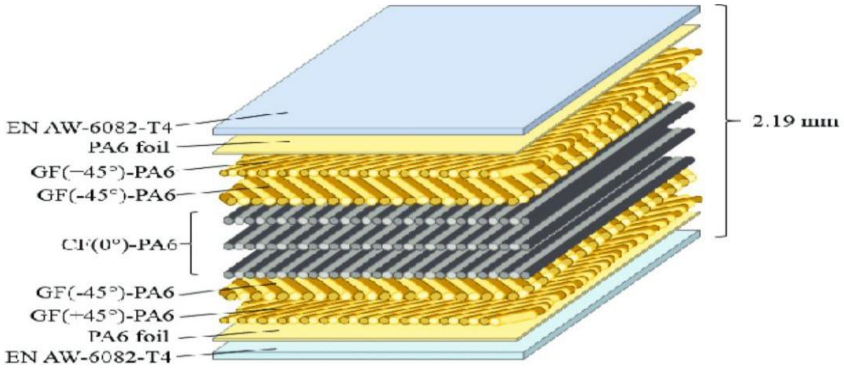


Figure 2.3 Exemple de stratifié hybride métal-composite

La structure hybride associe des couches métalliques, comme l'aluminium, et des couches composites renforcées de verre et de carbone. La structure hybride oriente les fibres dans plusieurs directions pour renforcer la résistance. Les couches métalliques donnent une bonne résistance et permettent d'absorber l'énergie. Les composites offrent une grande rigidité et s'adaptent aux directions des fibres. Les orientations différentes (0°, ±45°) répartissent mieux les contraintes. Les orientations différentes réduisent les zones de faiblesse et augmentent la résistance aux dommages.

Ces structures demandent une bonne conception. Les différences de rigidité et de dilatation thermique peuvent créer des contraintes internes aux interfaces.

a) Analyse mécanique comparative :

- **Influence du module d'élasticité sur le transfert de charge :**

Dans une structure adhésive renforcée collée, il est possible d'analytiquement décrire la contrainte de cisaillement dans l'adhésif, en utilisant le modèle de Volkersen [12]:

$$\boldsymbol{\tau\,(x) = \frac{P\beta}{2b}\frac{\sinh\left[\beta\left(\frac{L}{2}-x\right)\right]}{\cosh\left(\frac{\beta L}{2}\right)}} \qquad \textbf{(1)}$$

τ (x) : contrainte de cisaillement dans la couche adhésive à la position

P : charge appliquée sur l'assemblage

b : largeur du joint collé

L : longueur de recouvrement du joint

x : position le long de la zone de recouvrement

β : paramètre mécanique caractérisant le transfert de charge dans l'adhésif

Sinh : fonction sinus hyperbolique

cash : fonction cosinus hyperbolique

où le paramètre β dépend notamment :

$$\boldsymbol{\beta = \sqrt{\frac{Ga}{ta}\left(\frac{1}{E_1 t_1}+\frac{1}{E_2 t_2}\right)}} \qquad \textbf{(2)}$$

G_a: module de cisaillement de l'adhésif

t_a : épaisseur de la couche adhésive

E_1 : module d'Young du premier substrat

E_2 : module d'Young du deuxième substrat

t_1 : épaisseur du premier adhérent

t_2 : épaisseur du deuxième adhérent

Quand le module d'élasticité du couvre-joint augmente, le paramètre β augmente aussi, ce qui accentue les concentrations de contraintes aux extrémités. Ainsi, un matériau trop rigide, comme l'acier, peut créer des pics de contraintes au niveau de l'interface d'adhésion. Donc, un renfort trop rigide n'est pas toujours le meilleur choix pour un bon comportement de l'assemblage.

- **Contraintes de pelage (Goland & Reissner [11]) :**

En cas de surcharge décentrée, la flexion engendre des contraintes normales :

$$\sigma(x) = \frac{M(x).t}{I} \quad (3)$$

σ(x) : contrainte normale (contrainte de pelage) dans l'adhésif

M(x) : moment de flexion local dans la zone du joint

t : distance entre la fibre neutre et la surface considérée

I : moment d'inertie de la section de l'adhérent

Les joints métalliques épais augmentent les contraintes de décollement et peuvent réduire la durée de vie. Les joints composites offrent une transition plus progressive de rigidité, ce qui diminue les contraintes et améliore la résistance à la fatigue [9][10].

- **Effet de l'anisotropie (cas des composites) :**

Les matériaux composites sont anisotropes, donc leurs propriétés dépendent de l'orientation des fibres [5]. En orientant les fibres dans la direction des efforts, on améliore la rigidité et le transfert des charges, ce qui réduit les contraintes dans l'adhésif. Ce comportement est expliqué par la théorie de Volkersen, qui décrit la répartition des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive. Le paramètre dépend surtout du module d'élasticité des matériaux. En orientant les fibres dans la direction des efforts, on obtient une transition plus progressive des charges et une réduction des contraintes de cisaillement aux extrémités du joint. L'anisotropie influence aussi les contraintes de pelage, comme le montre le modèle de Goland et Reissner. Un bon alignement des fibres permet de réduire les effets de courbure et les contraintes de décollement. Cela aide à éviter le détachement de l'adhésif et améliore la résistance à la fatigue ainsi que la durabilité de l'assemblage.

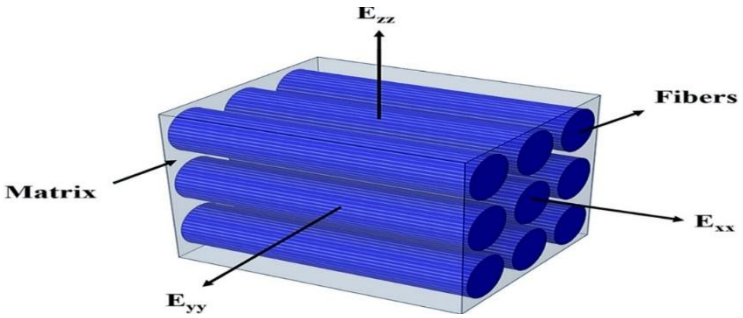


Figure 2.4 Microstructure d'un composite unidirectionnel

Un composite unidirectionnel est formé d'une matrice et de fibres continues, qui assurent la résistance principale, tandis que la matrice transmet les charges. Ses propriétés dépendent de la direction : $E_{xx} > E_{yy}\ et\ E_{zz}$, ce qui montre son caractère anisotrope. Dans les joints composites, cette anisotropie peut être utilisée en orientant les fibres dans la direction des efforts pour améliorer la rigidité et le transfert des charges.

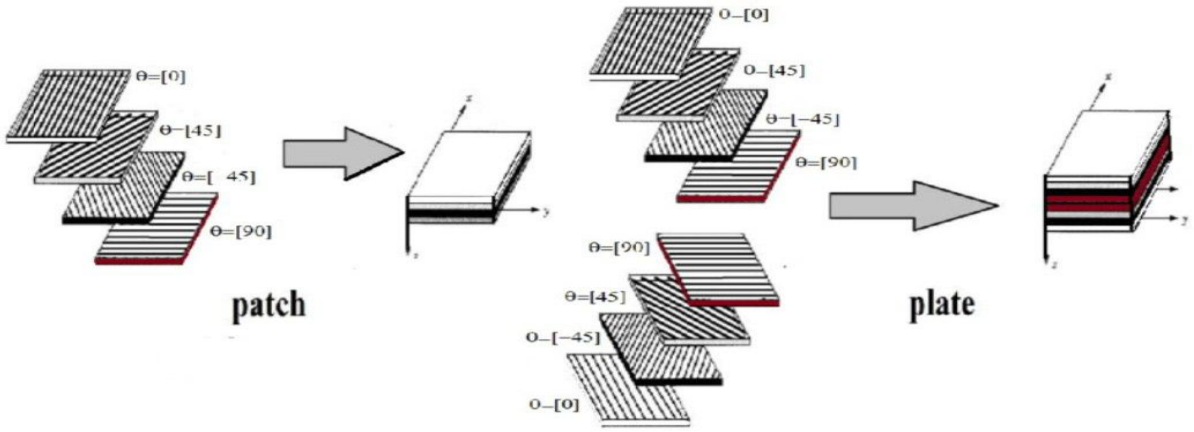


Figure 2.5 Construction d'un patch composite et d'un stratifiée (séquence d'empilement [0/±45/90])

Un patch composite est formé de plusieurs couches (plis) avec différentes orientations (**0°**, **±45°**, **90°**), contrairement aux métaux qui sont homogènes. Les plis **0°** assurent la rigidité et le transfert des charges dans le sens principal. Les plis de **±45°** assurent non seulement une résistance à la coupe mais aussi un équilibre des efforts. Les plis de **90°** sont utilisés pour améliorer la rigidité transversale et minimiser les déformations.

L'important ici est donc que les orientations et l'arrangement des couches soient optimisés, vu qu'ils affectent directement la distribution des contraintes.

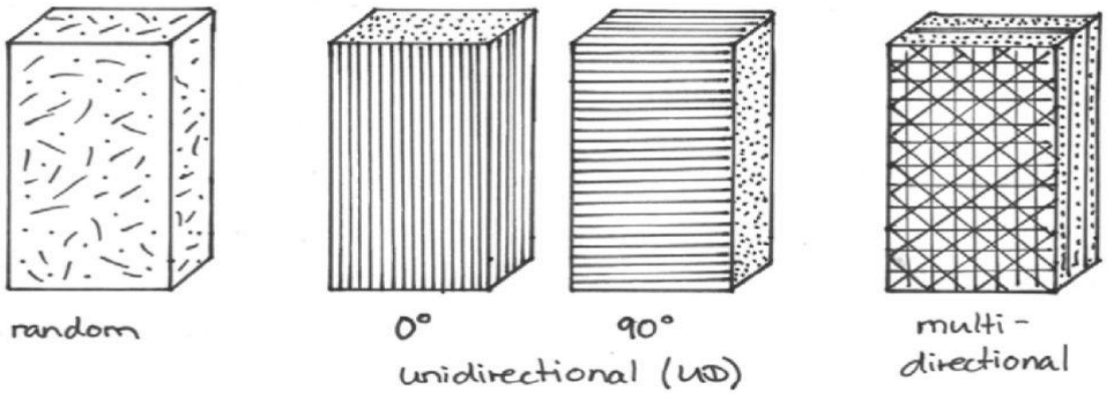


Figure 2.6 Différents types d'orientation des fibres dans les composites

Les composites peuvent être à fibres dispersées, unidirectionnels ou multidirectionnels. Les unidirectionnels sont résistants dans une seule direction, tandis que les multidirectionnels offrent un comportement plus équilibré. Dans les joints collés, les stratifiés multidirectionnels améliorent la répartition des charges et la durée de vie. Une configuration (0/±45/90) optimise le transfert des charges [5]. Elle réduit les contraintes de cisaillement [8]. Elle limite le décollement [11]. Elle améliore la résistance à la fatigue [12].

1.2. Classification des couvre-joints selon la géométrie :

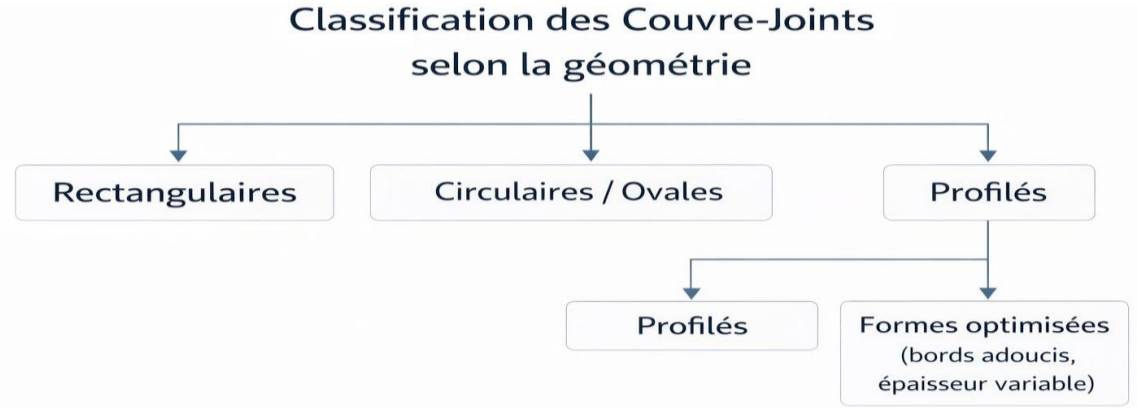


Figure 2.7 Classification des couvre-joints selon la géométrie

La forme du couvre-joint est très importante, car elle influence le transfert des charges et la répartition des contraintes dans l'adhésif. Les contraintes ne sont pas réparties de manière uniforme, et des pics apparaissent surtout aux extrémités du joint. Des contraintes de pelage peuvent aussi apparaître à cause de la flexion, selon Goland et Reissner [11]. Une mauvaise forme peut augmenter ces contraintes, tandis qu'une bonne géométrie permet une répartition progressive des charges et améliore la durée de vie. Différentes formes existent : rectangulaire (simple), circulaire ou ovale (moins de concentrations), et profilée (transition douce). Les formes optimisées par calcul numérique permettent de réduire les contraintes et d'améliorer les performances [8]. Ces optimisations améliorent la fiabilité globale de l'assemblage [18].

1.2.1. Couvre-joints rectangulaires :

Les couvre-joints rectangulaires sont les plus utilisés en industrie grâce à leur simplicité de fabrication et d'application [7]. Ils permettent de répartir les charges autour de la zone endommagée, mais leurs bords peuvent créer des concentrations de contraintes dans l'adhésif. Ces contraintes sont plus élevées aux extrémités. Cela peut favoriser le décollement sous charges répétées. Malgré cela, ils restent très utilisés pour leur simplicité et leur efficacité globale [8].

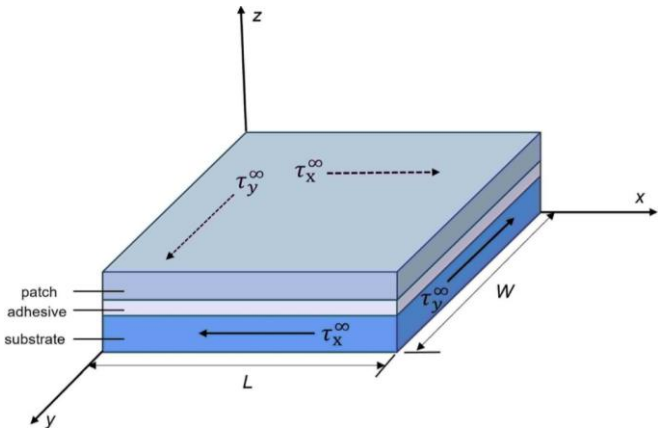


Figure 2.8 Modélisation tridimensionnelle d'un assemblage collé renforcé par un couvre-joint rectangulaire et directions des contraintes de cisaillement

La figure présente un assemblage collé avec un couvre-joint rectangulaire posé sur le substrat à l'aide d'un adhésif. Les charges agissent selon les directions **x** et **y**, et les contraintes de

cisaillement **τx** et **τy** assurent le transfert des efforts dans la couche adhésive. Ce schéma permet de comprendre la répartition des contraintes dans la zone de recouvrement.

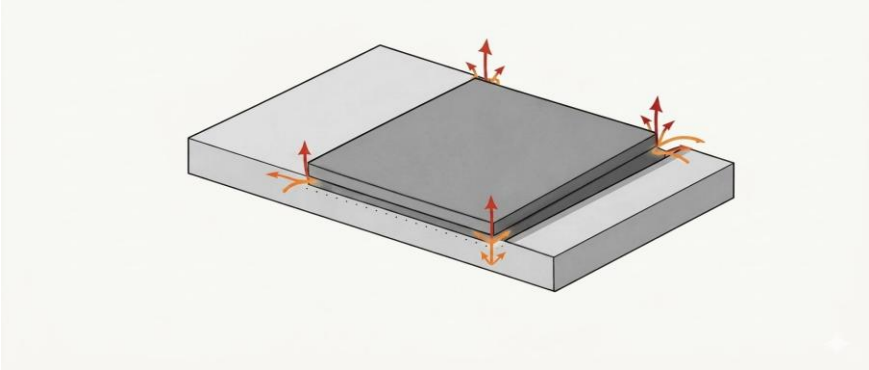


Figure 2.9 couvre-joint rectangulaire

Ces figures montrent qu'un couvre-joint collé permet de transférer une partie de la charge σ du substrat vers le patch à travers l'adhésif. Cela aide à réduire les contraintes dans la zone endommagée et à mieux les répartir. Cependant, les contraintes maximales restent aux extrémités du patch, où se combinent cisaillement et pelage dans l'adhésif.

1.2.2. Couvre-joints circulaires ou ovales :

Les couvre-joints circulaires ou ovales sont utilisés pour réduire les concentrations de contraintes présentes dans les formes rectangulaires. Leur forme sans angles permet une transition plus douce de rigidité et une meilleure répartition des contraintes dans l'adhésif [9]. Des études montrent qu'ils diminuent les contraintes maximales de cisaillement et de pelage, ce qui améliore la durée de vie des réparations. Ils sont souvent utilisés en aéronautique pour limiter la propagation des fissures et améliorer la résistance aux dommages [9].

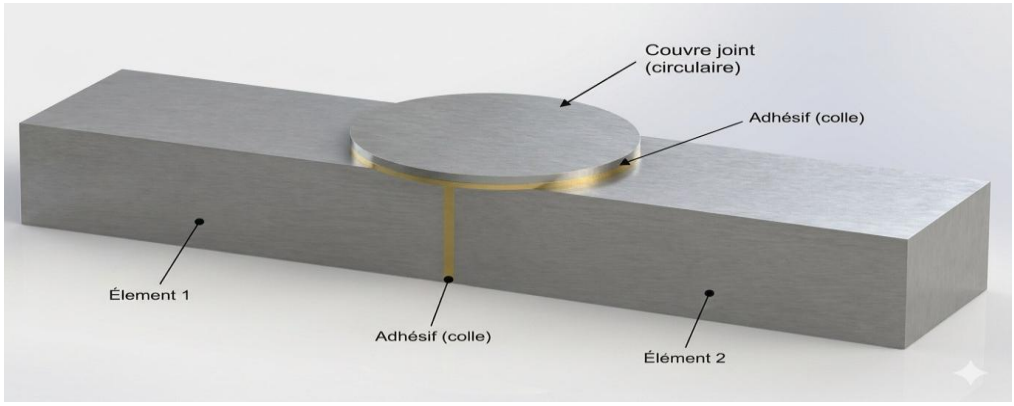


Figure 2.10 couvre-joint circulaire.

Cette liaison repose sur le renforcement de l'assemblage entre deux éléments opposés à l'aide d'un couvre-joint circulaire et d'une couche adhésive, transformant ainsi le point de contact faible en une zone de distribution de charges robuste et efficace.

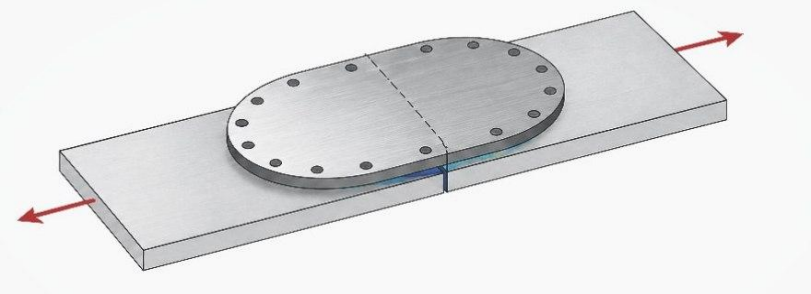


Figure 2.11 Assemblage collé renforcé par un couvre-joint ovale.

La figure montre qu'un couvre-joint ovale permet une meilleure répartition des contraintes que certaines autres formes. Le transfert progressif des charges réduit les pics de contraintes aux extrémités. Cela améliore la durabilité de la réparation.

1.2.3. Couvre-joints profilés :

Les joints profilés ont une épaisseur qui varie progressivement pour réduire les différences de rigidité entre le renfort et le substrat. Cette transition douce diminue les concentrations de contraintes et les risques de décollement. Ils sont donc utilisés dans les applications exigeantes, comme en aéronautique ou pour des structures fortement sollicitées.

1.2.4. Formes optimisées :

Les formes optimisées de couvre-joints sont conçues à l'aide de méthodes avancées pour réduire au maximum les concentrations de contraintes. Elles permettent une meilleure répartition des charges sans perturber leur transfert. Ces formes réduisent les contraintes maximales et augmentent la durée de vie des assemblages [17]. Elles améliorent aussi la fiabilité des réparations, surtout dans les structures critiques [18].



Figure 2.12 Couvre-joint biseauté optimisé

La figure montre un couvre-joint optimisé avec une épaisseur variable et des bords adoucis. Cette forme permet de réduire les concentrations de contraintes aux extrémités. La variation d'épaisseur rend le transfert des charges plus progressif, ce qui diminue les contraintes dans l'adhésif. Cela améliore la durabilité et retarde le décollement ou la fissuration.

1.3. Classification des couvre-joints selon la fonction :

Les couvre-joints peuvent être classés selon leur rôle dans la structure, ce qui aide à mieux comprendre leur utilisation. Ils permettent de modifier la répartition des contraintes et d'améliorer le transfert des charges dans les assemblages collés. Selon leur fonction, on distingue trois types : les renforts structurels, les couvre-joints de réparation et les renforts anti-fatigue. Cette classification est importante dans des domaines exigeants comme l'aéronautique, le naval ou l'automobile. Le choix du type de renfort dépend des besoins mécaniques, ainsi que des exigences de performance et de durabilité [1][7][18].

1.3.1. Renforts structuraux :

Les renforts structurels sont utilisés pour augmenter la rigidité et la résistance d'une structure, souvent dès la conception ou pour améliorer ses performances. Dans un assemblage collé, le couvre-joint permet de mieux répartir les charges sur une surface plus large, ce qui réduit les contraintes dans les zones critiques. Il agit comme un élément supplémentaire qui prend une partie des efforts, diminue les concentrations de contraintes et améliore la capacité portante. Cette méthode est couramment utilisée en aéronautique, naval et automobile pour renforcer les zones fortement sollicitées.

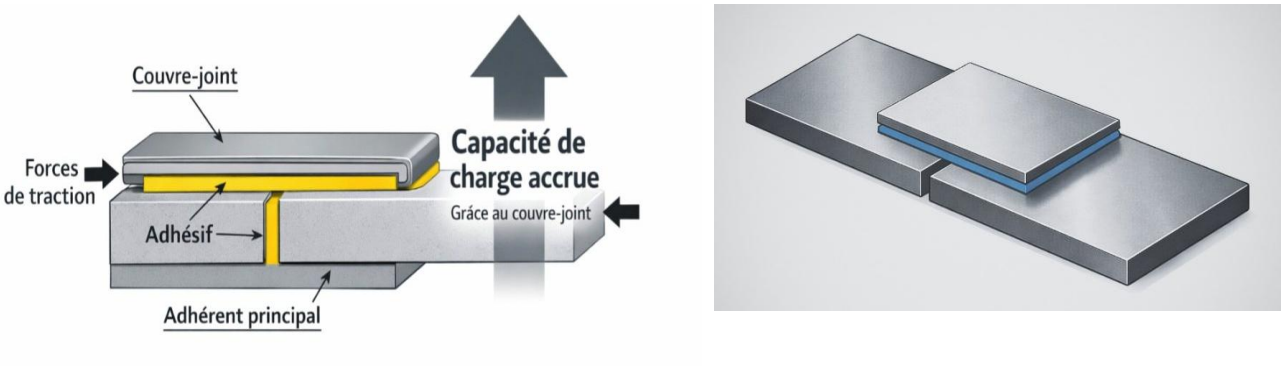
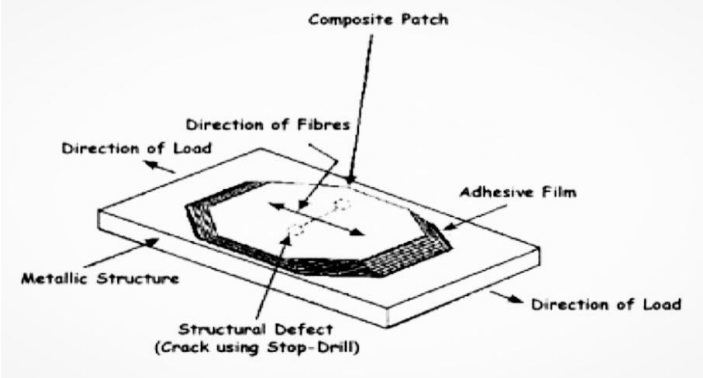


Figure 2.13 Renforcement structural d'un assemblage collé par l'ajout d'un couvre-joint pour augmenter la capacité de charge de la structure

La figure montre que le couvre-joint permet de transférer une partie de la charge du substrat vers le renfort à travers l'adhésif. Cela réduit les concentrations de contraintes dans la zone critique. Le couvre-joint augmente aussi la rigidité locale et permet à la structure de supporter des charges plus élevées.

1.3.2. Réparation de dommages :

Les couvre-joints sont souvent utilisés pour réparer des structures endommagées (fissures, corrosion, érosion) afin de restaurer leur capacité portante. Le patch collé permet de transférer une partie des contraintes vers le renfort, ce qui réduit les efforts autour du défaut et ralentit sa propagation. Cette méthode est très utilisée en aéronautique, car elle permet de réparer sans remplacer la pièce, surtout avec des patches composites légers et efficaces



. **Figure 2.14** Réparation de dommages structuraux par patch composite collé

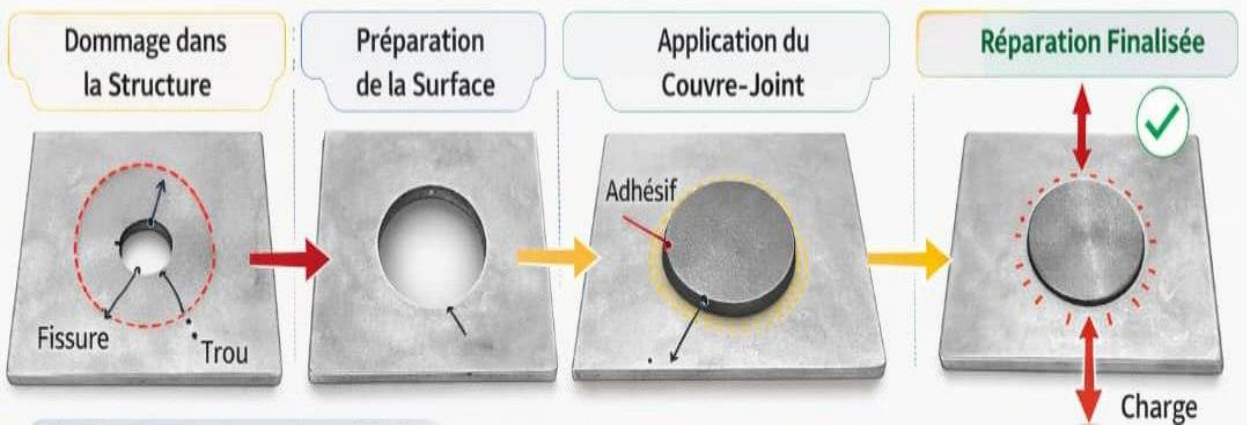


Figure 2.15 Réparation de Dommages

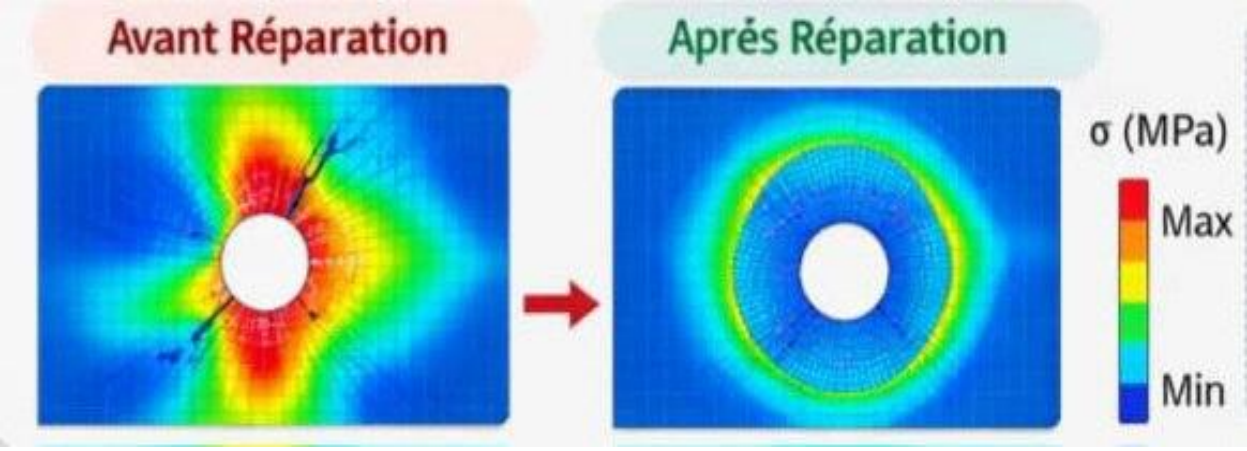


Figure 2.16 Distribution des contraintes (FEM)

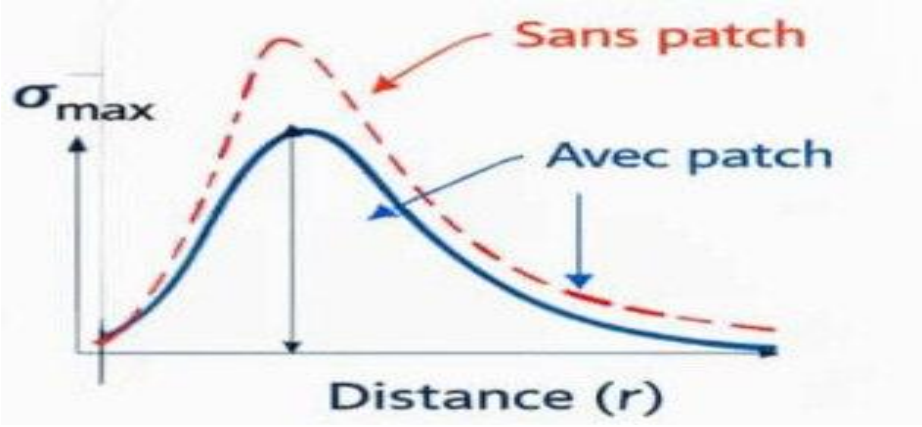


Figure 2.17 Comparaison de la distribution des contraintes autour d'un dommage avec et sans patch collé.

Les figures montrent que les zones endommagées (fissures ou trous) créent des concentrations de contraintes qui peuvent aggraver les dégâts. L'application d'un patch collé permet de transférer une partie des charges vers le renfort grâce à la couche adhésive, ce qui réduit les contraintes autour du défaut. Les analyses (FEM) montrent que cette méthode diminue la contrainte maximale $\boldsymbol{\sigma_{max}}$ et rend la répartition des contraintes plus uniforme. Ainsi, le patch collé est une solution efficace pour réparer les structures et prolonger leur durée de vie sans remplacement.

1.3.3. Renforts anti-fatigue :

Les patchs anti-fatigue sont utilisés afin de rendre plus longue la durée de vie des structures soumises aux charges cycliques. En effet, ils permettent de réduire les concentrations des contraintes aux points critiques de la structure, et donc d'éviter ainsi la création de fissures et leur propagation. Les patchs composites s'avèrent très performants dans le domaine du faible effet de fatigue et sont beaucoup utilisés dans le domaine de l'aéronautique.

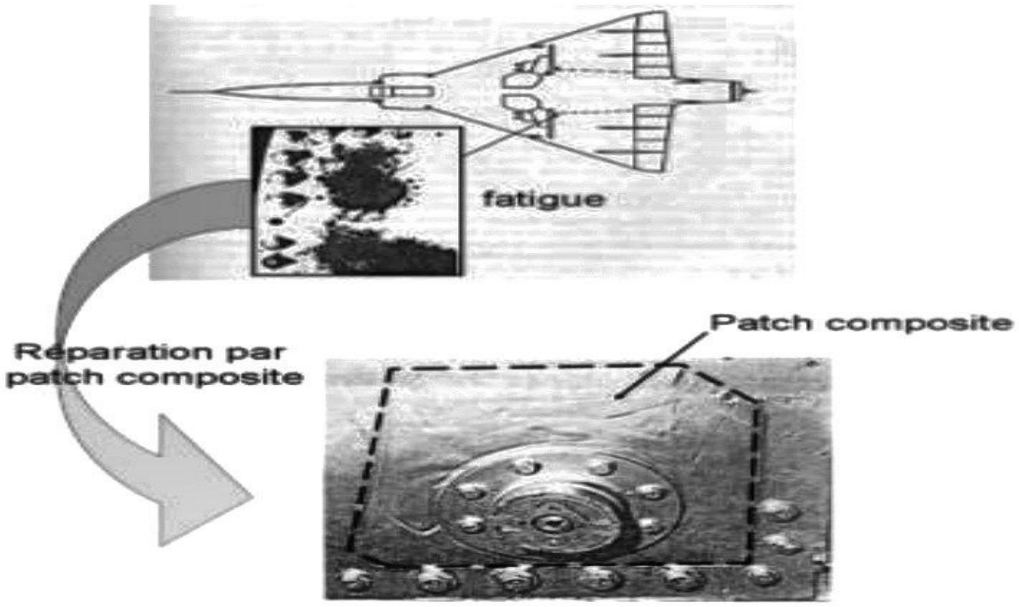


Figure 2.18 Réparation anti-fatigue d'une structure aéronautique par patch composite

II.2. Mécanique des assemblages avec couvre-joint :

Les assemblages renforcés par couvre-joint sont utilisés pour réparer des zones endommagées (fissures, défauts) en collant un patch en métal ou en composite sur la structure. Le patch supporte une partie des charges, ce qui réduit les contraintes locales. Le transfert des efforts se fait progressivement dans l'adhésif, surtout par cisaillement. Si la conception est bonne, cela limite les concentrations de contraintes et ralentit la propagation des fissures, contrairement aux méthodes mécaniques qui peuvent créer des points faibles [1]. L'efficacité est basée sur de nombreux paramètres, notamment les matériaux, la épaisseur du collage et la rigidité des composants. Dans le cas de structures exposées aux charges de répétition, l'ajout d'un couvre-joint aide à augmenter la fatigue résistance et la durée de vie de la structure [18].

2.1. Théories analytiques de transfert de charge :

Plusieurs modèles analytiques expliquent le transfert des charges dans les assemblages collés. Le modèle de Volkersen suppose que ce transfert se fait uniquement par cisaillement dans l'adhésif.

Il montre que les contraintes sont maximales aux extrémités du joint et diminuent vers le centre [12]. Ce modèle est simple, car il considère seulement la traction et néglige les effets de flexion.

- Equation principale :

$$\boldsymbol{\tau_m = \frac{P}{b.l}} \qquad \textbf{(6)}$$

Cette relation exprime la contrainte moyenne de cisaillement dans la couche adhésive.

La distribution des contraintes est donnée par une fonction dépendant des paramètres mécaniques et géométriques :

$\tau(x) = f(x, Ep, Ga, ea, ep)$

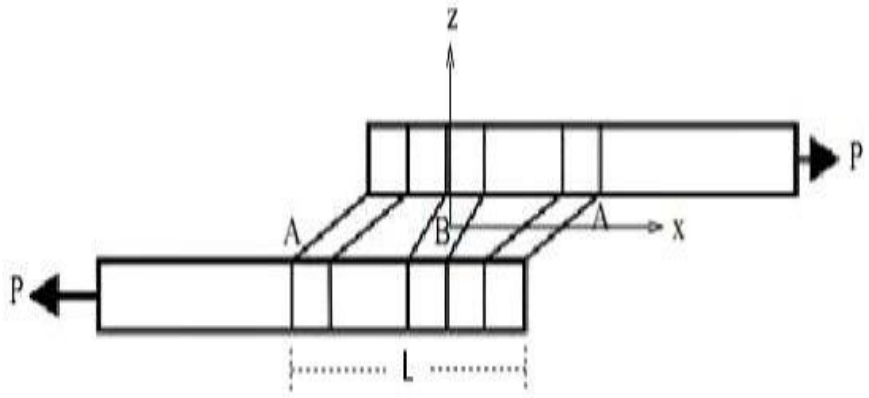


Figure 2.19 Volkersen model

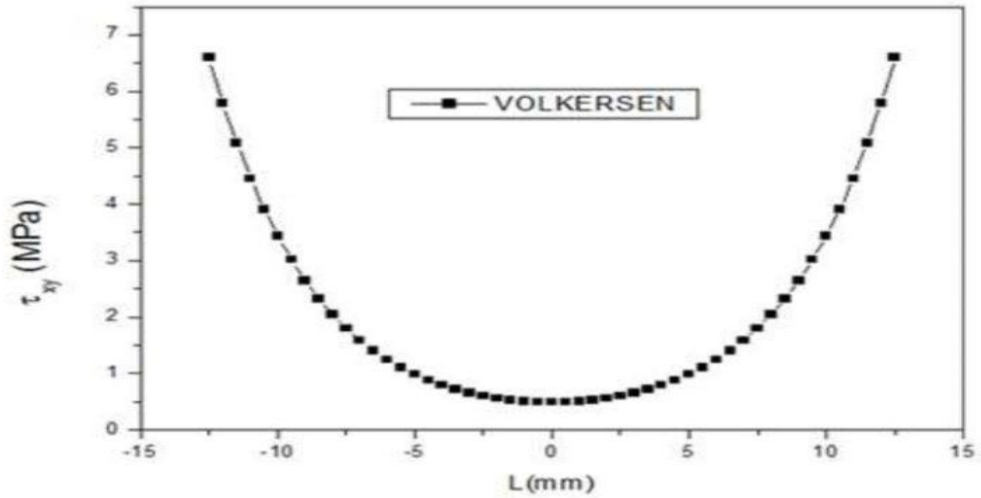


Figure 2.20 Distribution des contraintes selon Volkersen

La contrainte de cisaillement τxy est maximale aux extrémités du joint et minimale au centre. Cela montre que le transfert des charges est surtout concentré aux bords, où les fissures apparaissent le plus souvent. Le modèle suppose que l'adhésif travaille uniquement en cisaillement, tandis que les substrats sont en traction.

$$\boldsymbol{\tau}\,(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\tau_m}\,\frac{w.l}{2}\left[\frac{\cosh(wx)}{\sinh\left(\frac{wl}{2}\right)} + \frac{\left|E_{P1}e_{p1} - E_{p2}e_{p2}\right|}{E_{p1}\,e_{p1} + E_{p2}e_{p2}}\,\frac{\sinh(wx)}{\cosh\left(\frac{wl}{2}\right)}\right] \quad \textbf{(7)}$$

Où $\boldsymbol{\tau_m}$ est la contrainte de cisaillement moyenne

$$\mathbf{w} = \sqrt{\frac{G_a}{e_a}\left(\frac{1}{E_{P1}e_{P1}} + \frac{1}{E_{P2}e_{P2}}\right)} \quad \textbf{(8)}$$

Si les matériaux sont les mêmes, les substrats doivent avoir la même épaisseur ; en revanche, si les matériaux varient, l'épaisseur dépendra du rapport des modules d'Young :

$$\frac{E_{P2}}{E_{P1}} = \frac{e_{P1}}{e_{P2}} \quad \textbf{(9)}$$

Le modèle de Goland et Reissner améliore celui de Volkersen en prenant en compte la flexion des éléments assemblés. Ils montrent que l'adhésif subit non seulement des contraintes de cisaillement, mais aussi des contraintes de pelage dues à la flexion [11]. Ces contraintes apparaissent à cause du désalignement des forces, ce qui crée un effet de flexion dans l'assemblage.

$$M_0 = k.P.\frac{e_s}{2} \quad \textbf{(10)}$$

Quand la charge est faible, il n'y a presque pas de rotation du couvre-joint. Quand la charge augmente, le coefficient k diminue avec la déformation des éléments, jusqu'à devenir proche de zéro. Cela permet de décrire l'évolution des contraintes normales de pelage dans l'assemblage.

$$\boldsymbol{\tau}\,(\mathbf{x}) = \left(\frac{P}{4l}\right)\left[\frac{\beta c}{e_s}(1+3k)\,\frac{\cosh\left(\frac{\beta x}{e_s}\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{e_s}\right)} + 3(1-k)\right]$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\sigma.e_s}{c^2 R_3}\left[\left(R_2\lambda^2\frac{k}{2} - \lambda k cosh\lambda cos\lambda\right) cosh\left(\frac{\lambda x}{C}\right) cos\left(\frac{\lambda x}{C}\right) + \left(R_1\lambda^2\frac{k}{2} - \lambda k sinh\lambda sin\lambda\right) sinh\left(\frac{\lambda x}{C}\right) sin\left(\frac{\lambda x}{C}\right)\right] \quad (11)$$

Ou C = $\frac{1}{2}$ et σ = $\frac{F}{b.e_s}$ (contrainte moyenne de traction dans les substrants)

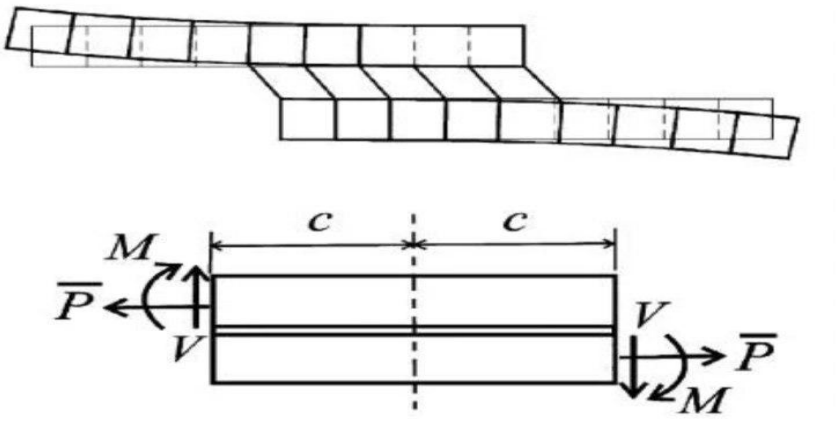


Figure 2.21 Goland & Reissner model

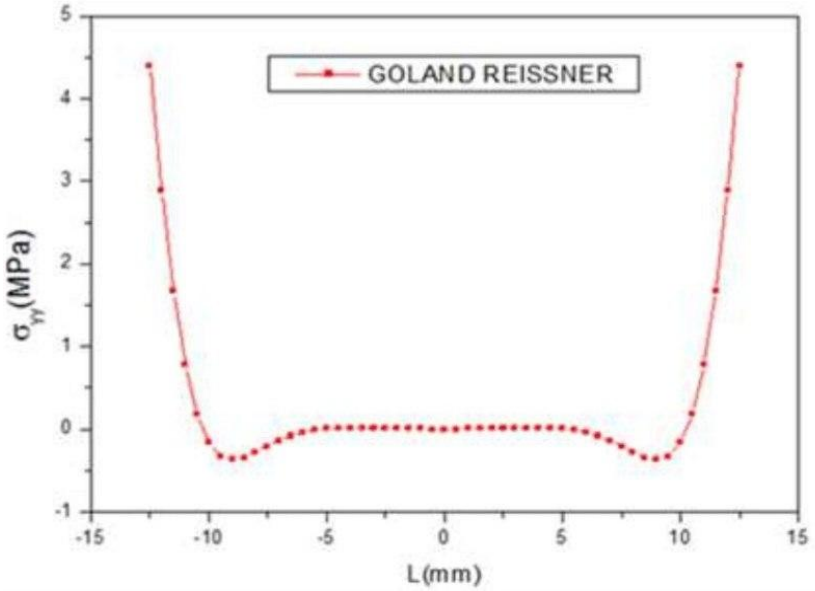


Figure 2.22 contraintes de pelage (Goland-Reissner)

La contrainte de pelage σzz apparaît à cause de la flexion et est maximale aux extrémités, ce qui favorise le délaminage. Dans les réparations, les modèles montrent que si le patch est plus rigide que le substrat, il reprend une grande partie des charges. Cela réduit les contraintes dans la zone fissurée et améliore le comportement de la structure [8].

2.2. Distribution de contraintes dans les assemblages multi-matériaux :

Les bandes de recouvrement multi-matériaux sont souvent utilisées pour garantir la continuité mécanique entre deux pièces aux propriétés différentes, comme le métal et le composite. Le fait d'associer plusieurs matériaux crée une hétérogénéité des propriétés mécaniques, surtout du module d'élasticité et de la rigidité globale. Cette différence de propriétés affecte directement le transfert de charge à l'interface collée, ce qui donne un transfert de charge progressif et localisé plutôt qu'uniforme [2], [18]. La géométrie est très importante dans ce type d'assemblage. Utiliser les doubles bandes de recouvrement limite les effets de flexion et assure un meilleur équilibre des charges entre les composants collés. La zone de recouvrement constitue la zone principale de transfert de charge. L'efficacité de la zone de recouvrement dépend de la longueur de recouvrement, de l'épaisseur du matériau et des propriétés de l'adhésif.

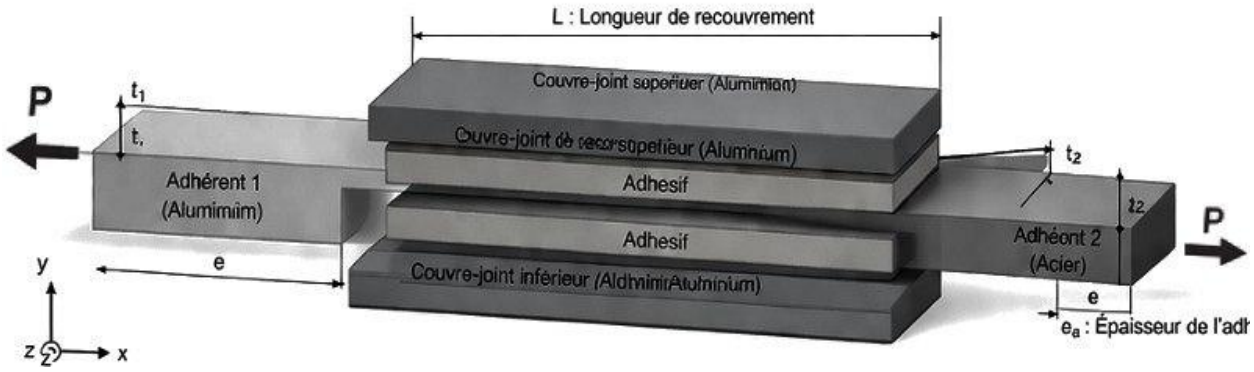


Figure 2.23 Géométrie d'un assemblage à couvre-joint multi-matériaux

Le transfert de charge entre les deux adhésifs s'effectue par contrainte de cisaillement dans les couches adhésives. Ce mécanisme est lié à la différence de déplacement entre les matériaux adhésifs. La formule simplifiée suivante peut représenter cette interaction :

$$\boldsymbol{\tau(x) = \frac{G_a}{e_a}(u_1 - u_2)} \quad \textbf{(12)}$$

où $\boldsymbol{G_a}$ représente le module de cisaillement de l'adhésif et $\boldsymbol{e_a}$ son épaisseur. L'équilibre des efforts s'écrit également :

$$\boldsymbol{\frac{dN_1}{dx} = -b\tau(x)\ ,\ \frac{dN_2}{dx} = +b\tau(x)} \quad \textbf{(13)}$$

Ces relations montrent que la rigidité des matériaux, exprimée par $E_i A_i$, contrôle directement la transmission des charges dans l'assemblage [12], [18].

L'analyse par éléments finis permet de voir comment les composants se comportent. L'analyse par éléments finis montre les zones où la contrainte est maximale. L'analyse par éléments finis aide à comprendre comment la différence de rigidité des matériaux influence le résultat. Les résultats montrent que la contrainte dépend surtout de la forme et des changements de rigidité à l'interface de collage.

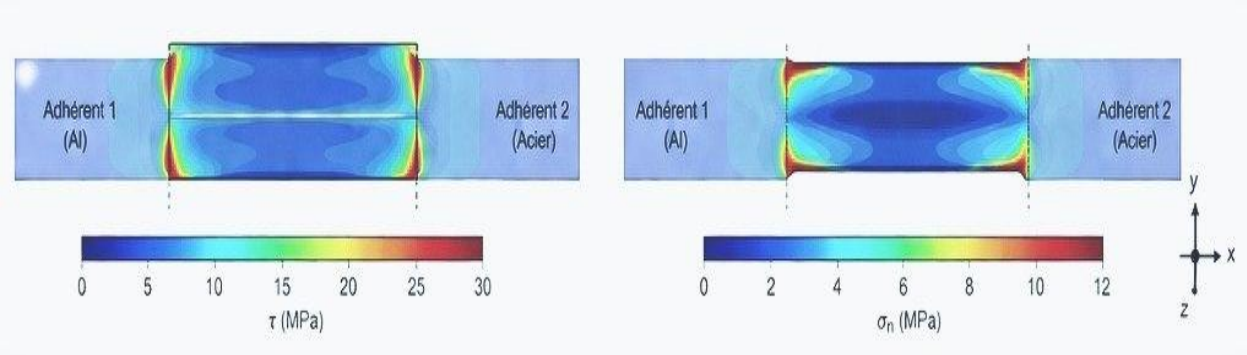


Figure 2.24 Distribution des contraintes dans l'assemblage (résultats FEM)

Les résultats peuvent être interprétés à l'aide de modèles analytiques classiques. La variation de contrainte dans la zone de recouvrement peut être décrite à l'aide d'expressions issues des modèles de Volkersen et de Goland-Reissner, par exemple :

$$\boldsymbol{\lambda^2 = \frac{G_a b}{e_a}\left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2}\right)} \quad \textbf{(14)}$$

Le comportement de l'assemblage dépend surtout des propriétés mécaniques et de la rigidité des matériaux. Une grande différence de rigidité provoque une redistribution des charges et augmente les concentrations de contraintes à l'interface [11]. Cela crée aussi des gradients de contraintes plus importants dans la zone collée [12].

Les analyses théoriques et numériques aboutissent aux mêmes conclusions. Il en ressort qu'il s'agit d'une question très sensible à l'importance de l'échange des forces au niveau du domaine d'intersection et de la flexibilité relative des matériaux

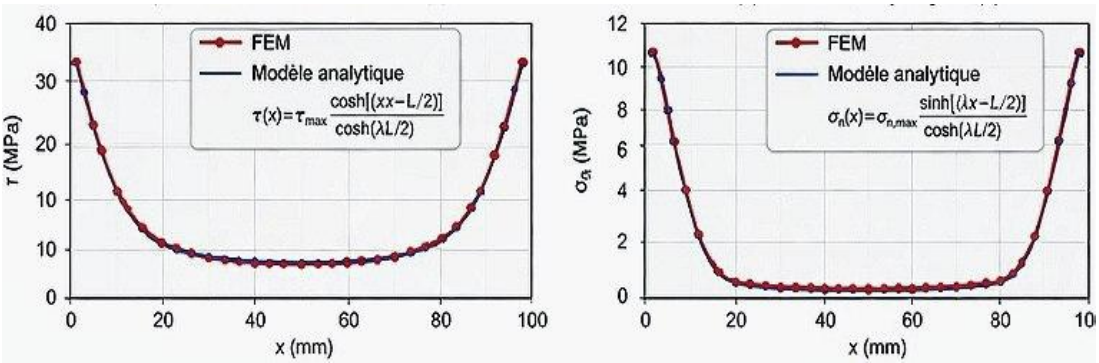


Figure 2.25 Comparaison entre modèle analytique et résultats FEM

Les propriétés et la rigidité des matériaux, ainsi que celles de l'adhésif, influencent directement le comportement des assemblages multi-matériaux. La modélisation analytique permet de mieux comprendre ce comportement [5]. La simulation numérique aide à identifier et réduire les zones critiques [11]. Cela permet d'améliorer la conception et les performances globales des assemblages [18].

2.3. Effets de bord et concentrations de contraintes :

Les parties extrêmes des éléments collés sont exposées aux forces maximales en raison de la transmission des forces et de la disparité de rigidité.

Par conséquent, ce sont les points les plus vulnérables aux blessures et au décollement.

La solution possible est l'utilisation de renforcements coniques de faible épaississement progressif.

Ainsi, on évite une rupture brusque de rigidité et on diminue la concentration de contraintes.

Ce type d'approche est appliqué dans le domaine de l'aéronautique [13].

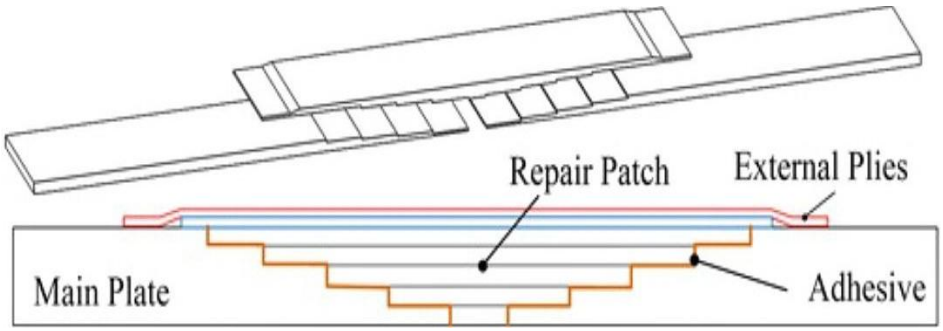


Figure 2.26 Patch effilé permettant de réduire les concentrations de contraintes

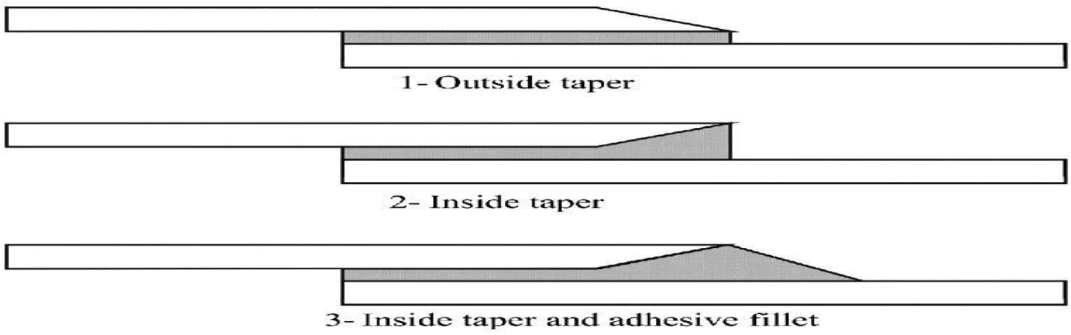


Figure 2.27 Configurations de patchs effilés (tapered patches) pour la réduction des concentrations de contraintes

On peut réduire les contraintes en utilisant un adhésif plus ductile, capable d'absorber une partie de l'énergie et de limiter les concentrations de contraintes. L'épaisseur de l'adhésif est également importante car une épaisseur plus grande réduit le cisaillement mais réduit la rigidité de l'assemblage [17].

Il existe une autre approche qui est d'augmenter la longueur de recouvrement afin de répartir la charge. Cependant, cette approche est également insuffisante car les forces se concentrent aux extrémités.

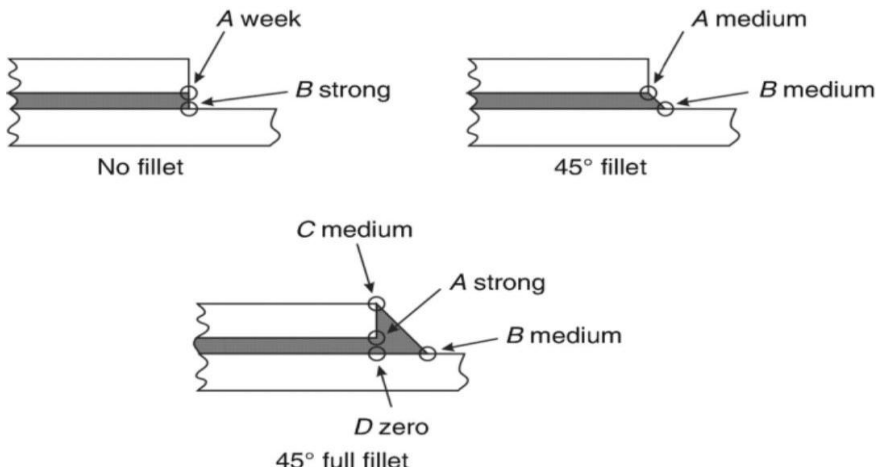


Figure 2.28 Effet des congés adhésifs (fillets) sur la réduction des concentrations de contraintes

Cette représentation illustre la dépendance du stress concentré avec la géométrie du joint local. En effet, pour l'absence de congé (No fillet), on remarque un fort confinement du stress au bord du recouvrement, conduisant ainsi à la formation d'une zone critique favorisant l'initiation des fissures.

Pour un congé adhésif à 45°, il est possible de lisser le gradient de contrainte et donc d'alléger la transition géométrique de ce joint. Pour le fillet intégral (Full fillet), la distribution de contrainte devient alors plus progressive, contribuant ainsi à diminuer notablement les valeurs maximales de contrainte. Ce constat valide ainsi qu'une modification locale de géométrie constitue une bonne solution pour contourner les problèmes aux effets de bord [17], et également comme les méthodes traditionnelles utilisées par les assemblages collés [1].

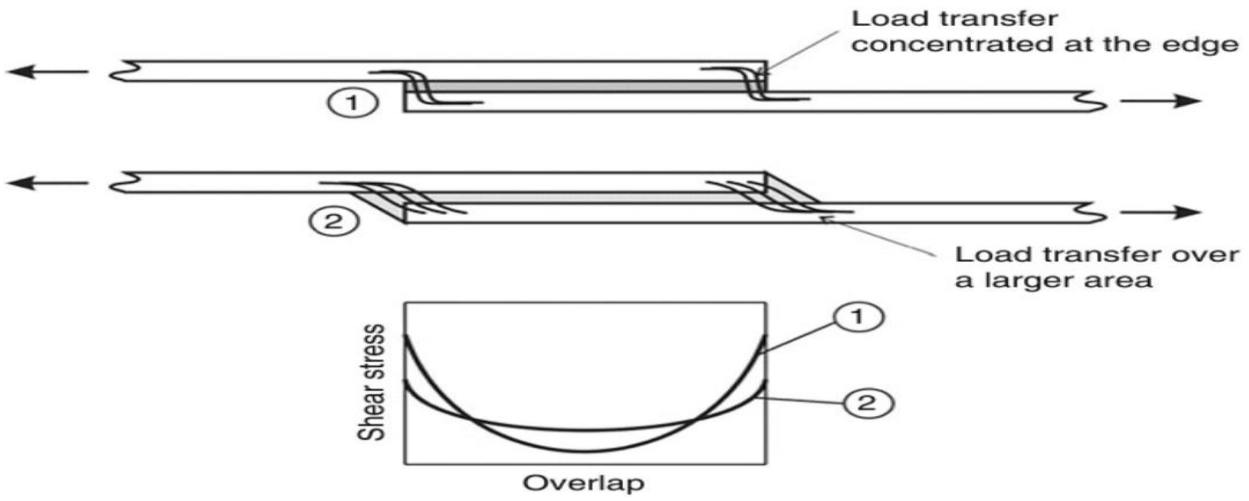


Figure 2.29 Concentration des contraintes aux extrémités et redistribution par modification géométrique

Pour le cas (1), l'application des forces est réalisée en position d'extrémité du recouvrement; cela donne des contraintes de cisaillement importantes et de hauts risques de rupture.

Pour le cas (2), il y a eu modification de la géométrie de telle façon que les forces soient appliquées sur une surface plus importante, ce qui a permis de minimiser les contraintes.

Ces résultats sont cohérents avec les modèles de Volkersen [12] et de Goland–Reissner [11], ainsi qu'avec les méthodes d'optimisation récentes [18].

L'effet de bord est donc lié à la concentration des charges aux extrémités et aux différences de rigidité entre les matériaux.

Parmi celles-ci on peut distinguer :

- utilisation de recoins adhésifs (fillets).
- optimalisation de la forme du joint.
- croissance de l'aire de contact pour l'échange de charges.

Ces mesures rendront possible la diminution de l'intensité des contraintes, la maximisation de leur résistance mécanique et augmentation de la durée de leur service [17][18].

2.4. Comportement en fatigue et tolérance aux dommages :

Le processus de fatigue est défini par un état d'altération croissante des matériaux sous l'effet d'un chargement dynamique cyclique. L'existence de microfissures s'accroît au fur et à mesure du nombre de cycles avant d'aboutir au stade de fissure critique qui provoque la rupture finale des matériaux [21][22].

À l'étape de formation de ces fissures, leur orientation suivra le plan d'action de cisaillement maximum avec un taux de propagation extrêmement bas et souvent insoupçonnable. À ce niveau, la fissure se mettra en position transversalement à la tension maximum avec un taux d'augmentation de propagation [23].

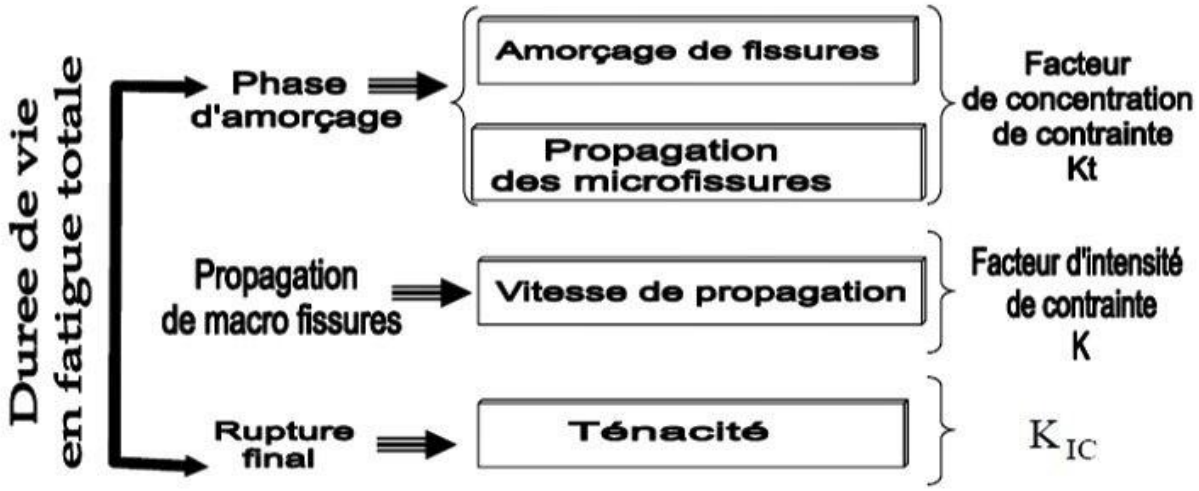


Figure 2.30 Phases d'endommagement en fatigue

La progression de la fissure se modélise par la théorie de la rupture, surtout avec l'étude de la relation entre la vitesse de propagation $\frac{d_a}{d_N}$ et le paramètre d'intensité de contrainte ΔK. La progression suit la loi de Paris, démontrant la présence de trois types de comportements : une phase initiale lente, un état de propagation stable, et une phase instable de rupture [21][24].

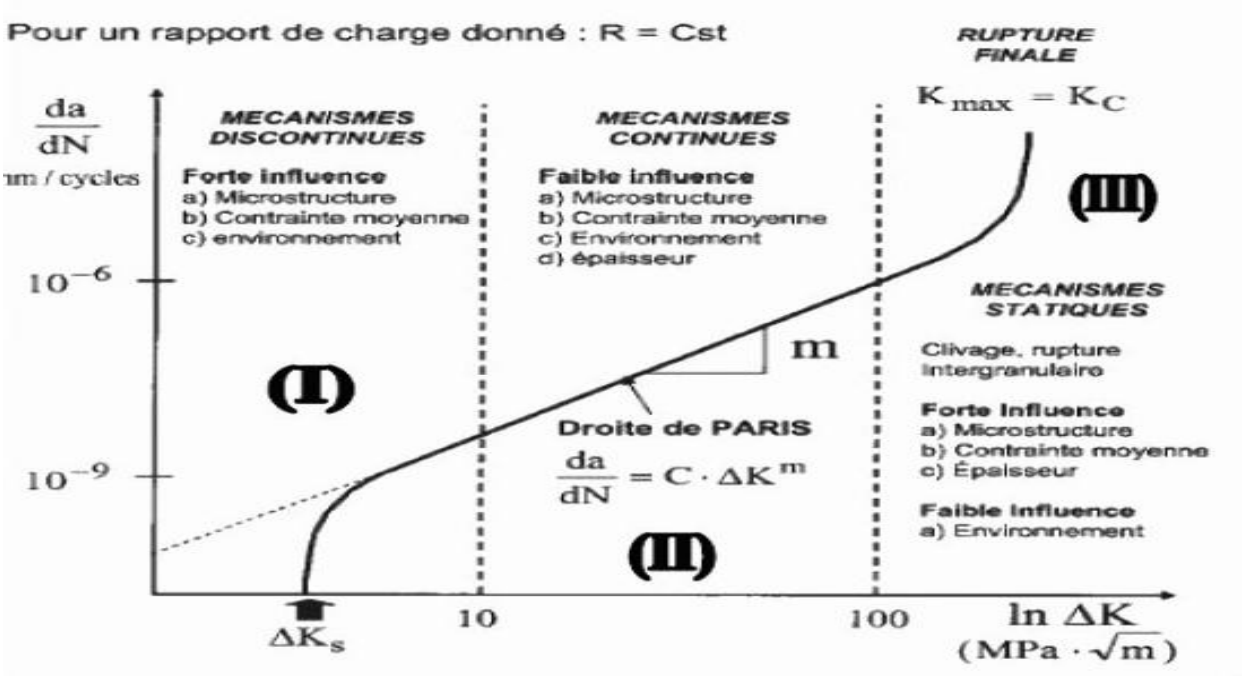


Figure 2.31 Évolution de la vitesse de propagation des fissures [24]

La propagation des fissures est liée à une variété de paramètres, dont l'effet dépend de l'état de détérioration de la structure :

- la microstructure du matériau.
- la tension moyenne appliquée.
- les conditions de l'environnement.
- la hauteur de la structure [24][25].

Chez les structures réparées avec un couvre-joint, l'ajout d'une plaque collante contribue à diminuer les efforts locaux à proximité de la fissure, ce qui conduit à son ralenti de progression. Le transfert d'efforts favorise l'accréditation aux effets de détérioration et augmente la durée de la vie en fatigue de la structure.

En aviation, il a été prouvé qu'il est possible d'augmenter sensiblement la durée de vie des structures sous l'action cyclique en raison de l'emploi de couvre-joints collés [7][19].

II.3. Technologies de mise en oeuvre:

3.1. Technique de collage(positionnement,pression,temperature):

Le collage de jointés assemblés par des couvre-joints ne se limite pas à une simple opération de collage entre deux surfaces avec un adhésif. Il s'agit en fait d'une étape industrielle complexe, qui dépend du préparat des surfaces, de l'alignement des pièces, de la pression d'enfichage et du cycle de durcissement thermique pour déterminer la qualité du collage et son comportement mécanique au service. Ces éléments sont abordés dans les ouvrages de base consacrés au collage structurel, en tant que variables d'étapes fondamentales, tout comme l'adhésif.[1][2][20]

3.1.1. Positionnement des pièces:

Au stade du positionnement, il convient de bien préparer les surfaces avant collage, car ceci garantit un assemblage de bon niveau. Cela consiste à garantir que les surfaces sont propres et débarrassées des contaminants, et de supprimer les couches superficielles comme les oxydes, ainsi que parfois à appliquer un primaire [1]. Un traitement préalable est quasi systématiquement indispensable pour permettre d'améliorer l'interface et la longévité du joint [20]. Ensuite vient le positionnement avec précision pour éviter d'éventuels problèmes comme le glissement et la torsion, qui faiblissent l'assemblage [2]. Enfin, le positionnement implique des aspects géométriques et de symétrie du couvre-joint : la symétrie favorise l'homogénéité des contraintes, alors que ce n'est pas le cas de la forme asymétrique [4].

3.1.2. Pression appliquée lors du collage:

Le collage implique une pression maîtrisée et homogène qui permet une bonne mise en contact des surfaces et un bon étalement du collage. L'application du collage doit impérativement se faire sous forme liquide pour favoriser l'adhérence et sécher ensuite lentement pour transmettre la force [20]. Cette pression est également un critère déterminant pour choisir le collage ainsi que sa performance [1]. Quant aux assemblages avec couvre-joint, la pression doit être régulière afin d'éviter les défauts tels que les bulles, les variations de profondeurs ainsi que les déplacements de joint [4].



Figure 2.32 Pression maitrisée et homogène

- Bon contact des surfaces
- épaisseur de glue line uniforme
- Pas de défaut
- Performance optimale

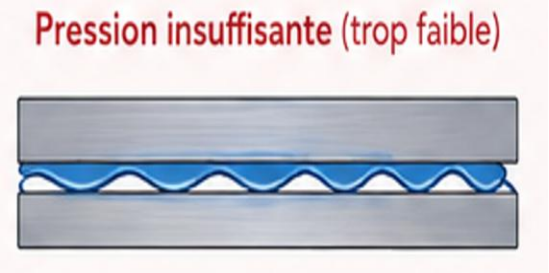


Figure 2.33 Pression insuffisante

- Mauvais contact
- Glue line épaisse et imprévue
- Présence possible de vide/bulles
- Réduction de la performance

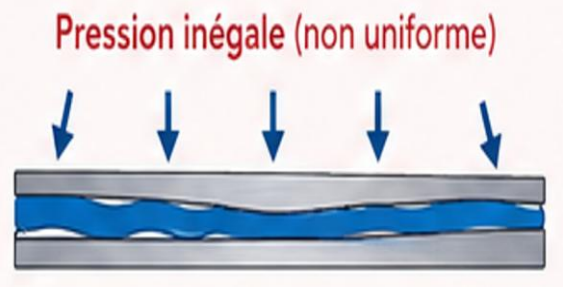


Figure 2.34 Pression inégale

- épaisseur variable de la glue line
- Risque de bulles et de déplacements de joint
- Processus imprévisible
- Performance incertaine

Par conséquent, on peut déduire que trop peu de pression laisse une glue line imprévue, tandis que la pression inégale rend le processus imprévisible. Par contre, la pression de collage ne peut varier selon les types d'assemblages car une valeur fixe de pression n'existe pas dans la littérature vérifiée. Il est indiqué dans cette littérature que la condition de fabrication dépend de nombreux paramètres, notamment le type de l'adhésif utilisé, le matériel du doseur et durcisseur, ainsi que celui du substrat. [2] [20].

3.1.3. Température de collage et de durcissement:

La température est l'un des facteurs fondamentaux de la soudure, car elle contribue à une bonne humidification de l'adhésif sur la surface. L'adhésif doit être liquide et moins visqueux d'abord, puis durcir lentement afin de transmettre la force [20]. Le durcissement est déterminé par la chaleur thermique et constitue une étape importante pour transformer l'état du matériau [20]. La température de polymérisation doit être adéquate au substrat de manière à éviter la perte de sa rigidité lors de l'assemblage avec le couvre-joint [2].

Enfin, les écarts de dilatation thermique peuvent causer des déformations et des moments flexionnels à la bordure du joint [4].

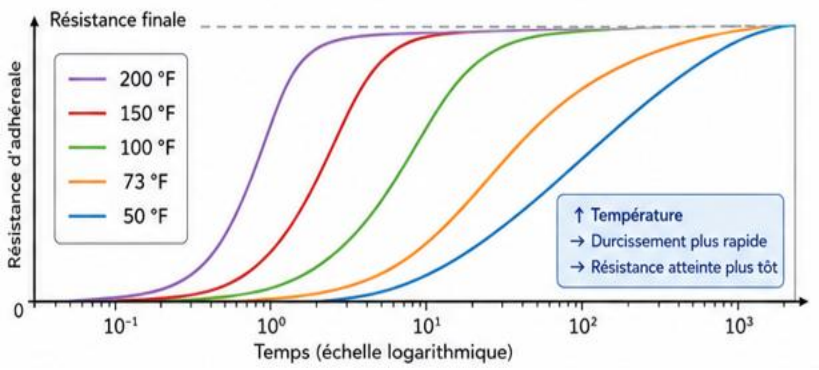


Figure 2.35 Cinétique de durcissement en fonction de la température

3.2. Préparation des surfaces (traitements mécaniques, chimiques):

La préparation des surfaces est un processus qui joue un rôle crucial lors de l'assemblage avec adhésif en termes de qualité et de durée de vie du collage réalisé. La préparation des surfaces a plusieurs objectifs essentiels, dont l'élimination des contaminants présents sur les surfaces des matériaux, la maximisation de la surface de contact réel entre les matériaux et l'adhésif, l'amélioration de la capacité de l'adhésif à mouiller la surface du matériau, ainsi que la création d'une surface plus réactive chimiquement.[1]

3.2.1 Objectifs de la préparation des surfaces:

La préparation des surfaces se fait dans le but [1]:

- éliminer les corps gras, les poussières, les oxydes, la rouille, la calamine ainsi que d'autres substances contaminantes à la surface du support.
- augmenter la rugosité contrôlée de la surface pour faciliter le mécanisme d'ancrage .
- améliorer l'énergie de surface et donc la mouillabilité par l'adhésif.
- obtenir une surface reproductible et stable.

3.2.2. Traitements mécaniques des surfaces:

a) Le ponçage (abrasion manuelle):

Le ponçage des surfaces par du papier abrasif, des étoffes émeriées et des tampons abrasifs constitue également une pratique courante dans le but d'améliorer l'adhérence. C'est parce que des surfaces légèrement rugueuses facilitent plus facilement le collage qu'une surface bien lisse et brillante à condition de n'avoir aucune surface polie après le processus usinage [26]. Ensuite, il faut effectuer un nettoyage au solvant pour éliminer toutes les particules [26]. D'après le bulletin technique de 3M, dans le cas où le sablage ne peut se faire, on peut employer le brossage métallique et la peau abrasif (les abrasifs recommandés seront de 120 à 220 pour l'acier et approximativement de 300 pour les alliages sensibles) [26]. L'usinage de la surface par des abrasifs supprime non seulement les oxydes et les contaminants, mais il augmente aussi la surface de collage [27].



Figure 2.36 Le ponçage

b) Le sablage (grit blasting):

Sablage est une méthode de préparation de surface qui peut aider à éliminer les impuretés tels que la rouille, l'oxydation et même la calamine. En revanche, elle doit se faire dans une manière prudente afin d'éviter d'abîmer des surfaces fines et fragiles [26]. Dans l'industrie aérospatiale, malgré l'efficacité du sablage et de l'abrasion mécanique dans l'amélioration de la qualité de collage, leur non précision et leur absence de reproductibilité peuvent compromettre le collage [28].



Figure 2.37 Le sablage

c) Brossage métallique:

La métal brushing est appliquée si l'on veut enlever la couche superficielle de corrosion ou bien préparer une surface métallique sans utiliser le sablage. Cela est moins uniforme que le sablage et doit être suivi d'une opération de dépoussiérage et de dégraissage.[26]



Figure 2.38 Brossage métallique

d) Peel ply et préparation des composites:

Quant aux matériaux composites, des techniques telles que le peel ply ou le laser ablation sont employées pour obtenir une surface répétitive. Selon les recherches effectuées par la NASA, les techniques conventionnelles telles que le grit blasting, le grinding et le peel ply peuvent manquer de répétitivité, et la technique laser ablation peut offrir un meilleur contrôle sur cette préparation de surface. [28]



Figure 2.39 Peel ply et préparation des composites

3.2.3. Traitements chimiques des surfaces:

a) Dégraissage au solvent:

Dégraissage constitue le premier stade du processus de préparation de la surface et concerne l'élimination de tout type de gras ou autres contaminateurs afin d'assurer une excellente adhésivité. Le dégraissage est effectué à l'aide de solvants, puis la surface est rincée et séchée complètement [26]. L'état de propreté de la surface est ensuite évalué par le test d'eau qui montre si la surface est propre grâce à l'absence de gouttelettes sur celle-ci [26].



Figure 2.40 Dégraissage au solvent

b) Nettoyage alcalin et detergents:

Selon toujours 3M, les surfaces peuvent être nettoyées par une solution détergente, et dans le cas des métaux, par immersions ou pulvérisations dans un dégraissant alcalin convenable. Cette forme de nettoyage contribue à l'élimination de certains contaminants avant la phase d'abrasion et de chimie spécialisée. [26]



Figure 2.41 Nettoyage alcalin et détergents

c) Attaque chimique / chemical etching:

L'utilisation du traitement chimique des surfaces est un moyen de favoriser la formation d'une bonne adhésion à la surface par modification et la destruction des oxydes instables afin d'activer la surface pour le collage. Les techniques de ce type mentionnées dans le livre blanc de Sika sont le grattage chimique, l'utilisation de nettoyants actifs et la mise en place de film formants [27].



Figure 2.42 Attaque chimique

d) Primaires d'adhésion:

Les primaires constituent un niveau médian permettant d'optimiser la compatibilité du substrat avec l'adhésif. Selon Sika, leur insertion dans la surface serait meilleure grâce à leur interaction topographique, fermeture des quelques cavités ainsi qu'une bonne chimie de surface avec l'adhésif. [27]



Figure 2.43 Primaires d'adhésion

e) Anodisation phosphorique des alliages d'aluminium:

La préparation chimique de l'alliage d'aluminium par anodisation à l'acide phosphorique avant de coller est une technique très courante utilisée dans le collage structuré. Le standardisé de NASA-STD-5017B conseille d'utiliser cette préparation comme indiqué par le standardisé ASTM D3933. En effet, la norme précise qu'une anodisation sulfurique avec scellement diminue l'adhésion, tandis que l'anodisation phosphorique est la meilleure solution qui existe pour le collage structuré [29].

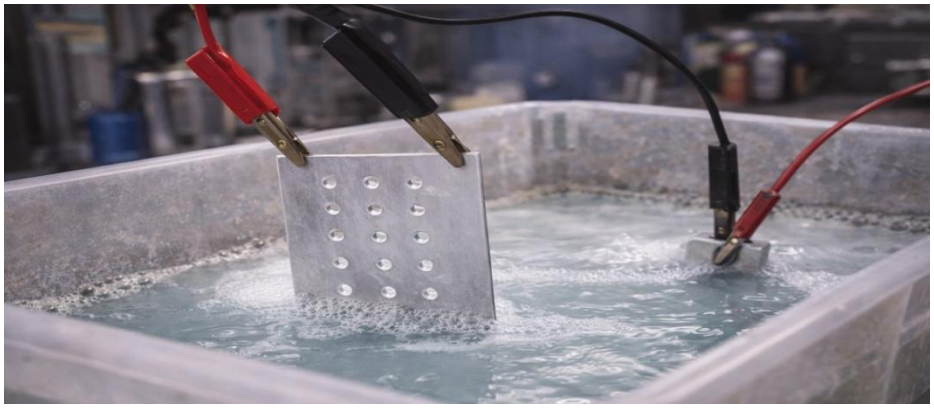


Figure 2.44 Anodisation phosphorique des alliages d'aluminium

f) Traitements physico-chimiques des polymères : flamme, corona, plasma:

Il est possible que dans le cas des plastiques ainsi que certains autres supports à surface d'énergie faible, les traitements chimiques conventionnels et abrasifs ne puissent pas suffire. On utilise alors des méthodes comme la flamme, la corona et le plasma afin de modifier la chimie de la surface. Selon Sika[27] :

- la flamme oxide la surface tout en augmentant la surface .
- le traitement par plasma active la surface grâce à un gaz ionisé, et améliore l'adhérence .
- dans certaines méthodes de plasma, il est même possible de créer des liaisons covalentes.

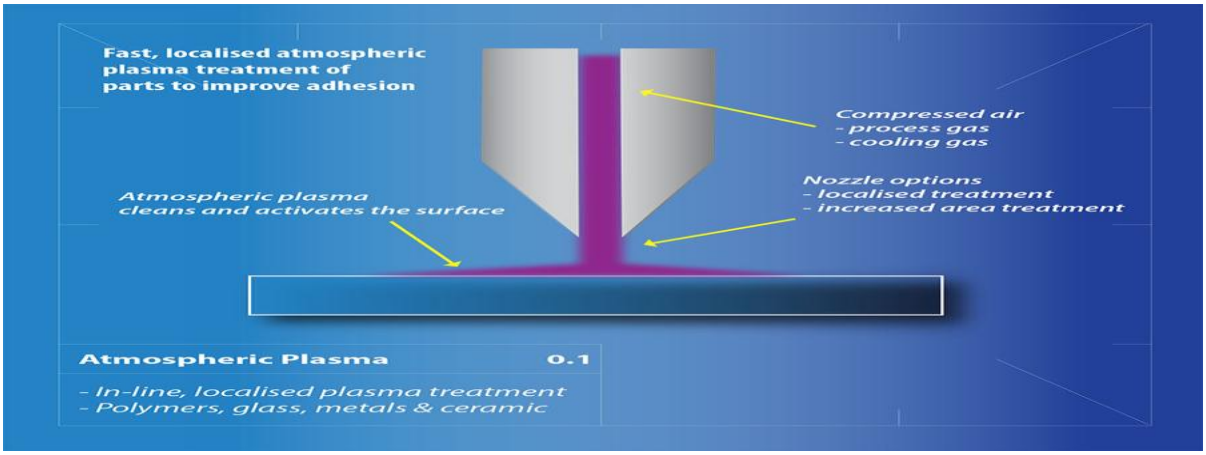


Figure 2.45 Traitement par plasma atmosphérique pour l'amélioration de l'adhérence

La préparation des surfaces est une étape qui doit être absolument faite pour obtenir une qualité parfaite des joints collés à couvre-joint. Il sert à nettoyer les surfaces, à augmenter leur surface de contact et à accroître leur adhérence. Des procédés mécaniques tels que l'ébavurage, le brossage et le sablage sont utilisés. Des procédés chimiques sont ensuite appliqués, notamment le dégraissage, le primaire et la phosphorisation anodique dans le domaine aéronautique [26] [29]. Ces procédés augmentent la mouillabilité et l'énergie d'adhésion, rendant ainsi la liaison entre l'adhésif et la sous-face plus facile [30].

3.3. Contrôles non destructifs des interfaces:

Les contrôles non destructifs (CND) des pièces collées avec couvre-joint visent à évaluer la qualité du collage et à identifier les défauts, tels que le décollement, les trous d'air, la porosité, le défaut de polymérisation, et les kiss-bonds. Pour ce faire, différentes méthodes sont employées, parmi lesquelles : l'ultrason, la thermographie infrarouge active, la shearography, et parfois aussi la radiographie et la microtomographie aux rayons X. Néanmoins, aucune méthode ne permet de détecter tous les défauts possibles de façon indépendante, c'est pourquoi il est nécessaire de combiner plusieurs techniques de CND [31] [32].

3.3.1. Contrôle ultrasonore:

L'ultrasonographie est le moyen le plus utilisé pour inspecter les joints collés. Elle utilise un son haut-fréquence qui passe dans l'ensemble pour analyser les réflexions obtenues. Cette technique est très efficace dans le repérage des couches décollées, zones sans colle, pores et variations locales de l'épaisseur ou de l'impédance acoustique. Dans le cas des défauts à interface, tels que la zone de contact kissing, diverses recherches prouvent que le signal de cisaillement est plus sensible que celui longitudinal normal. [32]



Figure 2.46 Contrôle ultrasonore

Les lois physiques principales utilisées en ultrasons sont les suivantes [33] [34] :

$$\boldsymbol{\lambda = \frac{c}{f}} \qquad \textbf{(15)}$$

λ: la longueur d'onde

c: la célérité acoustique

f: la fréquence

Plus la fréquence est élevée, meilleure est la résolution, mais plus la pénétration diminue.

$$\boldsymbol{Z = \rho \times c} \qquad \textbf{(16)}$$

Z: l'impédance acoustique

ρ: la masse volumique du milieu

c: la célérité de l'onde

La différence d'impédance entre deux milieux gouverne la réflexion à l'interface. [34]

Pour une incidence normale, le coefficient de réflexion en intensité peut s'écrire :

$$\mathbf{R} = \left(\frac{\mathbf{Z_2 - Z_1}}{\mathbf{Z_2 + Z_1}}\right)^{\mathbf{2}} \quad \textbf{(17)}$$

et le coefficient de transmission :

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{4 Z_1 Z_2}}{\mathbf{(Z_1 + Z_2)^2}} \quad \textbf{(18)}$$

Ces relations expliquent pourquoi un défaut interfacial ou une zone décollée renvoie un écho plus marqué qu'une interface saine. [34]

Pour localiser un réflecteur interne par la méthode pulse-echo [34]:

$$\mathbf{d} = \frac{\mathbf{c \times t}}{\mathbf{2}} \quad \textbf{(19)}$$

d: la profondeur

c: la vitesse acoustique dans le matériau

t: le temps aller-retour de l'onde.

3.3.2. Thermographie infrarouge active:

L'active thermographie IR consiste en le chauffage thermique de la structure et dans la mesure de sa réponse de température par caméra IR. La discontinuité interfaciale affecte la diffusivité thermique et produit des contrastes de température qui montrent l'existence d'un décollement, d'une absence ou d'une hétérogénéité locale du collage. C'est une technique couramment employée pour l'étude des structures collées ou réparées par collage. [35]



Figure 2.47 Thermographie infrarouge active

Le principe fondamental est l'équation de diffusion thermique :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad \textbf{(20)}$$

T: la temperature

α: la diffusivité thermique

Un défaut d'interface entrave la conduction thermique, affectant ainsi le comportement temporel et spatial de la température enregistrée à la surface. [35] [36]

Pour la thermographie lock-in, l'approfondissement d'enquête dépend de la distance de diffusion thermique :

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad \textbf{(21)}$$

μ: la longueur de diffusion thermique

α: la diffusivité thermique

f: la fréquence de modulation

La basse fréquence facilite une inspection plus profonde, toutefois, avec une résolution plus basse.

3.3.3. Shearographie laser:

La shearographie est un outil d'interférométrie optique plein champ utilisant le gradient du déplacement de surface sous la présence d'une charge légère imposée au composant (thermique, mécanique, vibratoire ou sous vide). L'endommagement de la surface peut créer un comportement différent à la surface ; cet effet sera reflété dans l'image de shearography. Cette méthode est couramment utilisée pour l'inspection de la structure composite et pour les réparations collées.

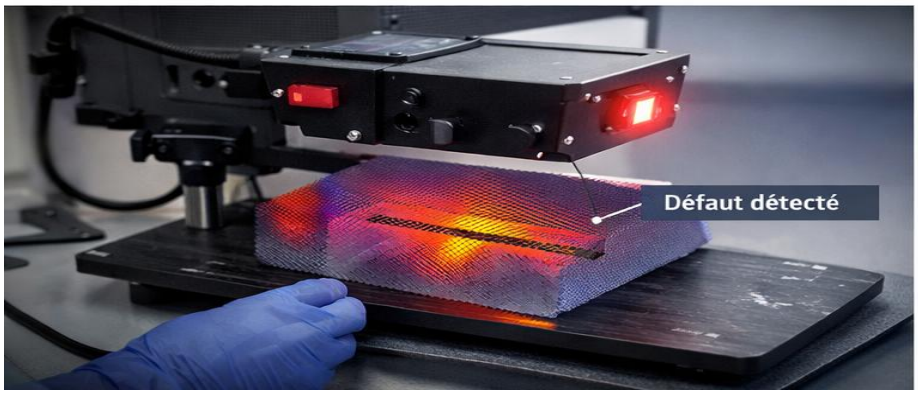


Figure 2.48 Shearographie laser

La base de l'utilisation du shearography est la mesure de la dérivée du déplacement, c'est-à-dire :

$$\frac{\partial w}{\partial x} \quad \textbf{ou} \quad \frac{\partial w}{\partial y} \tag{22}$$

w est le mouvement transversal au plan. Donc, la technique de shearographie ne détecte pas la distance totale, mais son changement localisé, ce qui fait que cette méthode est extrêmement sensible aux zones faibles de l'interface.

3.3.4. Radiographie et micro-tomographie X :

L'imagerie par rayon X et particulièrement l'imagerie micro-CT est capable de déceler les défauts volumétriques présents dans la couche d'adhésion, notamment les pores, les inclusions, les défauts de distribution ou même certaines fissures internes. Toutefois, il est important de noter, en lisant la littérature, que ces techniques ne sont pas nécessairement les plus efficaces pour détecter les liaisons faibles au niveau de l'interface ; elles constituent généralement un complément à l'ultrason. [31] [37]

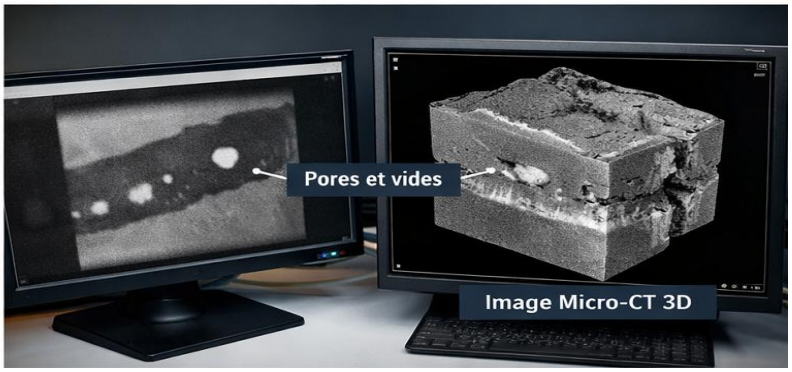


Figure 2.49 Radiographie/Micro-CT

Dans les cas des jointures collées, le choix de la méthode CND dépend du défaut recherché. Pour la détection des décollages et défauts intérieurs, il faut utiliser la technologie des ultrasons, pour le contrôle sur grandes surfaces et les défauts à proximité de l'interface, la thermographie active infrarouge, et pour l'identification des zones décollées par leurs propriétés de comportement sous faible chargement, la shearographie. À la fin, on doit compléter le contrôle par la radiographie et la microtomographie afin de voir les vides et structure de couche de collage [31] [37].

3.4. Compatibilité avec les procédés industriels:

Les questions de l'industrialisation des couvre-joints dans l'assemblage sont liées à leur adaptation aux processus de fabrication et de maintenance de haute qualité, de répétabilité et de traçabilité qui dépendent du choix de matériel, équipements et niveau de robotisation [18]. Les matériaux doivent être compatibles mécaniquement et thermiquement, souvent il s'agit de matériaux composites largement utilisés dans l'aéronautique afin de réaliser les constructions légères et équilibrées [16]. Les revêtements adhésifs doivent être facilement applicables avec une préférence pour films pour leur régularité et compatibilité avec le travail au vide ou autoclave, ainsi que pâtes pour les opérations de réparation [20]. Préparation des surfaces par nettoyage, abrasion et traitement chimique est obligatoire pour fournir la meilleure adhésion et prévenir toute contamination [26]. L'alignement et symétrie des joints sont très importants pour minimiser concentration des contraintes et leurs pelages [11]. Processus de polymérisation doit être adapté aux possibilités industrielles et thermiques [15]. Contrôle des qualités est effectué à base de visuels inspection et méthodes non destructives d'ultra-sounds et thermographie [31].

Enfin, ces assemblages améliorent la résistance globale, réduisent les fixations mécaniques et augmentent la résistance à la fatigue et la durée de vie des structures [9].

Chapitre III Objectifs de la recherche

L'étude du renforcement des assemblages collés par couvre-joint s'inscrit dans une démarche d'amélioration des performances mécaniques, en particulier la réduction des concentrations de contraintes et l'augmentation de la durabilité des structures. Les assemblages collés permettent une répartition plus homogène des efforts par rapport aux assemblages mécaniques traditionnels, mais leur comportement reste fortement dépendant de la géométrie, des propriétés des matériaux et des conditions de chargement [1][2][18].

III.1 Objectifs principaux :

1.1. Comprendre les mécanismes fondamentaux de renforcement par couvre-joint :

Le couvre-joint agit comme un élément structural permettant de redistribuer les contraintes dans la couche adhésive et de limiter les concentrations au niveau des bords libres, zones critiques identifiées dans les assemblages collés. Selon le modèle de Volkersen [12], le transfert de charge est principalement assuré par les contraintes de cisaillement dans l'adhésif :

$$\boldsymbol{\tau\,(x) = \frac{P}{b.L}} \qquad \textbf{(23)}$$

Cependant, cette contrainte n'est pas uniforme et atteint des valeurs maximales aux extrémités du joint. En tenant compte des effets de flexion, Goland et Reissner [11] ont montré que des contraintes de pelage apparaissent :

$$\boldsymbol{\sigma_{peel} \propto M(x)} \qquad \textbf{(24)}$$

L'ajout d'un couvre-joint permet :

- de diminuer τ_{max} et σ_{peel}
- de réduire les gradients de contraintes
- de retarder l'amorçage de fissures

Ainsi, le renforcement améliore significativement la résistance statique et la tolérance à l'endommagement [4][18].

1.2. Développer des modèles prédictifs pour la conception optimale :

Le développement de modèles prédictifs constitue une étape essentielle pour optimiser la conception des assemblages renforcés. Deux approches complémentaires sont utilisées :

- **Modèles analytiques** (Volkersen, Goland–Reissner)
- **Modélisation numérique** (éléments finis – Abaqus)

Ces modèles permettent d'étudier l'influence des paramètres géométriques (longueur L, épaisseur t_a, rigidité) sur la distribution des contraintes. Une relation fondamentale montre que :

Longueur L est augmente $=>\ \tau_{max}\ diminue$

Une relation fondamentale montre que : Cependant, les résultats issus de l'étude paramétrique montrent qu'au-delà d'une longueur critique, la réduction des contraintes devient marginale, ce qui confirme l'existence d'un optimum géométrique [8] [17].

1.3. Évaluer expérimentalement les performances :

La validation expérimentale permet de confronter les modèles aux conditions réelles, en tenant compte des défauts de collage qui influencent fortement le comportement mécanique

Le comportement mécanique est décrit par : $\sigma = f(\varepsilon)$

En fatigue, la propagation des fissures suit la loi de Paris [21] :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \qquad (25)$$

Les résultats expérimentaux montrent que :

- la présence de défauts augmente les contraintes locales.
- la contrainte de cisaillement maximale dépend de la taille et de la position des défauts.
- le couvre-joint réduit le facteur d'intensité ΔK et améliore la durée de vie.

Ces observations confirment l'importance d'une analyse combinée mécanique et probabiliste du comportement des joints collés.

1.4. Établir des recommandations de conception pour applications industrielles :

des recommandations de conception peuvent être établies :

- Choisir une longueur de recouvrement optimale pour limiter les concentrations de contraintes Optimiser l'épaisseur du couvre-joint afin d'assurer un compromis entre rigidité et contrainte Assurer une compatibilité des modules d'Young : $E_{patch} \approx E_{substrat}$
- Réduire les effets de pelage par des configurations symétriques.
- Minimiser l'influence des défauts de collage par un contrôle de fabrication.
- Améliorer la résistance à la fatigue grâce à une meilleure redistribution des contraintes.

Ces recommandations permettent d'optimiser la fiabilité et la performance des assemblages dans un contexte industriel exigeant [6][19].

III.2. Objectifs spécifiques:

2.1. Quantifier le gain mécanique en fonction des paramètres du couvre-joint:

L'important dans ce qui précède est que le gain de la couverture mécanique d'un couvre-joint n'est pas simplement "surface supérieure = résistance supérieure". Pratiquement, l'effet de la couverture mécanique se traduit par une meilleure transmission de charge, une diminution de l'excentrique dans le cas d'un couvre-joint symétrique et une atténuation des points de charge de pelage et de cisaillement sur les bords du recouvrement. Dans les joints collés, ces points de charge de pelage et de cisaillement demeurent localisés aux bords du recouvrement, alors que la partie intermédiaire du recouvrement est souvent moins efficace. [15]

2.1.1. Comment quantifier le gain mécanique:

Le gain mécanique du couvre-joint peut être évalué avec quatre indicateurs simples :

$$G_P = \frac{P_{u,renforcé}}{P_{u,référence}} \quad (26)$$

$$G_K = \frac{K_{renforcé}}{K_{référence}} \quad (27)$$

$$G_\sigma = 1 - \frac{\sigma_{max,renforcé}}{\sigma_{max,référence}} \quad (28)$$

$$G_N = \frac{N_{f,renforcé}}{N_{f,référence}} \quad (29)$$

P_u: la charge ultime

K: la rigidité

σ_{max}: la contrainte maximale dans la pièce réparée

N_f: la durée de vie en fatigue

2.1.2. Influence des paramètres du couvre-joint:

Le comportement mécanique d'un joint collé avec couvre-joint est influencé fortement par la géométrie et les propriétés physiques de celui-ci. Les critères qui influencent de manière significative sont la longueur du couvre-joint, son épaisseur, sa largeur, la forme de ses extrémités et le matériau employé pour son obtention. Ils ont un effet sur la transmission de forces entre deux assemblages et leur répartition dans l'adhésif et dans les sous-ensambles. [39] [40]

a) La longueur du couvre-joint:

Le fait de disposer d'un couvre-joint ayant une grande longueur permet une bonne transmission des forces. Par conséquent, en augmentant le domaine de liaison, on peut avoir une bonne distribution des efforts, ce qui entraîne la diminution de zones de contraintes fortes autour de la zone danoisée. Cependant, il faut noter que cet avantage n'est pas infini. [15] [41]

b) L'épaisseur du couvre-joint:

Le couvre-joint d'épaisseur élevée joue aussi un rôle primordial. Un couvre-joint épais a tendance à être rigide et absorbe donc une part importante des efforts externes. En revanche, une épaisseur trop importante de couvre-joint peut causer une rigidification anormale de la pièce et entrainer l'apparition de points forts de concentration de contraintes, en particulier aux extrémités. [15]

c) La largeur du couvre-joint:

Le couvre-joint de largeur importante sert pour augmenter la surface de collage. Cela permet en théorie de réduire les contraintes moyennes appliquées à l'adhésif, car l'action des efforts sera

repartie sur une surface de collage supérieure. Cela va améliorer la résistance du couvre-joint au risque qu'une largeur trop importante crée de nouvelles tensions au niveau de l'ensemble de l'assemblage. [40]

d) La forme des extrémités du couvre-joint:

La forme de couvre-joint aux extrémités joue également un rôle primordial afin d'éviter les points forts de concentration de contraintes. De fait, des extrémités brusques favorisent les contraintes de cisaillement et de pelage, alors que des extrémités biseautées et régulières assureront une meilleure transition de l'effort externe.[4]

e) Le matériau du couvre-joint:

Le matériau utilisé pour le couvre-joint joue un rôle très important dans sa rigidité et sa compatibilité avec les matériaux de base. La rigidité excessive pourrait perturber le partage des efforts tandis que le choix approprié de matériau permettra une distribution des efforts et une meilleure performance de l'ensemble de l'assemblage. Par ailleurs, la question de la compatibilité du matériau doit être pris en compte par rapport à l'adhésif et à la pièce à renforcer. [39] [41].

2.2. Analyser la sensibilité aux paramètres géométriques et matériaux:

L'analyse de sensibilité des collages avec couvre-joint évalue l'influence des paramètres géométriques et de leurs matériaux sur les contraintes, le coefficient de rigideur et la charge de rupture. Parmi ces paramètres, figurent principalement la longueur de recouvrement, l'épaisseur d'adhésif et de couvre-joint, forme des bouts de pièces et propriétés mécaniques des matériaux et leurs interactions avec la géométrie et préparation de surface [39] [42].

Longueur de recouvrement améliore le transfert de charges jusqu'à une certaine valeur, à partir de laquelle des contraintes aux extrémités dominent. Épaisseur d'adhésif et rigidité du couvre-joint doivent être réglées afin de prévenir soit des concentrations de contraintes, soit des pertes de rigide, avec l'avantage des formes biseautées [39] [43] [44].

Également, la dépendance de comportement du collage se fait par le biais de matériaux utilisés: ductilité de l'adhésif conduit à répartition plus uniforme de contraintes, alors que rigidité différente du substrat et du couvre-joint conduit à concentrations de contraintes, surtout dans structure composite/métal [39].

Enfin, lors de l'analyse on considère les contraintes maximales, charge de rupture et modes de rupture, faisant comprendre le fort influence sur performances de paramètres de processus (taux d'humidité, cycle de cuisson, préparation de surface) [39] [29].

2.3. Étudier le comportement en environnement sévère:

Le comportement des collages sous l'effet de l'environnement sévère est important étant donné que celles-ci sont soumises à l'humidité, aux variations thermiques, à la chaleur, à l'épaisseur du brouillard salin et à des environnements chimiques et marins. Ceci entraîne la diminution progressive des propriétés physico-mécaniques par plastification de l'adhésif, hydrolyse ou fragilisation de l'interface adhésif/substrat [42] [45] [46].

L'hygrothermie est importante puisque l'eau est absorbée par l'adhésif, la rigidité ainsi que la résistance sont diminuées par la température dans l'environnement à la température voisine de la transition vitreuse, entraînant la modification du type de l'interface de rupture, cohésion/interfacial [47]. Au sein de l'environnement saline et marin, l'action conjointe de l'eau et ions diminue la résistance et peut se combiner avec la corrosion du substrat et fatigue environnementale des systèmes CFRP/acier et FRP [45] [47].

L'évaluation de l'âgeing est réalisée par la résistance et rigidité résiduelles ainsi que le type de rupture. Les principaux mécanismes de l'âgeing sont définis par la diffusion d'humidité, des réactions chimiques, non-adéquations thermiques et faiblesse interfaces [42] [46].

2.4. Évaluer la fiabilité à long terme:

De même, la durabilité d'un assemblage collé s'écrit non seulement dans sa capacité résistante initiale, mais aussi dans sa fatigue résistance, vieillissement environnemental, variabilité de fabrication et interface stabilisation [39]. Parce qu'à l'état de chargement cyclique, l'évaluation de l'assemblage est sensible au stress concentration et son durée de vie dépend de la longueur de superposition, épaisseur du joint, qualité de surface et environnement. En outre, il apparaît également que l'environnement a un impact majeur sur la résistance des joints des composites CFRP/époxye aux essais de fatigue [48].

Par conséquent, l'étude de la fiabilité de ces composants doit faire appel à une analyse probabiliste, étant donné que les assemblages collés possèdent naturellement des tolérances

géométriques et de porosité ainsi que la préparation de surface. Ceci est une condition importante pour réaliser une étude plus approfondie sur les effets des variations dans l'assemblage collé [10] [29].

D'où l'on peut en déduire que l'assemblage collé doit être évalué par quatre caractéristiques de sa performance : sa résistance statique, sa fatigue, son environnement vieillissant et sa variabilité de fabrication. Ainsi, l'efficacité d'un joint protecteur ne doit pas s'arrêter uniquement à la charge maximum initiale, mais également à sa maintenance dans le temps [39] [10].

Chapitre IV : Approche numérique

IV.1. Introduction :

L'utilisation des logiciels de simulation est aujourd'hui très importante dans le domaine de l'assemblage par collage. Ces outils permettent de comprendre comment le système fonctionne et d'identifier des pistes pour l'améliorer. Parmi ces logiciels, ABAQUS est très utilisé, car il peut représenter avec précision le comportement des matériaux et des colles. Après avoir fait la simulation avec ABAQUS et obtenu les résultats, il est nécessaire de les analyser en détail pour en tirer des conclusions utiles et améliorer le processus d'assemblage. L'objectif de ce chapitre est donc d'étudier ces résultats dans le cas spécifique de l'assemblage collé. Nous allons voir les différentes étapes et méthodes qui permettent de bien analyser ces données et de prendre de bonnes décisions. Tout d'abord, nous allons nous intéresser aux principaux indicateurs de performance à prendre en compte. Cela peut être, par exemple, le temps nécessaire pour l'assemblage, la quantité de matériaux utilisée, ou encore des éléments propres au collage comme la résistance de la colle. Nous expliquerons pourquoi ces indicateurs sont importants et comment les évaluer pour juger la performance globale. Ensuite, nous verrons qu'il est essentiel de vérifier les résultats de la simulation. Cette étape permet de s'assurer que le modèle utilisé représente bien la réalité. Nous présenterons les différentes méthodes de validation et les critères à respecter pour garantir des résultats fiables. Enfin, nous expliquerons comment utiliser ces résultats pour améliorer le processus d'assemblage collé. Nous verrons comment identifier les points forts, les faiblesses et les possibilités d'amélioration. Nous montrerons aussi comment proposer des solutions concrètes et évaluer leur impact sur les performances globales.

IV.2. Modules :

Dans ce travail, ABAQUS est utilisé pour la simulation d'un assemblage collé afin d'analyser son comportement mécanique. L'étude porte sur deux plaques en aluminium 2024-T3, supposées élastiques, avec un module d'Young de E=68 800 MPa et un coefficient de Poisson de v=0.33. Chaque plaque possède une épaisseur de e=5 mm et une section de S=100×50 mm². Les deux plaques sont assemblées côte à côte, puis une couche de colle Adekit A140 est appliquée sur leurs surfaces de contact. Cette colle est supposée élastique, avec un module d'Young de E=2690 MPa, un coefficient de Poisson de 0.30 et une épaisseur de e=0,15 mm, avec une section de S=50×50

mm². Ensuite, un couvre-joint est placé au-dessus de la zone collée afin de renforcer l'assemblage. L'ensemble est encastré à une extrémité et soumis à une traction de 30 MPa appliquée à l'extrémité opposée, afin d'étudier sa réponse mécanique.

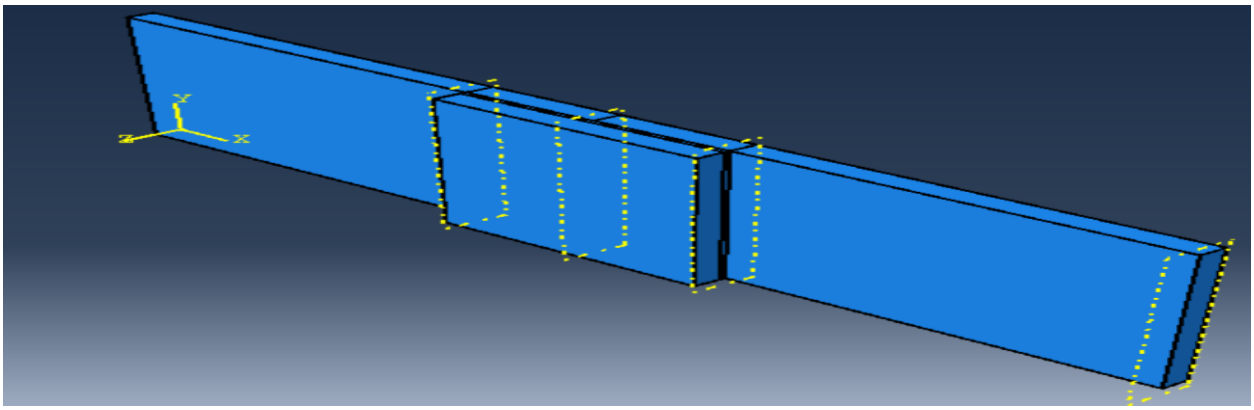


Figure 4.1 Le module a réalise

2.1. Module PART :

Ce module permet de modéliser des pièces par révolution ou par extrusion, ainsi que de créer et modifier différentes entités géométriques telles que les points, les lignes et les plans de référence. Il permet également de définir des pièces déformables ou rigides. Pour créer les différentes pièces de l'assemblage, on clique deux fois sur Parts dans l'arbre du modèle, puis sur Create Part. La première étape consiste à créer la première plaque en la nommant Plaque 1, puis en sélectionnant les options 3D / Déformable / Solid / Extrusion. La taille approximative (Approximate size) est fixée à 200 (**Figure 4.3)**. Ensuite, un rectangle de S=50×100 mm² est dessiné, puis après validation par Done, une profondeur de e=5 mm est introduite dans la fenêtre Edit Base Extrusion (**Figure 4.4)**. Une seconde plaque identique, nommée Plaque 2, est ensuite créée en reproduisant exactement les mêmes dimensions et propriétés géométriques que la première (**Figure 4.6)**.

Pour la plaque de colle on suit ce qui précède , juste pour l'État de création ,On Créer carrée de S=50x50 mm² ont cliqué sur Done la fenêtre (Edit Bas Extrusion)s'affiche, mettre la valeur e=0.15 dans la case (Depth) (**Figure 4.10**) et on cliqué sur OK .

Pour la plaque de couvre-joint On Créer carrée de S=50x50 mm² ont cliqué sur Done la fenêtre (Edit Bas Extrusion) s'affiche, mettre la valeur e=5 dans la case (Depth) (**Figure 4.14**) et on cliqué sur OK .

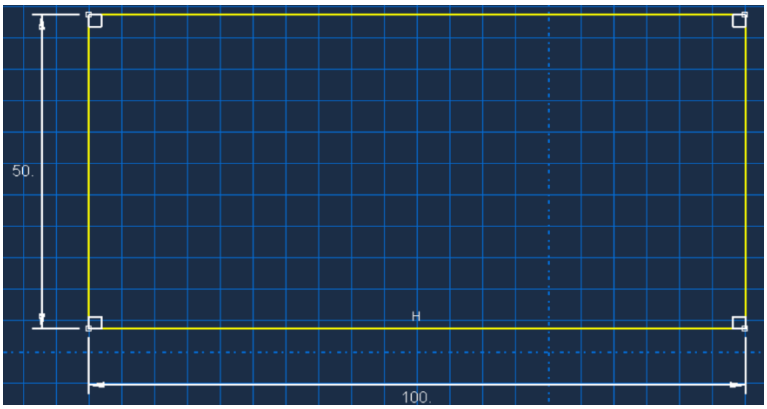


Figure 4.2 désignation de la plaque

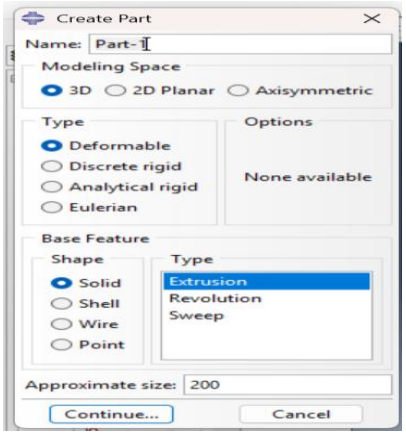


Figure 4.3 Création de la plaque

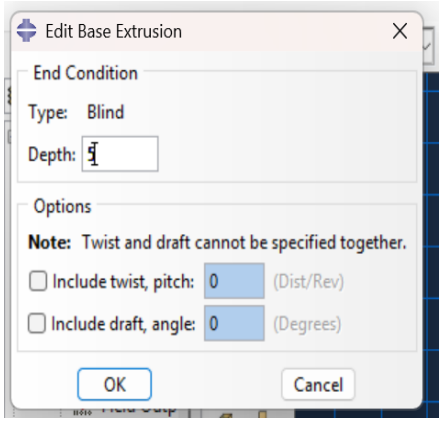


Figure 4.4 Désignation de l'épaisseur

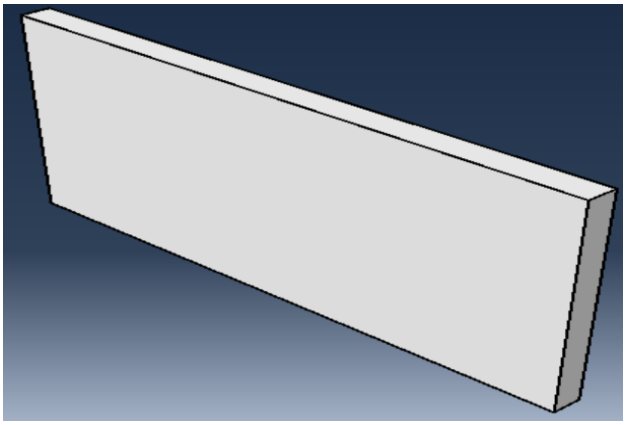


Figure 4.5 Confirmation de l'extrusion

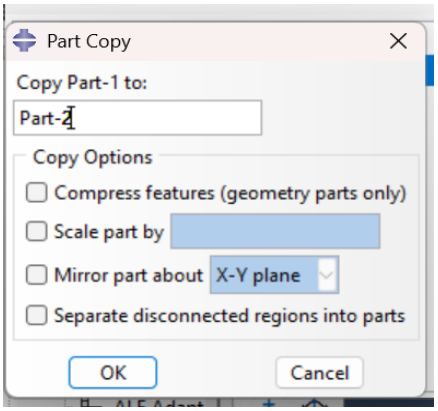


Figure 4.6 Part copy plaque 1

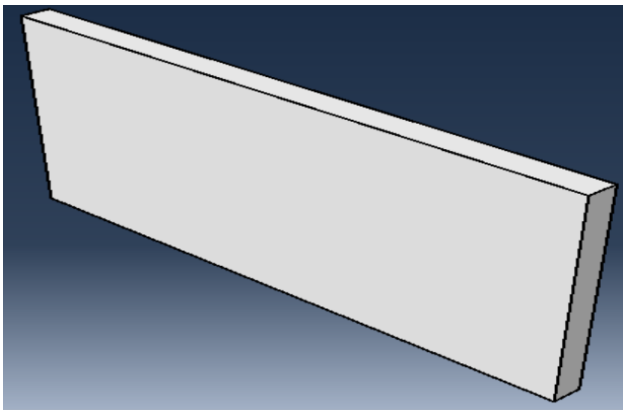


Figure 4.7 Confirmation de l'extrusion

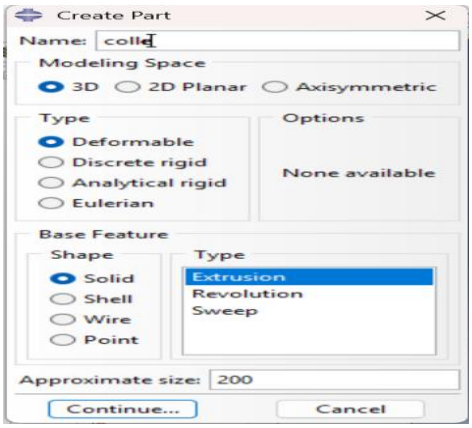


Figure 4.8 Création de colle

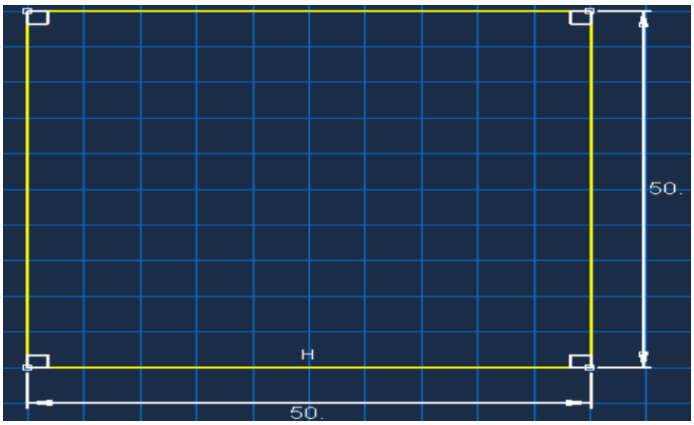


Figure 4.9 Désignation de colle

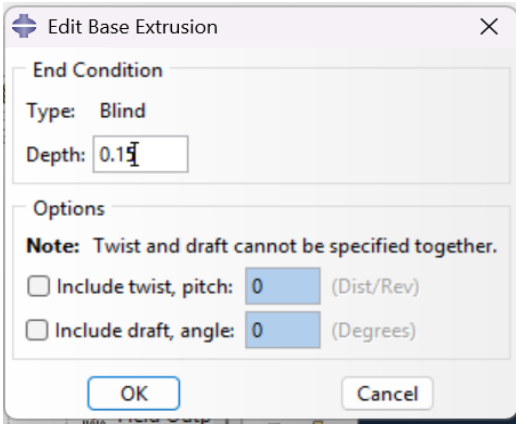


Figure 4.10 Désignation de l'épaisseur de colle

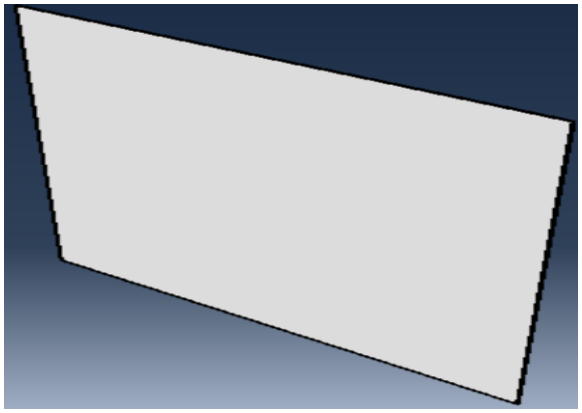


Figure 4.11 Confirmation de l'extrusion

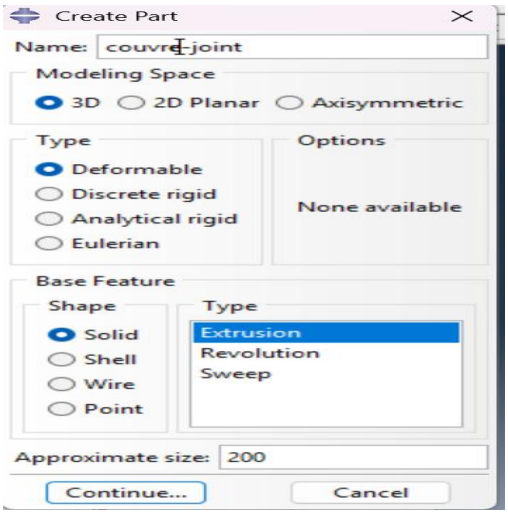


Figure 4.12 Création de couvre-joint

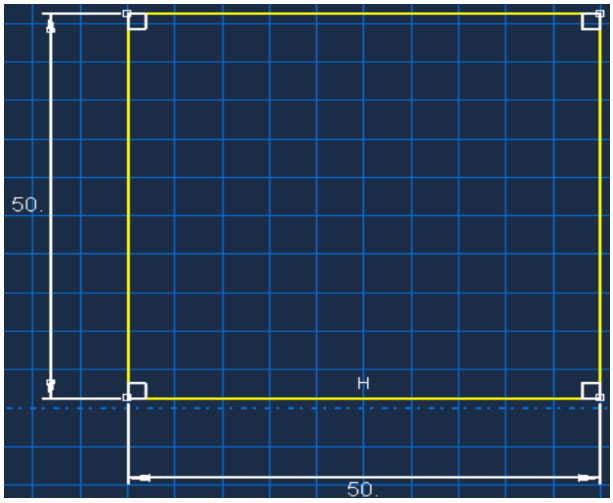


Figure 4.13 Désignation de couvre-joint

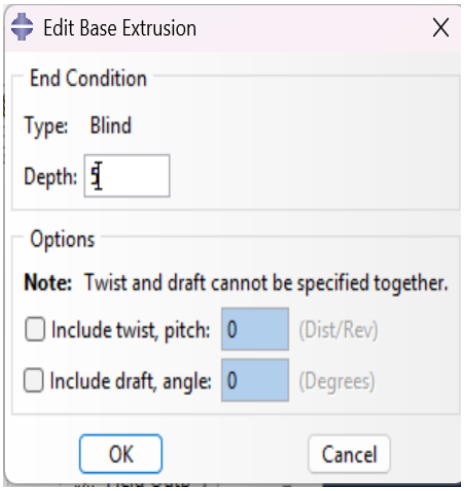


Figure 4.14 Désignation de l'épaisseur de couvre-joint

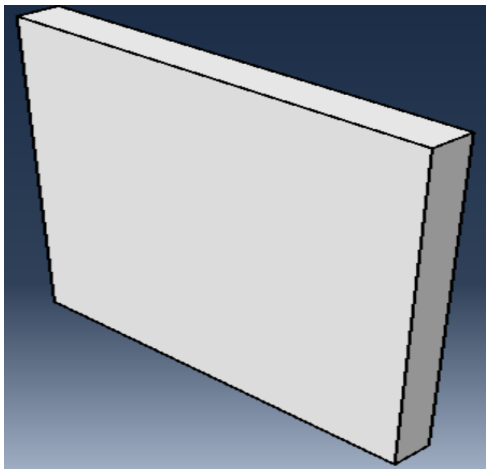


Figure 4.15 Confirmation de l'extrusion

2.2. Module PROPERTY :

Le module PROPERTY permet de définir les propriétés du ou des matériaux des parties déformables qui constituent le modèle ainsi que et la masse des corps rigides si nécessaire. Dans ce module et selon le cas étudié, on est amené à définir des propriétés élastiques et/ou plastiques (ou autres). Pour ce faire il suffit de cliquer sur l'icône (Création d'un matériau) (**Figure 4.16**). Il est préférable de donner un nom spécifique à chacun des matériaux ce qui permet la création d'une base de données propre au projet. On définit par la suite : les propriétés élastiques via (Mechanical/ Elasticity/Elastic) (module d'Young et le coefficient de Poisson pour le cas par exemple d'un matériau isotrope) et les propriétés plastiques via (Mechanical/Plasticity/Plastic). Dans ce module on crée aussi la section du matériau et l'assignement à toutes les parties de la pièce ou du mécanisme étudiés (**Figure 4.16**).

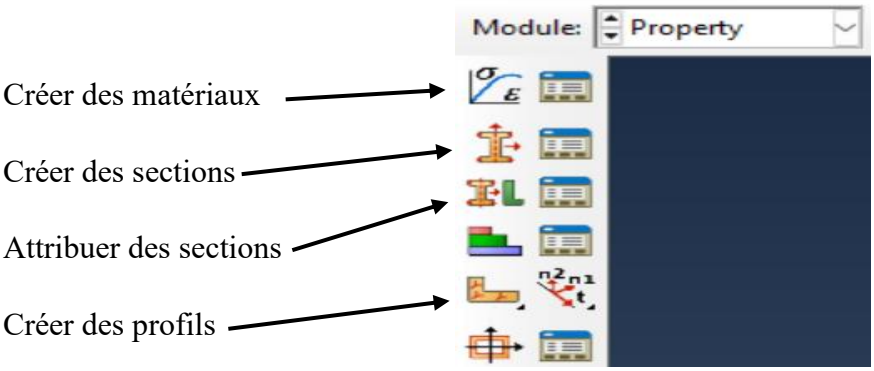


Figure 4.16 Le module property

Pour Notre plaque : Définition du matériau et ses propriétés Dans l'arbre du modèle double cliquer sur (Materials) on Renomme le matériau aluminium 2024T3, on Donne une description (au choix) On Cliquer sur l'onglet: (Mechanical/Elasticity/Elastic) Introduire le module d'Young : E=68800 MPa Introduire le coefficient de Poisson : e=0.33 (**Figure 4.17**) on Clique sur OK Définition et affectation des propriétés de la section Dans l'arbre modèle on double-cliquer sur Sections Dans la boite de dialogue (Create Section) qui s'affiche On Renomme la section (Section_plaque) Dans la liste (Category), on sélectionne Solid Dans la liste Type, on sélectionne (Homogeneous) (**Figure 4.18**) On Clique sur Continue Dans la boite de dialogue Edit Section on Accepte la sélection par défaut du matériau aluminium 2024T3 (**Figure 4.19**) On Cliquer sur OK.

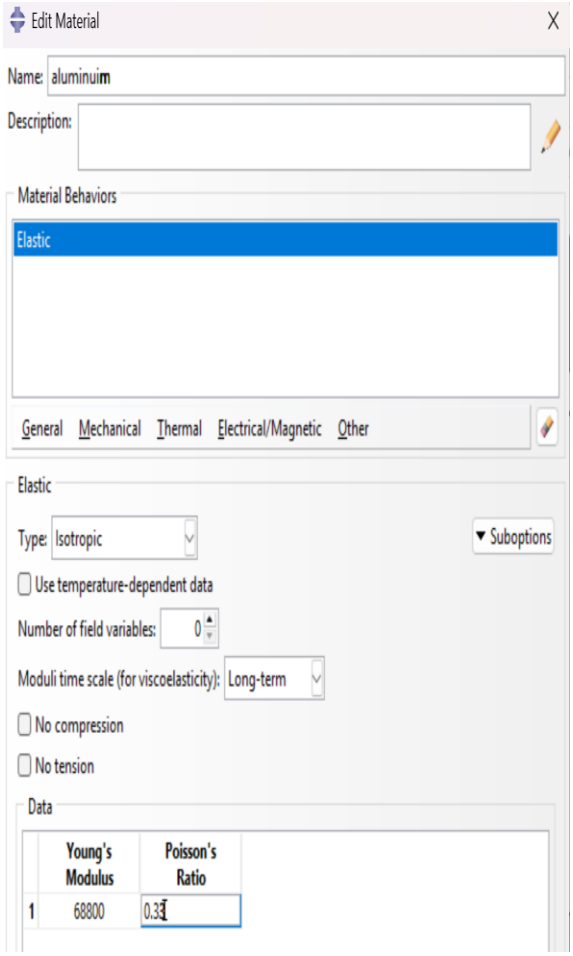


Figure 4.17 Définition les propriétés du matériau

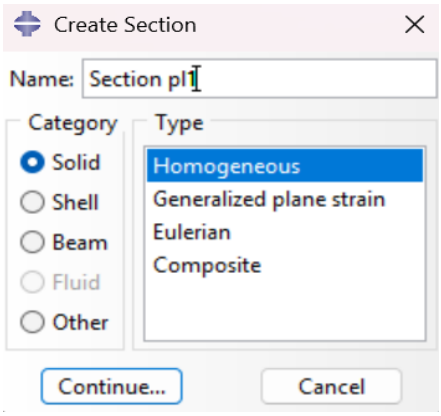


Figure 4.18 Définition la section de la plaque

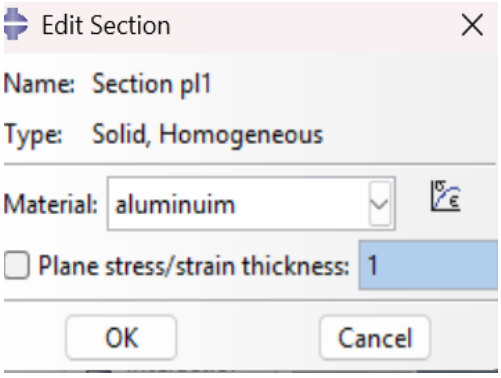


Figure 4.19 Sélection de la section

Affectation de la section à la structure Pour affecter la section Section_plaque à la structure, double-cliquer sur (Section Assignements) dans la liste des attributs de la pièce qui apparaît. Dans le (Viewport), on sélectionne la pièce entière. ABAQUS/CAE mets la structure en surbrillance (**Figure 4.21**), on cliqué sur Done. Dans la boite de dialogue (Edit Section Assignement) on accepte la sélection par défaut de la section (Section_plaque) puis on cliquer OK . ABAQUS/CAE affecte la section à plaque et colore la structure entière en turquoise (**Figure 4.20**). On Clique sur (Done).

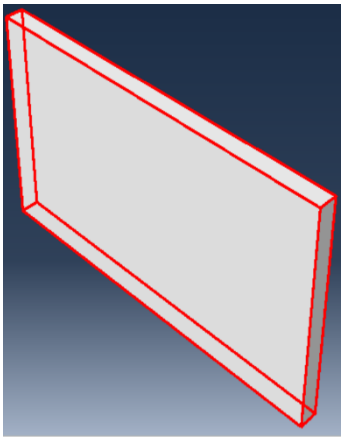


Figure 4.20

Sélection la piece entiére

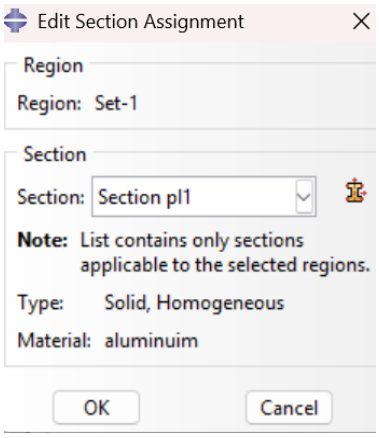


Figure 4.21

Choix de section

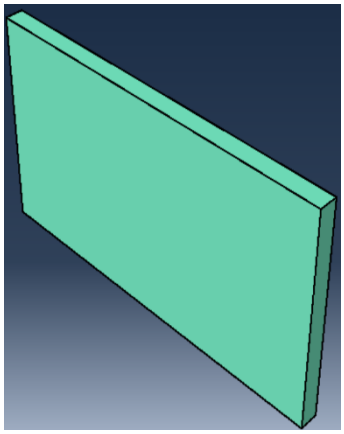


Figure 4.22

Affectation la section

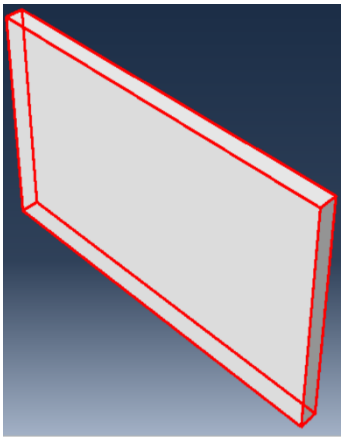


Figure 4.23

Sélection la piece entiére

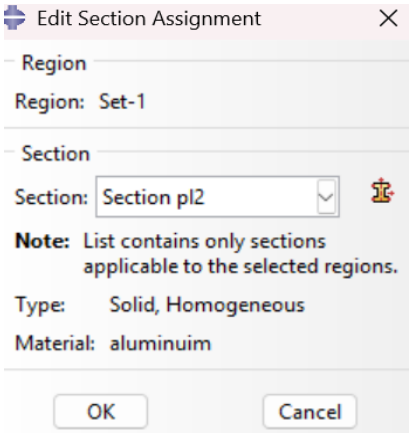


Figure 4.24

Choix de section

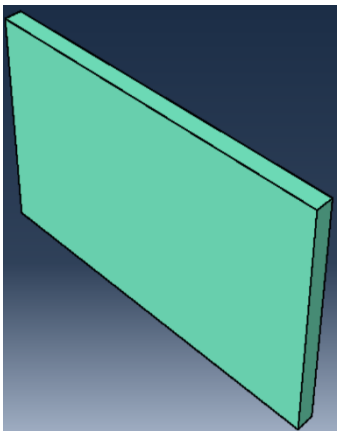


Figure 4.25

Affectation la section

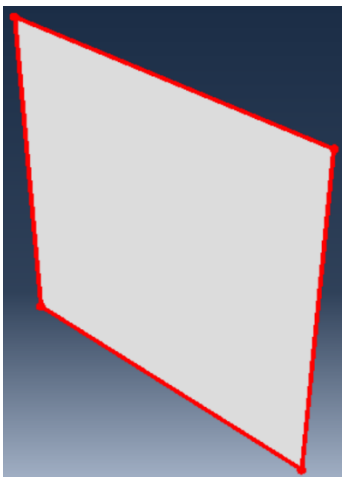


Figure 4.23

Sélection la piece entiére

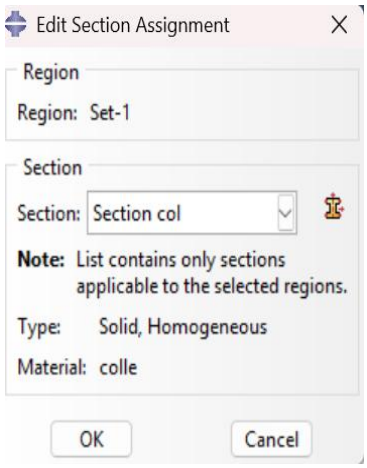


Figure 4.24

Choix de section

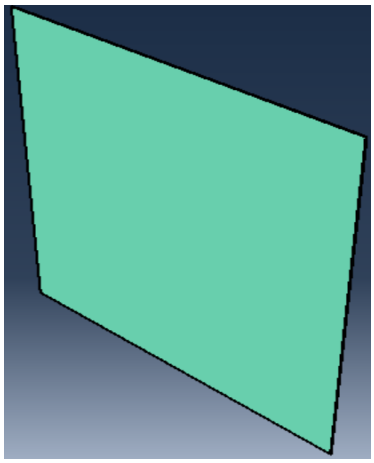


Figure 4.25

Affectation la section

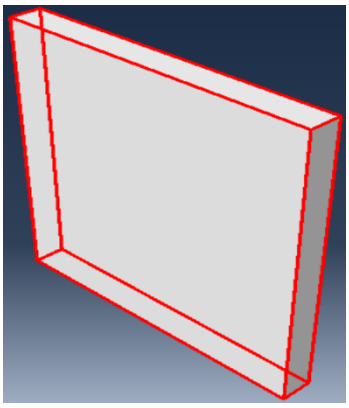


Figure 4.26

Sélection la piece entiére

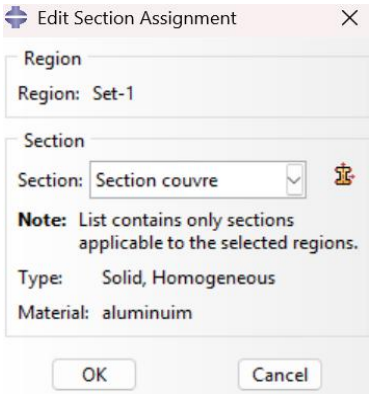


Figure 4.27

Choix de section

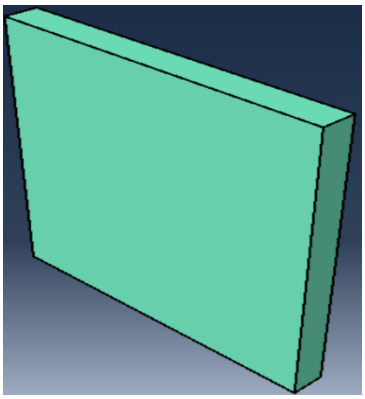


Figure 4.28

Affectation la section

2.3. Module ASSEMBLY :

Ce module, permet de créer une instance à partir des entités déjà définies dans le module Part. Ces instances seront celles qu'on manipulera par la suite dans le modèle. Dans le cas général, à partir de l'icône en haut à gauche, on crée une instance en sélectionnant tous les éléments créés dans Part. On peut aussi dans certains cas faire subir des mouvements d'ensemble à ces instances pour les repositionner dans l'espace. Le module ASSEMBLY permet d'assembler les différentes pièces

créées dans un projet. Cette étape est nécessaire même si le projet n'est composé que d'une seule pièce.

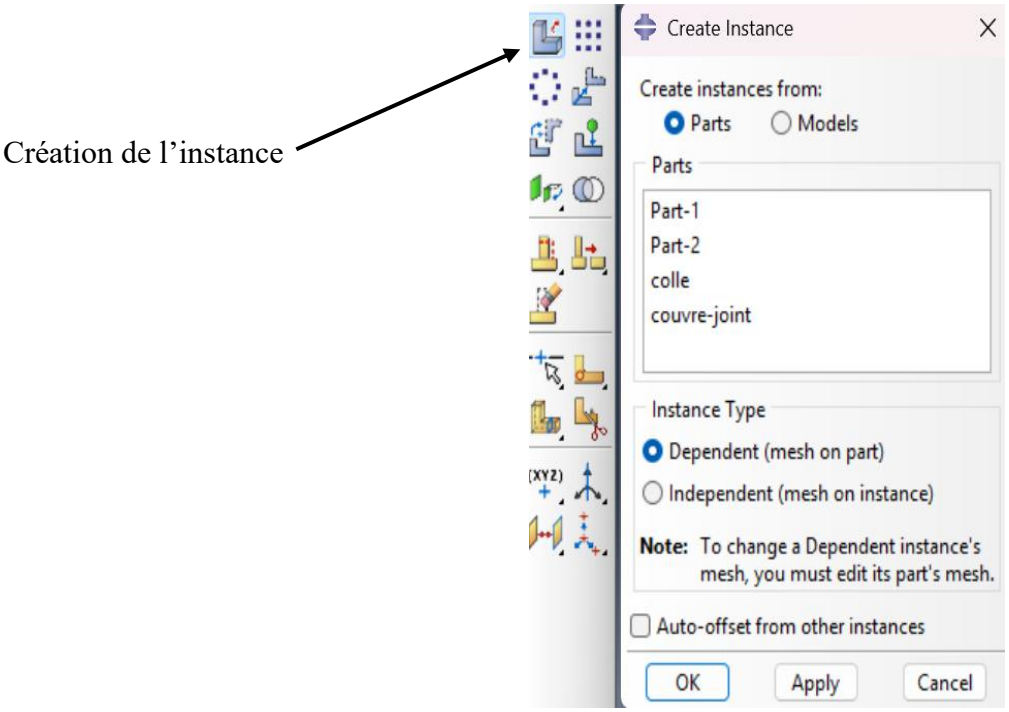


Figure 4.29 Module ASSEMBLY

Pour réaliser l'assemblage dans le module Assembly, on clique sur Instances puis sur Create Instance, et l'on sélectionne toutes les pièces constituant le modèle : les deux plaques, la couche de colle ainsi que le couvre-joint (**Figure 4.29)**. Après validation, les différentes instances sont positionnées dans l'espace de travail. Les deux plaques principales sont ensuite assemblées côte à côte de manière adjacente, de sorte que leurs extrémités soient en contact au niveau de la zone de jonction. La couche de colle est ensuite placée au-dessus de cette zone de contact afin de recouvrir la ligne de jonction entre les deux plaques. Enfin, le couvre-joint est positionné au-dessus de la couche adhésive pour assurer le renforcement mécanique de l'assemblage collé (**Figure 4.30)**.

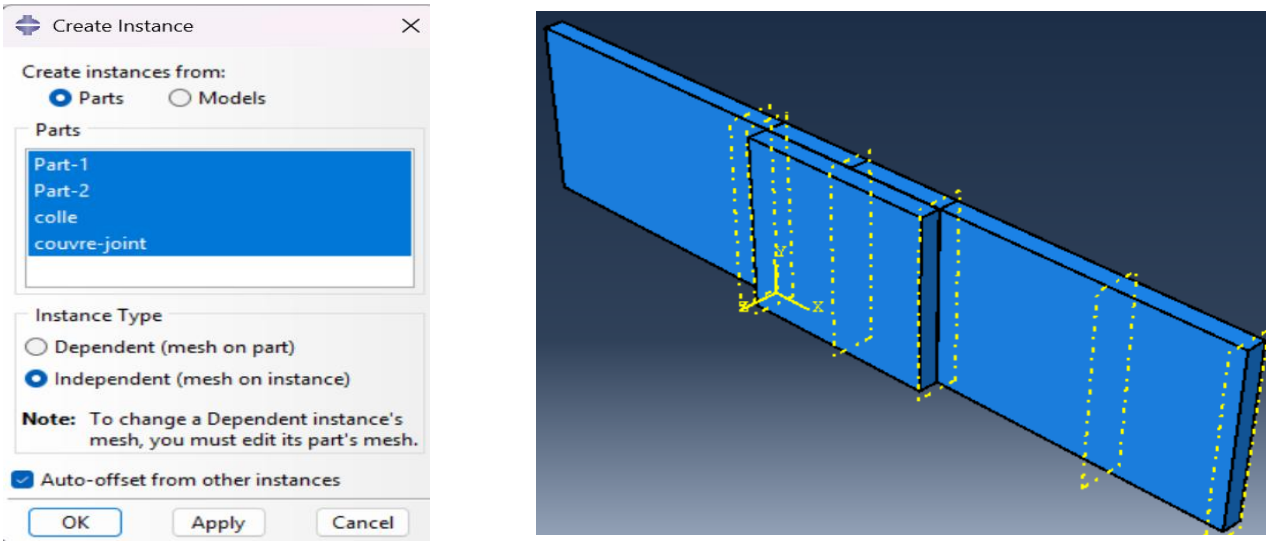


Figure 4.30 Créer une instance

2.4. Module STEP :

Le module STEP permet d'effectuer les étapes de calcul. Selon le cas une analyse peut comporter un ou plusieurs Steps. On choisir le mode Static, General comme par exemple dans le cas d'une analyse statique. Ou bien Dynamic explicit Dans notre cas, nous étudions le comportement d'une plaque soumise à des forces appliquées sur sa surface latérale. Nous avons donc choisi une analyse statique, car le chargement est constant dans le temps.

Création d'un step pour notre pièce : configuration du pas d'analyse. Dans ce cas, nous nous intéressons à la réponse statique de cette plaque soumise à une pression uniforme de 30 MPa appliquée sur sa surface latérale. Comme il s'agit d'un chargement unique, un seul pas d'analyse est suffisant pour la simulation. L'analyse se compose de deux étapes au total :

- Un premier pas (généré automatiquement par ABAQUS/CAE), dans lequel on applique les conditions aux limites en déplacements (encastrement).

- Un second pas d'analyse, on applique une pression de 30 Mpa sur la face latérale.

- Création du pas d'analyse On crée un pas d'analyse statique qui suit le pas initial de l'analyse. Double cliquer sur Steps pour créer un pas. ABAQUS/CAE passe au module Step et la boîte de dialogue Create Step apparaît (**Figure 4.31**) Une liste de toutes les procédures générales et un nom du pas Step-1 est fourni par défaut On Sélectionne Static General, comme Procedure type On

Clique sur Continue La boîte de dialogue Edit Step apparaît avec les paramètres par défaut pour un pas d'analyse Static General L'onglet Basic est sélectionné par défaut.

- On Accepte les valeurs par défaut fournies pour le pas, On Clique sur OK pour créer le pas et pour quitter la boîte de dialogue Edit Step.

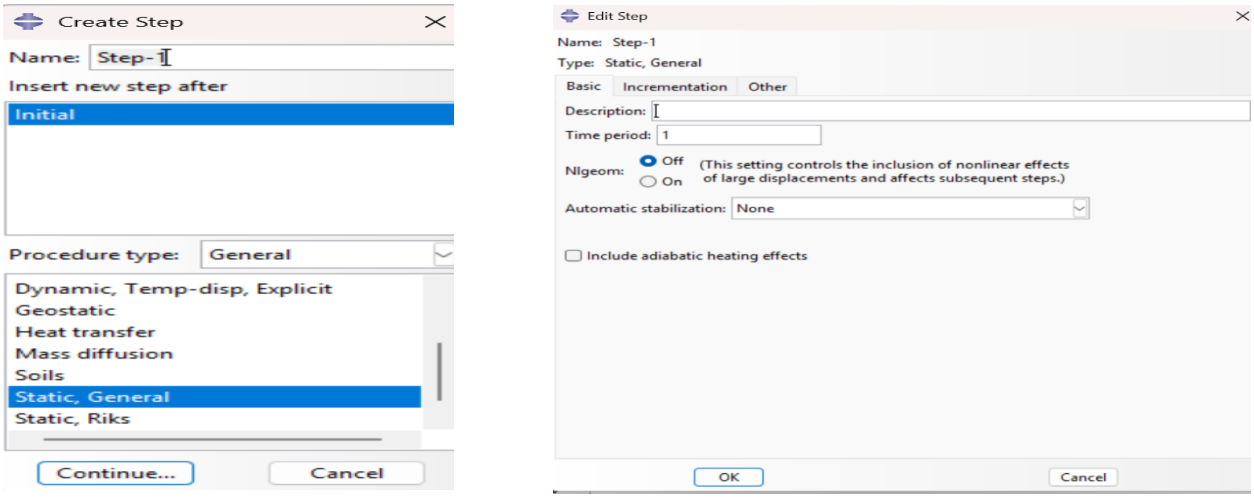


Figure 4.31 Création de step

2.5. Module Interaction :

Ce module permet de définir facilement toutes les interactions entre les différentes parties du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Son utilisation est surtout nécessaire lorsqu'il y a plusieurs pièces en contact entre elles. Il sert aussi à préciser les efforts appliqués sur la pièce ou le système étudié, comme les forces ou les pressions. De plus, il permet de définir l'ensemble des chargements ainsi que les conditions aux limites. Il faut savoir que ces chargements et conditions aux limites dépendent des étapes d'analyse (Steps). Par exemple, une force appliquée dans le step 1 peut ne plus être active dans le step 2.

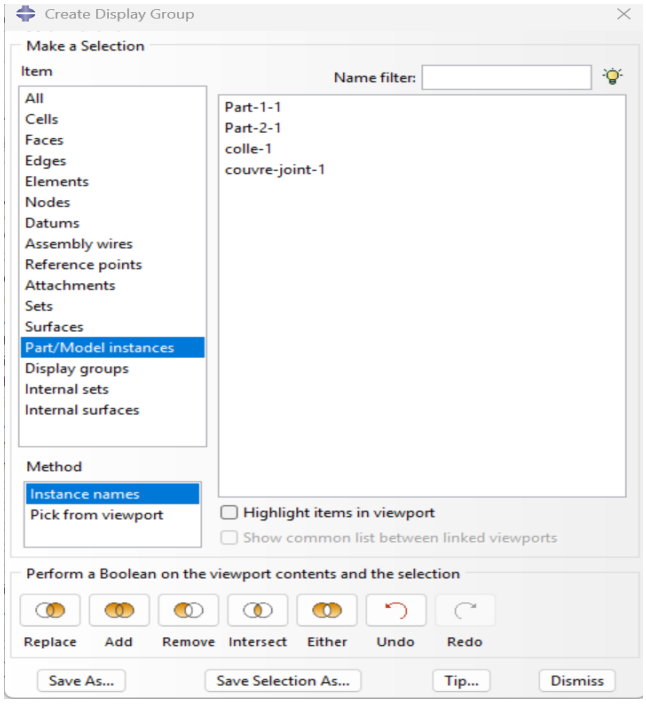


Figure 4.32 crétaion display groupe

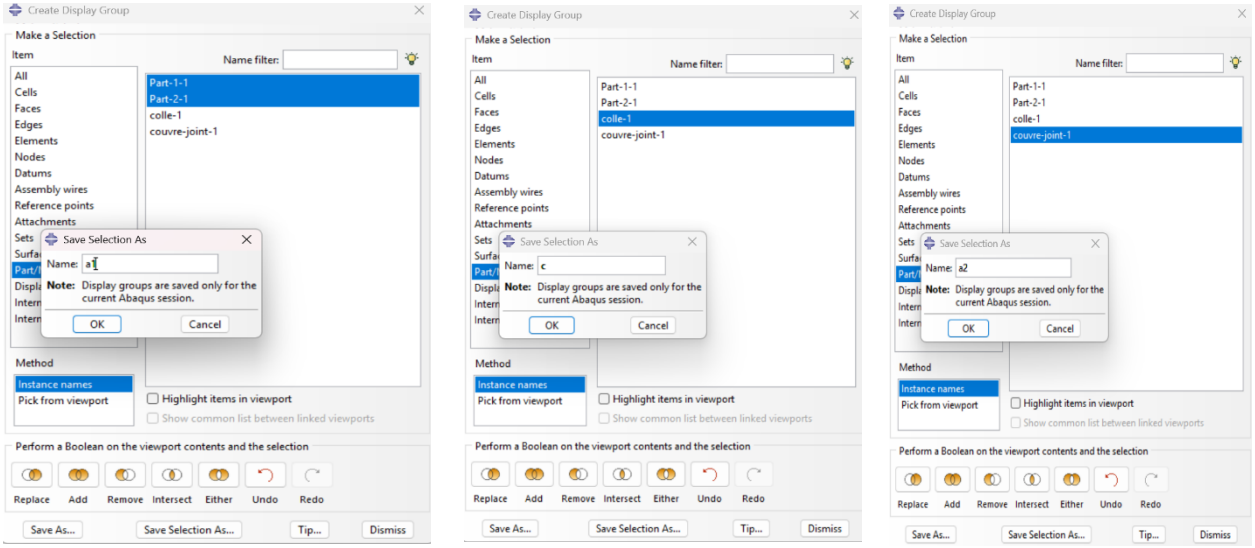


Figure 4.33 création display groupe (éléments)

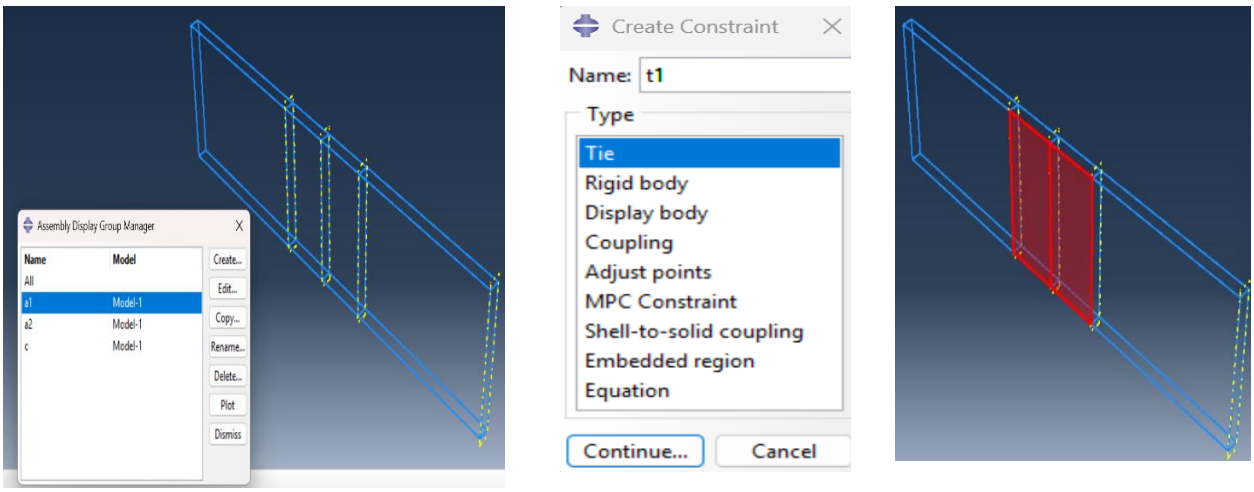


Figure 4.34 création contraint t1 et choisir les maitres surfaces (plaque 1 et 2) de la plaque

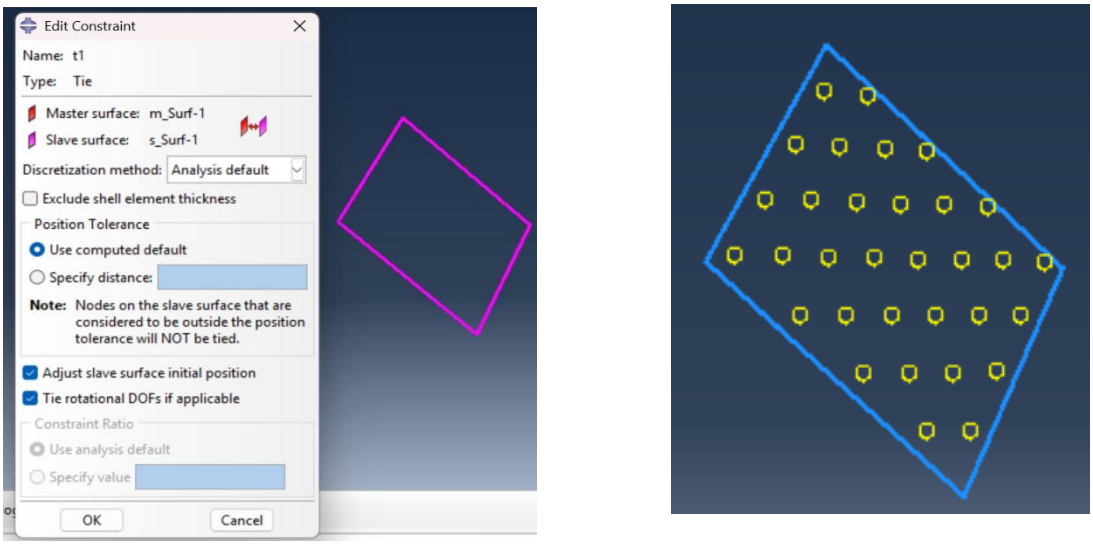


Figure 4.35 La modification de contrainte(t1) et choisir le maitre surface (la colle)

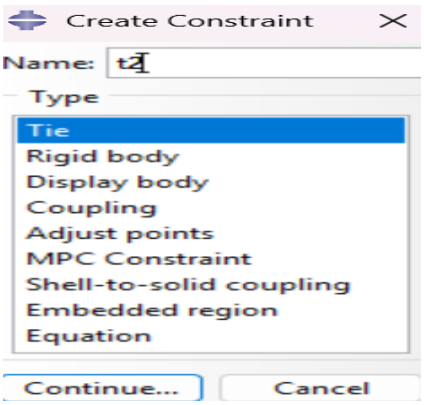


Figure 4.36 création contrainte t2

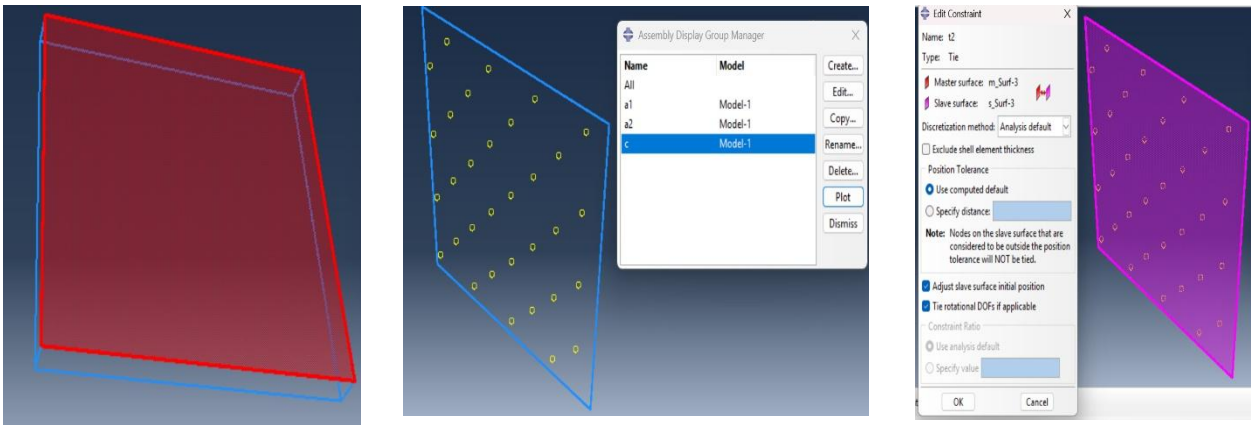


Figure 4.37 Choisir l'esclave surface (couvre-joint) puis la modification de contrainte (t2)

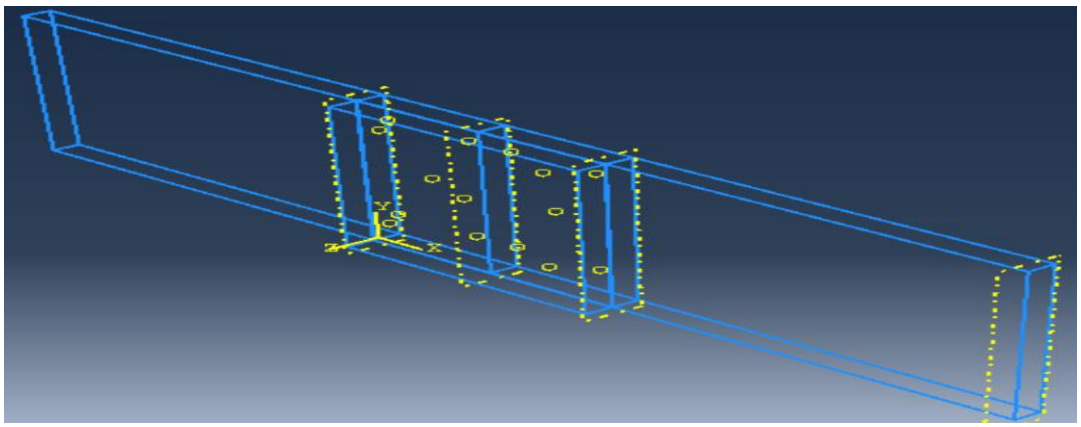


Figure 4.38 Résultat d'interaction

2.6. Module LOAD :

Pour appliquer les conditions aux limites à la plaque, on commence par aller dans l'arbre du modèle et double-cliquer sur (BCs). Le logiciel ABAQUS/CAE bascule alors vers le module LOAD, et une fenêtre appelée Create (Boundary Condition) apparaît. Ensuite, on choisit l'étape (Initial) dans la liste des Steps. Dans la catégorie (Category), on garde (Mechanical) par défaut. Puis, dans (Types for Selected Step), on sélectionne (Displacement/Rotation) et on clique sur Continue (**Figure 4.39**). Dans la zone de travail (Viewport), on sélectionne la face que l'on souhaite encastrer, puis on clique sur Done (**Figure 4.40**). Une nouvelle fenêtre (Edit Boundary

Condition) s'affiche : il suffit de cocher l'option Encastre, puis de valider en cliquant sur OK (a)et(b) (**Figure 4.41**).

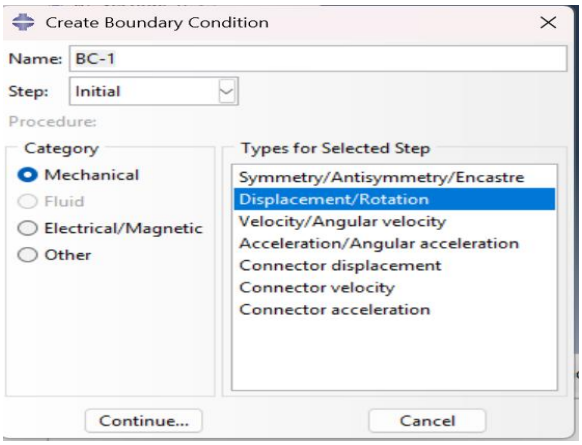


Figure 4.39 création de l'encastrement

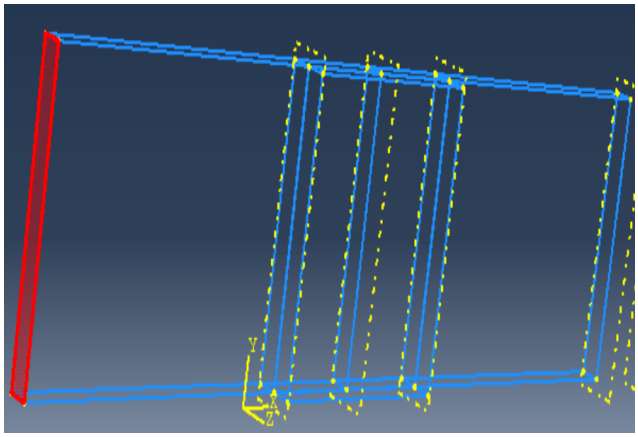
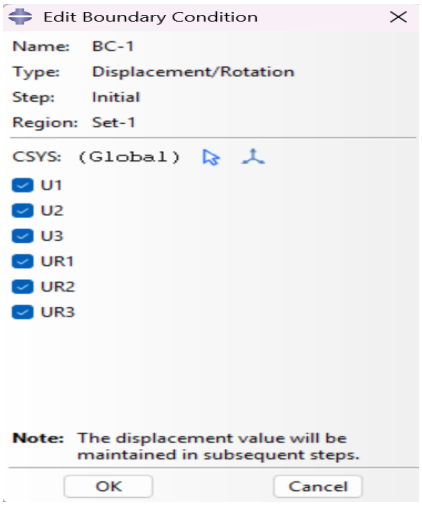
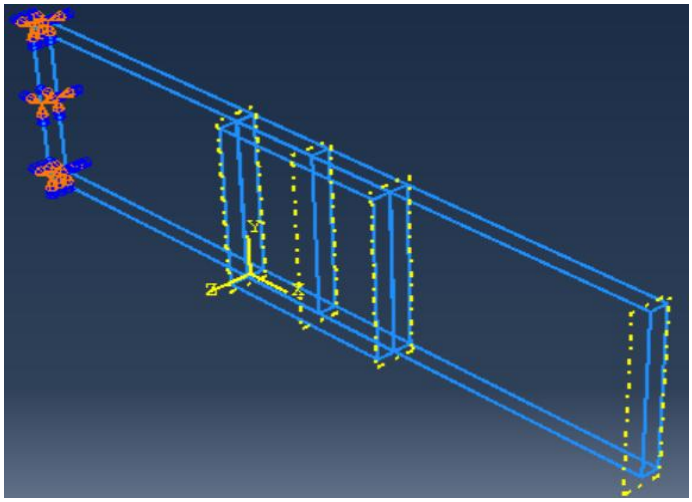


Figure 4.40 sélection la face a encastrée





(a) **(b)**

Figure 4.41 affectation de l'encastrement

Pour appliquer le chargement, on clique sur (Create Load). Une fenêtre s'affiche. Dans la liste (Category), on garde (Mechanical) comme choix par défaut. Ensuite, dans (Types for Selected Step), on sélectionne (Pressure)(**Figure 4.42**), puis on clique sur Continue. Dans la zone de travail (Viewport), on choisit la surface latérale (**Figure 4.43**) de la plaque, puis on clique sur (Done).

Une nouvelle fenêtre (Edit Load) apparaît : on saisit la valeur de la pression dans le champ Magnitude, soit (-30), puis on valide en cliquant sur OK (a) et (b) (**Figure 4.44**).

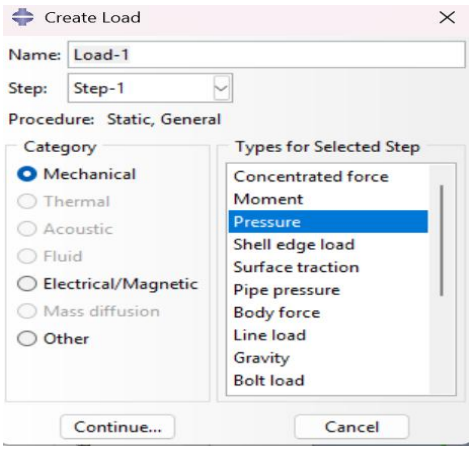


Figure 4.42 création de la force

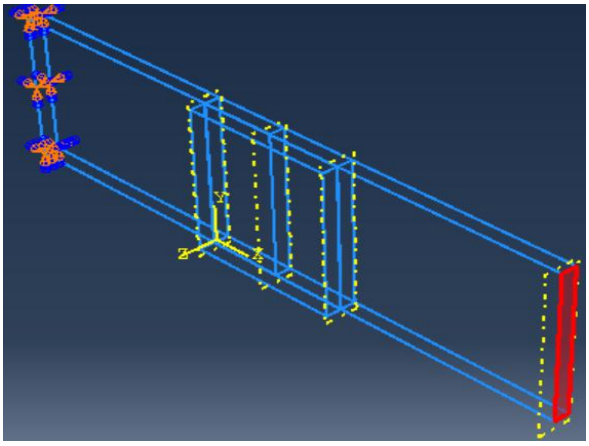
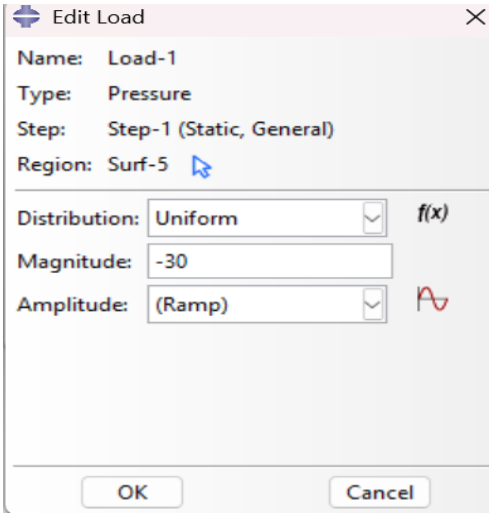
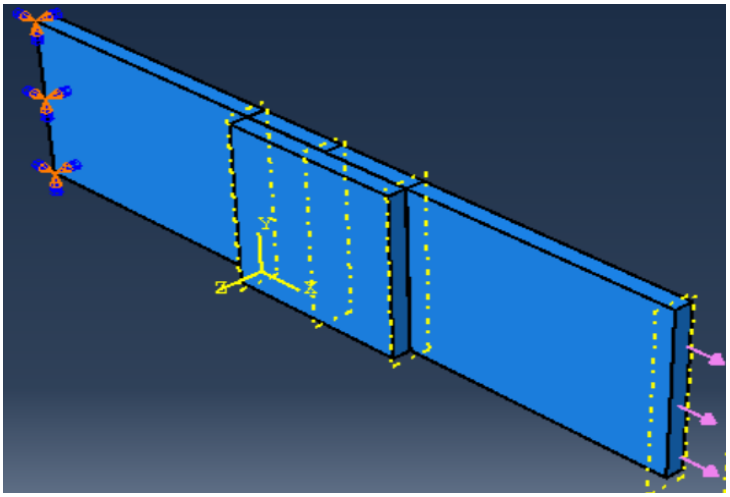


Figure 4.43 sélecetion la face de traction





(a) **(b)**

Figure 4.44 affectation de champ Magnitude

2.7. Module MESH :

Le module MESH dans ABAQUS/CAE permet de créer le maillage de la pièce. Il contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage en éléments finis sur le modèle. Le maillage n'a pas besoin d'être uniforme partout. On peut le rendre plus fin dans les zones importantes, par

exemple là où les résultats peuvent changer rapidement. Cependant, il faut faire attention à ce que les éléments restent de bonne qualité, c'est-à-dire avec une forme proche d'une géométrie régulière. Plus le maillage est fin, plus les résultats obtenus seront précis. Il existe plusieurs types d'éléments pour réaliser le maillage, comme les éléments (hexaédre ou tétraédre…).

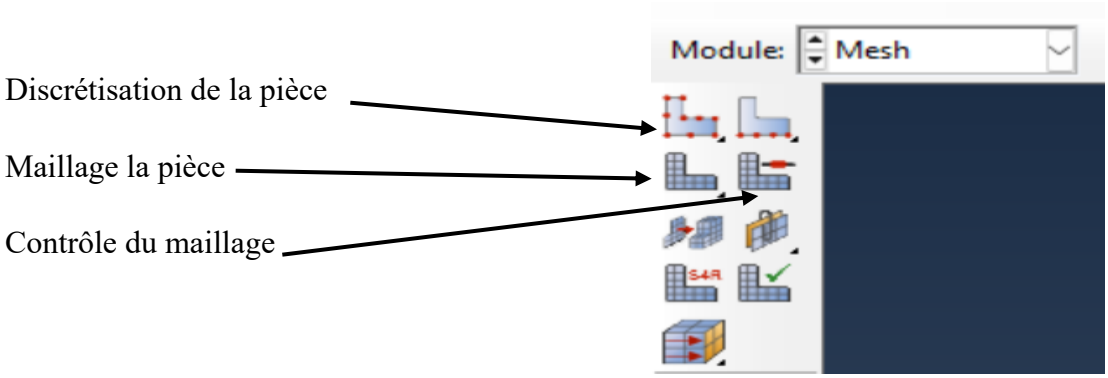


Figure 4.45 Module MESH

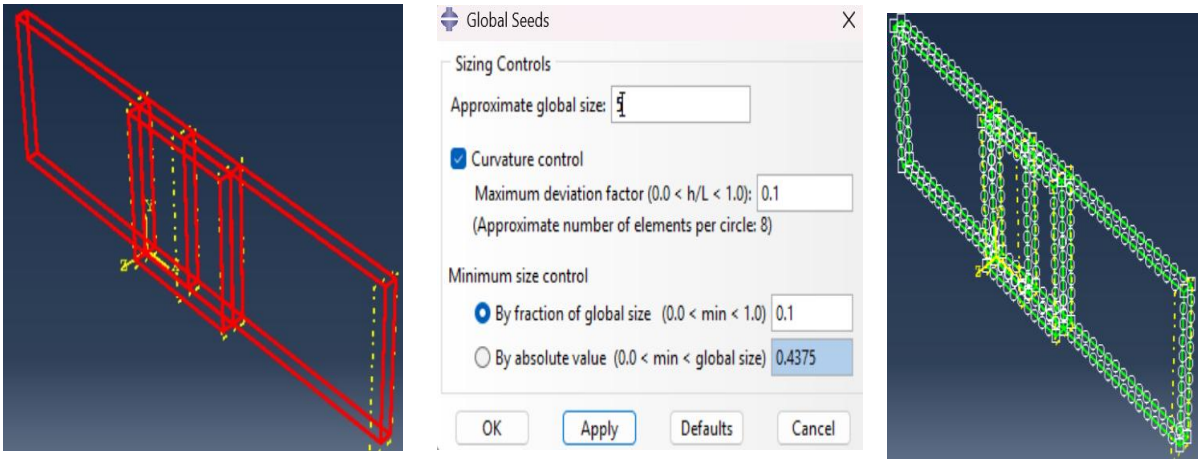


Figure 4.46 Affectation la taille des éléments

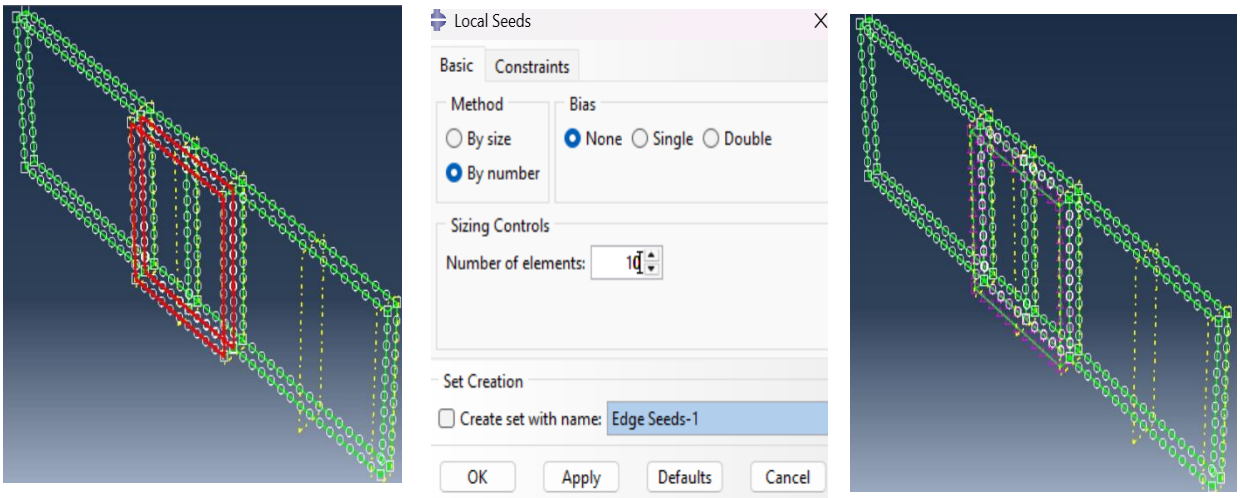


Figure 4.47 Affectation le nombre des éléments

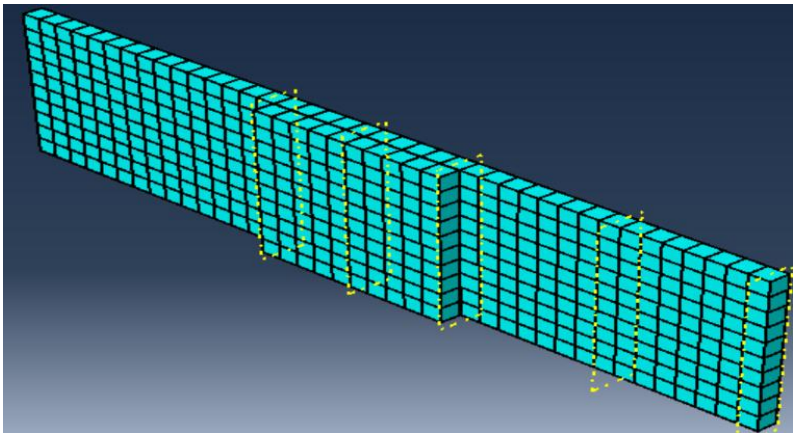
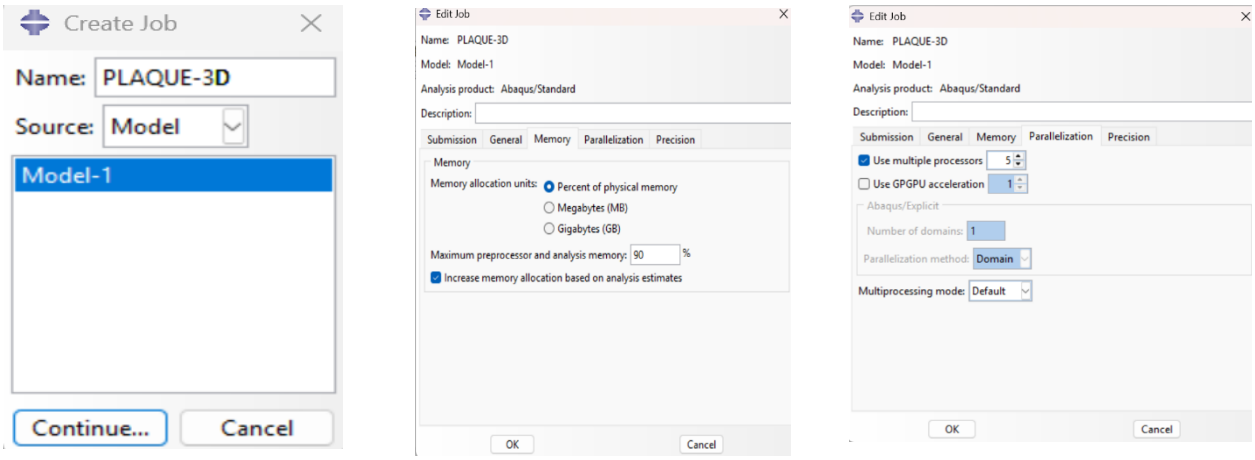


Figure 4.48 Confirmation de maillage

2.8. Module JOB :

Le module JOB dans ABAQUS/CAE permet de lancer le calcul. C'est à cette étape que le logiciel calcule les contraintes, les déformations et les déplacements de la pièce ou du système étudié. Pour créer un job, on double-clique sur Jobs afin d'ouvrir la fenêtre (Create Job). Ensuite, on crée un nouveau travail, on lui donne un nom, par exemple plaque_3D, puis on clique sur OK(**Figure 4.49)**. Pour démarrer le calcul, il suffit de cliquer sur (Submit) (**Figure 4.50**). Une fois l'analyse

terminée, un message (Completed Successfully) apparaît en bas de l'écran (Viewport), ce qui signifie que le calcul s'est bien déroulé. (**Figure 4.51**)



(m) **(n)** **(o)**

Figure 4.49 la premiére creation de job

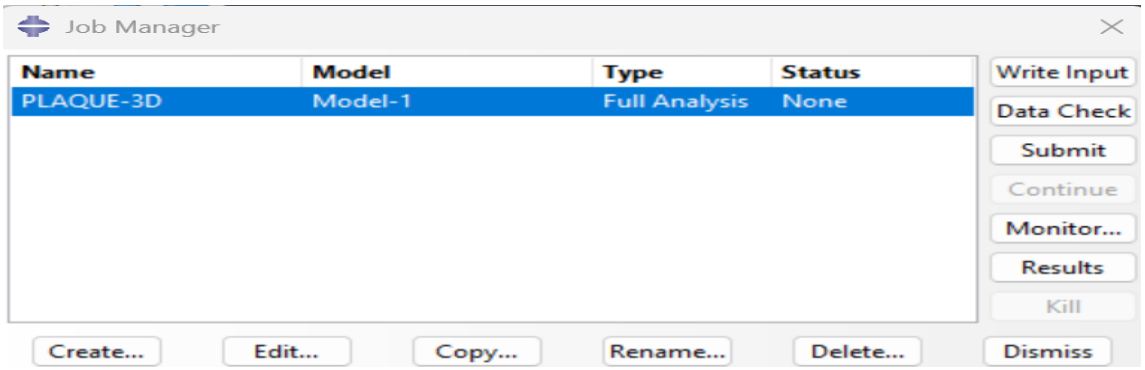


Figure 4.50 la deuxiéme creation de job

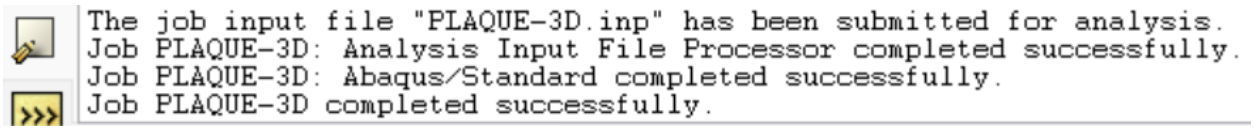


Figure 4.51 Affichage le message de réussite

2.9. Module VISUALIZAION :

Le module VIZUALISATION permet de visualiser les résultats des calculs lancés précédemment (**Figure 4.52**).

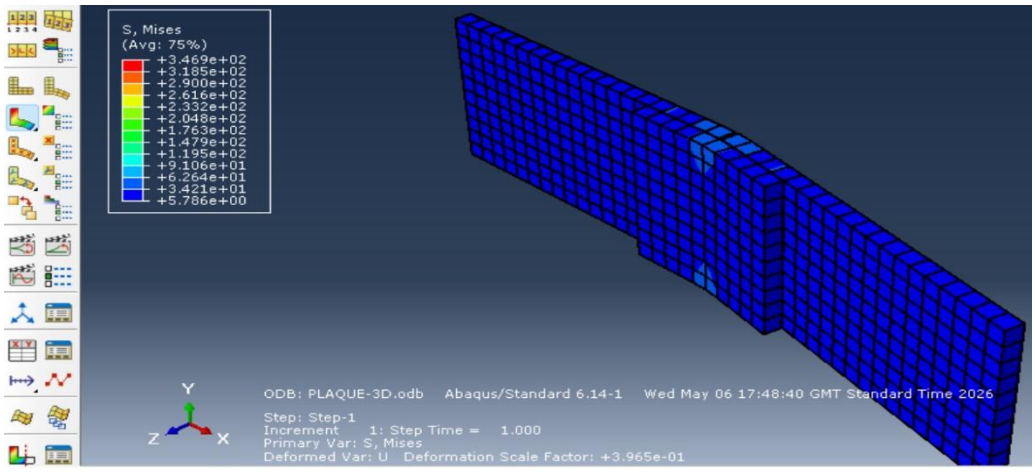


Figure 4.52 visualisation les résultats

IV.3. Résultats et discussion :

La Figure 4.53 met en évidence l'influence de la position du raidisseur (d'une épaisseur de 5 mm, positionné parallèlement à la direction du chargement) sur l'évolution des contraintes maximales de pelage (Max Peeling Stress) au sein d'un assemblage collé avec couvre-joint, en fonction de la charge appliquée (Load).

L'analyse montre que la réduction du pelage dépend fortement de l'emplacement du raidisseur dans la zone de recouvrement (overlap zone) :

Position en rive (Edge of the overlap zone - Courbe rouge) : C'est la configuration de renfort la moins performante parmi les trois testées. À une charge maximale de 70 MPa, la contrainte de pelage grimpe jusqu'à environ 32 MPa. Bien que cela reste nettement inférieur au cas sans renfort, l'effet de bordure limite l'optimisation.

Position décalée de 10 mm (10mm from the end - Courbe verte) : En rapprochant le raidisseur vers l'intérieur (à 10 mm de l'extrémité), l'atténuation du pelage s'améliore, stabilisant la contrainte maximale autour de 20 MPa à 70 MPa de charge.

Position au centre (Middle of the overlap zone - Courbe bleue) : C'est la configuration la plus efficace. Lorsque le raidisseur est placé en plein milieu de la zone de recouvrement, les contraintes de pelage sont minimales et ne dépassent pas environ 15 MPa sous une charge de 70 MPa.

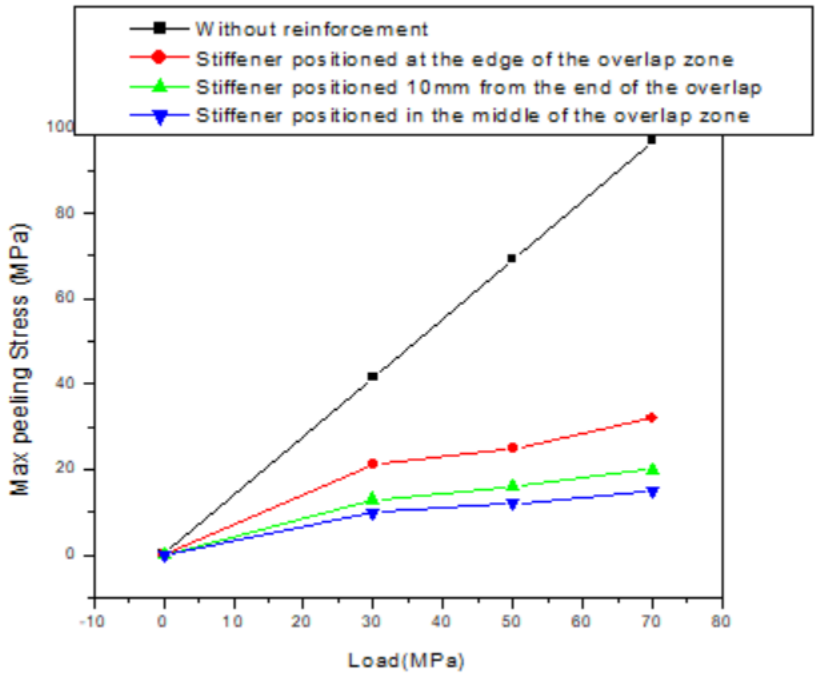


Figure 4.53 influence de la position du raidisseur sur les contraintes de pelage pour une épaisseur de5mm, positionné parallèlement à la direction du chargement

La Figure 4.54 met en évidence l'influence de la position du raidisseur (d'une épaisseur de 5 mm, positionné parallèlement à la direction du chargement) sur l'évolution des contraintes maximales de cisaillement (max shear stress) au sein de l'assemblage collé avec couvre-joint, en fonction de la charge appliquée (Load).

Configuration sans renfort (Without reinforcement - Courbe noire) :

Entre une charge de 0 et 50 MPa, les contraintes de cisaillement augmentent de manière quasi linéaire pour atteindre environ 65 MPa. Au-delà de 50 MPa, la courbe s'accélère fortement pour atteindre un pic proche de 90 MPa à la charge maximale (70 MPa).

Raidisseur en rive (Edge of the overlap zone - Courbe rouge) :

Cette configuration présente un comportement singulier : les contraintes de cisaillement y sont plus élevées que dans le cas sans renfort sur la majeure partie de la plage de chargement (entre 30

et 50 MPa), atteignant près de 82 MPa à pleine charge. Cela s'explique par l'effet de bord (edge effect) induit par le raidisseur placé en rive, qui engendre une forte concentration locale des contraintes de cisaillement.

Raidisseur décalé de 10 mm (10mm from the end - Courbe verte) :

Le fait de déplacer le raidisseur à 10 mm de l'extrémité permet de soulager le joint. Les contraintes maximales de cisaillement restent bien contrôlées et se stabilisent autour de 60 MPa sous une charge de 70 MPa, offrant un meilleur compromis que la configuration en rive.

Raidisseur au centre (Middle of the overlap zone - Courbe bleue) :

Tout comme pour le pelage, la position centrale s'avère être la plus performante. Elle permet de maintenir les contraintes de cisaillement au niveau le plus bas sur l'ensemble du graphique, ne dépassant pas environ 50 MPa à une charge de 70 MPa.

L'analyse de la Figure 4.54 démontre que le positionnement du raidisseur est capital pour la tenue au cisaillement du couvre-joint. Placer le raidisseur en rive (courbe rouge) est contre-productif car cela accentue les pointes de cisaillement. En revanche, le positionnement au centre de la zone de recouvrement (courbe bleue) garantit une répartition optimale des efforts, réduisant la contrainte maximale de cisaillement de près de 45 % par rapport au cas non renforcé.

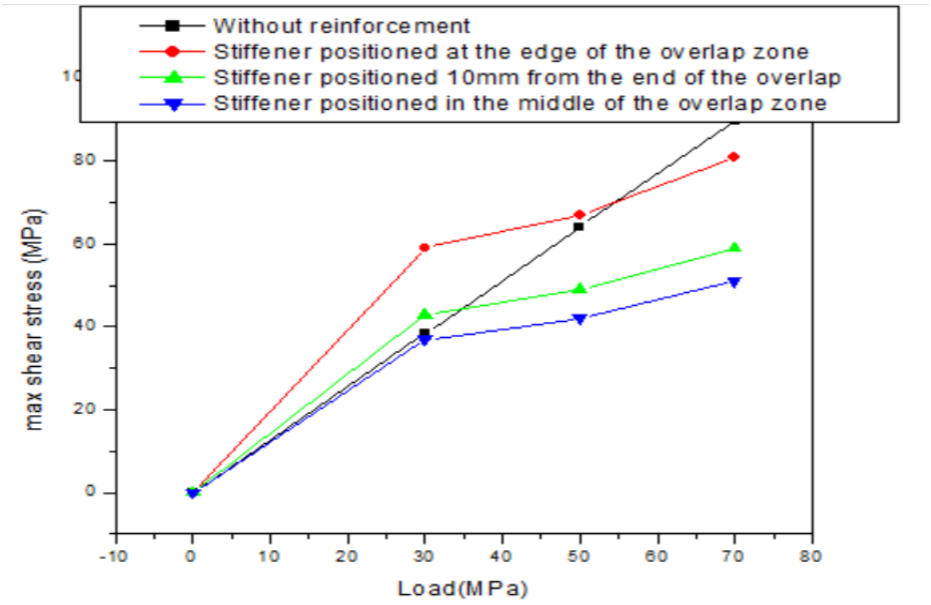


Figure 4.54 influence de la position du raidisseur sur les contraintes de cisaillement pour une épaisseur de5mm, positionné parallèlement à la direction du chargement

La Figure 4.55 évalue l'influence de la position d'un raidisseur de 5 mm d'épaisseur orienté perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes maximales de pelage au sein de l'assemblage collé. Cette configuration est opposée à celle étudiée précédemment avec un raidisseur parallèle au chargement. L'orientation perpendiculaire modifie la répartition de la rigidité dans l'assemblage et influence directement le comportement du joint adhésif sous l'effet de la traction.

En l'absence de raidisseur (Without reinforcement), la contrainte maximale de pelage augmente progressivement jusqu'à une charge de 30 MPa, où elle atteint environ 18 MPa, puis croît plus rapidement pour atteindre près de 98 MPa sous une charge de 70 MPa. Cette courbe de référence traduit la flexion naturelle des substrats et l'ouverture progressive des extrémités du joint lorsque aucun élément de renforcement n'est présent.

Lorsque le raidisseur perpendiculaire est placé en rive, c'est-à-dire au bord de la zone de recouvrement, une augmentation très importante des contraintes de pelage est observée dès les faibles niveaux de chargement. Pour une charge de 30 MPa, la contrainte dépasse 100 MPa, alors qu'elle atteint environ 130 MPa sous une charge de 70 MPa. Cette augmentation est liée à la forte discontinuité de rigidité créée au niveau du bord du joint. Dans cette configuration, le raidisseur favorise l'apparition d'effets de flexion locale qui accentuent l'ouverture de l'adhésif au lieu de la limiter.

Lorsque le raidisseur est déplacé de 10 mm vers l'intérieur de la zone de recouvrement, la contrainte de pelage est ramenée à environ 63 MPa pour une charge de 30 MPa et atteint environ 82 MPa sous une charge de 70 MPa. L'éloignement du raidisseur par rapport au bord réduit ainsi l'effet de concentration des contraintes observé précédemment. À forte charge, cette configuration permet même de maintenir le niveau de pelage en dessous de celui obtenu sans renfort (82 MPa contre 98 MPa), bien que les contraintes restent relativement élevées aux faibles charges. Lorsque le raidisseur perpendiculaire est positionné au centre de la zone de recouvrement, la contrainte de pelage atteint environ 50 MPa à une charge de 30 MPa puis se stabilise autour de 67 MPa pour une charge de 70 MPa. Cette disposition constitue la configuration la plus favorable parmi les trois positions étudiées, car elle réduit la flexion globale des substrats tout en limitant les concentrations de contraintes aux extrémités du joint adhésif.

La Figure 4.55 montre également que l'orientation perpendiculaire du raidisseur demeure globalement moins efficace que l'orientation parallèle présentée à la Figure 4.53.

En position centrale, le raidisseur parallèle limite la contrainte de pelage à environ 15 MPa, alors que le raidisseur perpendiculaire conduit à une valeur d'environ 67 MPa. De même, en position de rive, le raidisseur parallèle permettait de réduire le pelage à 33 MPa, tandis que le raidisseur perpendiculaire entraîne une augmentation importante de la contrainte jusqu'à environ 130 MPa. Ces résultats montrent que la position du raidisseur joue un rôle essentiel dans la maîtrise des contraintes de pelage et que, pour une épaisseur de 5 mm, l'orientation parallèle à la direction du chargement reste la solution la plus performante pour améliorer le comportement mécanique de l'assemblage collé.

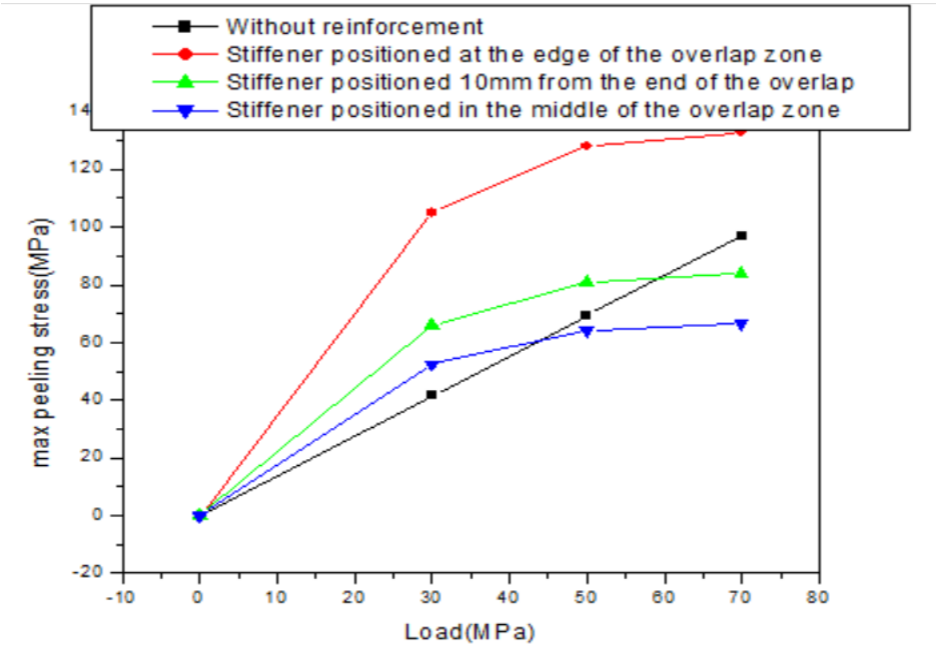


Figure 4.55 influence de la position du raidisseur sur les contraintes de pelage pour une épaisseur de5mm, positionné perpendiculairement à la direction du chargement

La Figure 4.56 évalue l'influence de la position d'un raidisseur de 5 mm d'épaisseur, orienté perpendiculairement à la direction du chargement, sur les contraintes maximales de cisaillement dans le joint adhésif. Cette configuration complète l'analyse présentée à la Figure 4.55 consacrée aux contraintes de pelage. Elle permet d'étudier l'effet d'un renfort orthogonal sur la répartition des contraintes de cisaillement générées dans le plan de collage sous l'action de la charge de traction appliquée aux substrats.

En l'absence de raidisseur (Without reinforcement), la contrainte maximale de cisaillement augmente de manière presque linéaire avec la charge appliquée. Elle passe d'environ 40 MPa pour une charge de 30 MPa à près de 90 MPa lorsque la charge atteint 70 MPa. Cette évolution met en évidence l'importante concentration des efforts de glissement aux extrémités d'un assemblage à recouvrement avec couvre-joint non renforcé, où les effets de bord et les différences de déformation entre les éléments favorisent l'apparition de fortes contraintes dans l'adhésif.

Lorsque le raidisseur perpendiculaire est placé en rive, au bord de la zone de recouvrement, une augmentation marquée des contraintes de cisaillement est observée dès les faibles niveaux de chargement. À une charge de 30 MPa, la contrainte atteint environ 86 MPa, soit une augmentation d'environ 115 % par rapport à la configuration sans raidisseur. Sous une charge de 70 MPa, elle atteint près de 130 MPa, dépassant ainsi la valeur enregistrée pour le cas non renforcé. À l'image du comportement observé pour les contraintes de pelage (Figure 4.55), le positionnement du raidisseur perpendiculairement au bord du recouvrement se révèle particulièrement défavorable. La forte discontinuité de rigidité créée à l'entrée de la zone collée engendre une concentration importante des contraintes, ce qui augmente localement les efforts de cisaillement supportés par l'adhésif.

Lorsque le raidisseur est déplacé de 10 mm vers l'intérieur de la zone de recouvrement, la contrainte maximale de cisaillement est réduite à environ 56 MPa pour une charge de 30 MPa et atteint environ 86 MPa sous une charge de 70 MPa. L'éloignement du raidisseur du bord permet ainsi de limiter l'intensité des concentrations de contraintes observées précédemment. À forte charge, cette configuration procure une amélioration notable du comportement mécanique en réduisant le cisaillement d'environ 4.5 % par rapport au cas sans renfort.

Lorsque le raidisseur perpendiculaire est positionné au centre de la zone de recouvrement, la contrainte de cisaillement atteint environ 48 MPa sous une charge de 30 MPa et se stabilise autour

de 64 MPa lorsque la charge atteint 70 MPa. Cette configuration constitue la solution la plus favorable parmi les trois positions étudiées. Le raidisseur contribue alors à limiter le glissement global dans la zone de recouvrement tout en réduisant les concentrations de contraintes aux extrémités du joint. La comparaison avec les résultats obtenus pour l'orientation parallèle confirme la supériorité de cette dernière.

En position centrale, le raidisseur parallèle (Figure 4.54) permet de réduire la contrainte maximale de cisaillement à 50 MPa sous une charge de 70 MPa, alors que le raidisseur perpendiculaire (Figure 4.55) la maintient à environ 64 MPa. De même, en position de rive, le raidisseur parallèle limitait le cisaillement à 80 MPa à forte charge, tandis que le raidisseur perpendiculaire conduit à une augmentation des contraintes sur l'ensemble de la plage de chargement, avec une valeur maximale d'environ 130 MPa. Ces résultats montrent que, pour un raidisseur de 5 mm d'épaisseur, l'orientation perpendiculaire reste moins performante que l'orientation parallèle pour réduire les contraintes de cisaillement dans un assemblage à recouvrement avec couvre-joint.

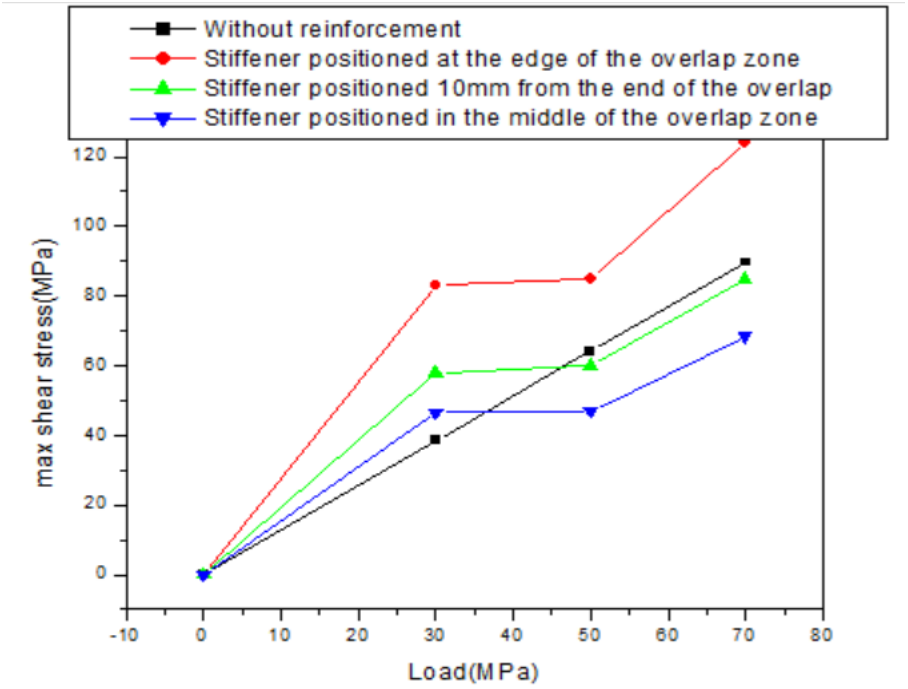


Figure 4.56 influence de la position du raidisseur sur les contraintes de cisaillement pour une épaisseur de5mm, positionné perpendiculairement à la direction du chargement

La Figure 4.57 démontre que pour un raidisseur parallèle positionné en rive, l'efficacité du renfort est directement liée à son épaisseur. Plus le raidisseur est épais, plus il s'oppose à la déflexion hors-plan du joint, ce qui réduit drastiquement les contraintes de pelage. L'optimum absolu est atteint avec le Full overlap stiffener, qui supprime l'effet de bord en répartissant la rigidité sur toute la longueur du recouvrement.

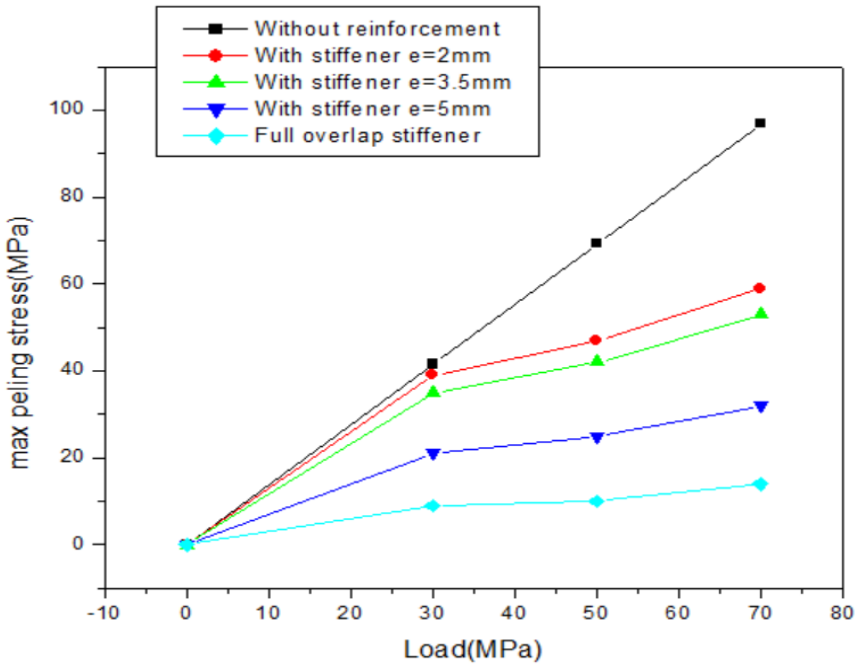


Figure 4.57 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort en rive de la zone de recouvrement)

L'analyse de la Figure 4.58 confirme que si l'on choisit de placer un raidisseur parallèle en rive, les petites épaisseurs (e = 2mm et e = 3.5 mm) sont à éviter car elles accentuent les concentrations de contraintes de cisaillement à l'extrémité du joint par effet de bord.

Pour obtenir une amélioration significative et abaisser la contrainte de cisaillement , il est indispensable soit d'utiliser une épaisseur conséquente (e = 5mm), soit idéalement de prolonger le raidisseur sur toute la longueur de la zone de recouvrement (Full overlap stiffener), ce qui élimine la discontinuité de rigidité en bord de lèvre.

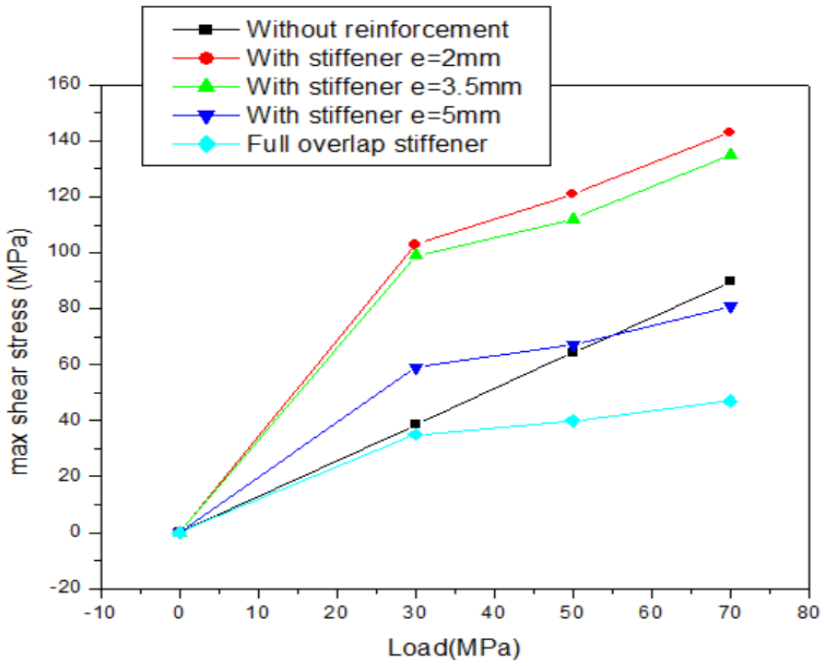


Figure 4.58 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort en rive de la zone de recouvrement)

La Figure 4.59 démontre que le fait de décaler le raidisseur parallèle de 10 mm vers l'intérieur de la zone de recouvrement est une stratégie géométrique très efficace pour brider le mode de rupture en pelage.

Contrairement au positionnement en rive, il n'est pas nécessaire de surdimensionné l'épaisseur pour obtenir une protection optimale : une épaisseur intermédiaire de e = 3.5mm est largement suffisante, car passer à e = 5mm n'abaisse plus significativement les contraintes de pelage.

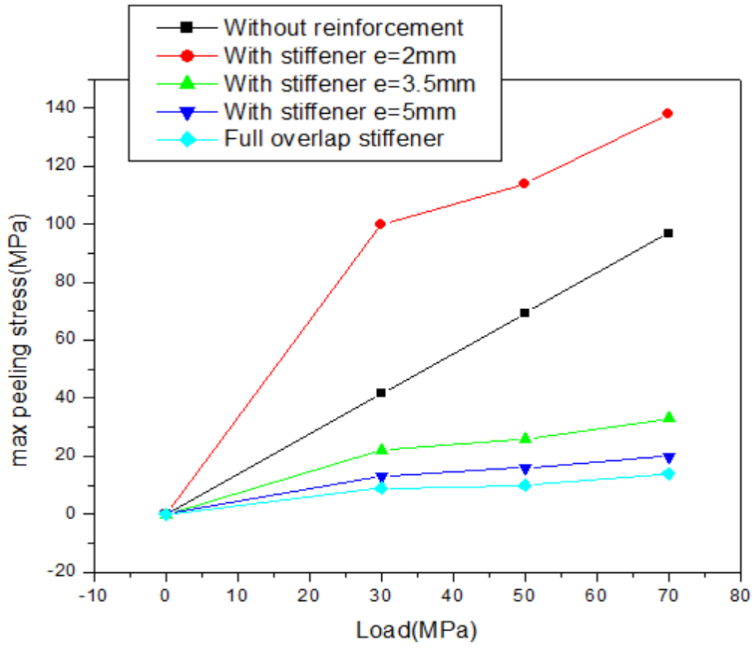


Figure 4.59 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort décalé de 10mm par rapport à l'extrémité du recouvrement)

La Figure 4.58 confirme une règle de l'art essentielle pour le design d'un joint décalé : Seuil de tolérance géométrique : Décaler un raidisseur parallèle de 10 mm est une excellente stratégie pour réduire le cisaillement maximal (80 MPa contre 90 MPa), à la condition absolue que son épaisseur soit suffisante (e ≥5 mm). Zone de danger : Une épaisseur insuffisante (e = 2mm ou e=3.5mm) génère un sur-cisaillement localisé destructeur pour la matrice adhésive.

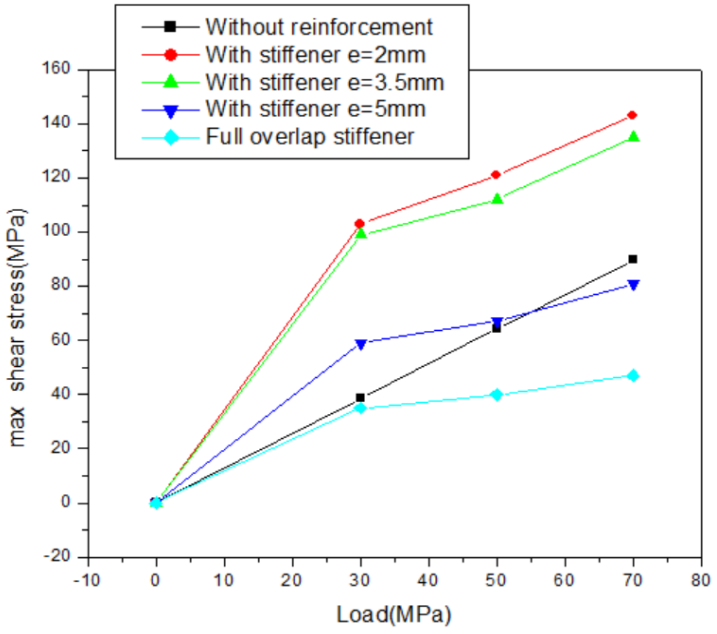


Figure 4.60 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort décalé de 10mm par rapport à l'extrémité du recouvrement)

La Figure 4.61 confirme que le centre de la zone de recouvrement est la zone nodale maîtresse pour brider le moment de flexion qui génère le pelage.

Sur le plan du dimensionnement optimal, l'épaisseur de e = 3.5 mm au centre représente la solution idéale. Elle permet d'atteindre le niveau de performance maximal absolu (presque identique au cas d'un raidisseur complet à recouvrement total ou d'un raidisseur de 5 mm), maximisant ainsi le gain de résistance tout en optimisant le poids du renfort.

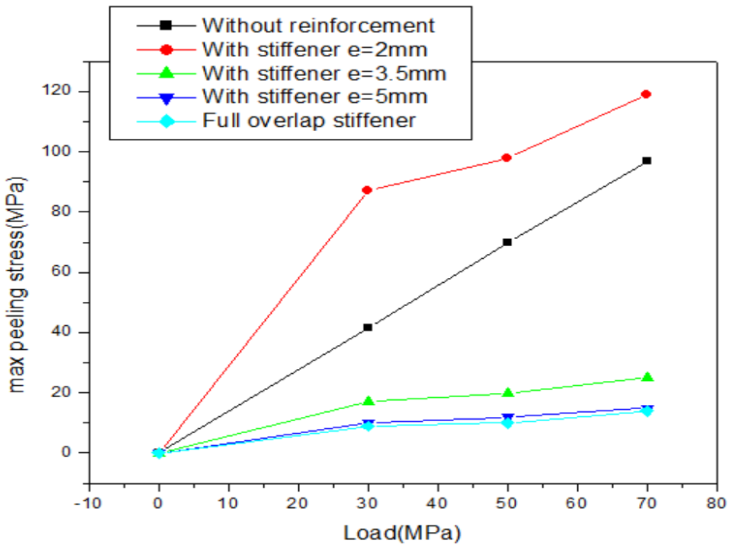


Figure 4.61 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort au centre de la zone de recouvrement)

La Figure 4.62 met en évidence la synergie parfaite du positionnement central d'un raidisseur parallèle pour la reprise des efforts de cisaillement.

Sur le plan de l'optimisation structurale, l'épaisseur e = 5mm constitue l'optimum absolu. Elle permet d'atteindre une réduction maximale des contraintes de cisaillement (~45 % de gain) identique à celle offerte par un raidisseur à recouvrement total (Full overlap), évitant ainsi un surdimensionnement en masse de la structure.

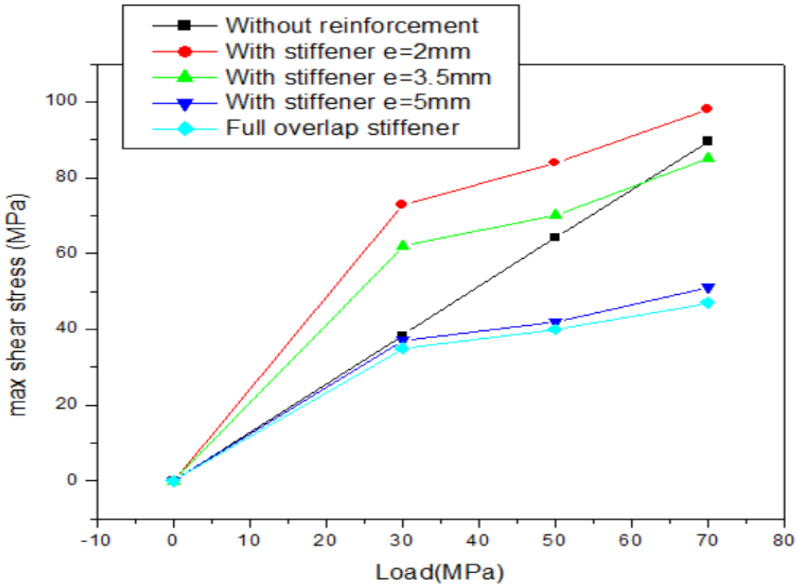


Figure 4.62 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne parallèlement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort au centre de la zone de recouvrement)

La Figure 4.63 apporte une preuve quantitative rigoureuse pour l'établissement des règles de l'art : Règle d'exclusion (Proscription) : L'utilisation d'un raidisseur perpendiculaire positionné en rive de la zone de recouvrement est technologiquement à proscrire, quelle que soit son épaisseur ($2mm \leq e \leq 5$ mm). Elle induit un mécanisme de ruine prématurée par amplification des contraintes de pelage (effet de levier). Alternative géométrique : Si les contraintes spatiales imposent l'usage d'un raidisseur perpendiculaire, il ne doit jamais être implanté en rive. Il faudra soit le centrer ,soit opter pour un chemisage complet de type Full Overlap Stiffener.

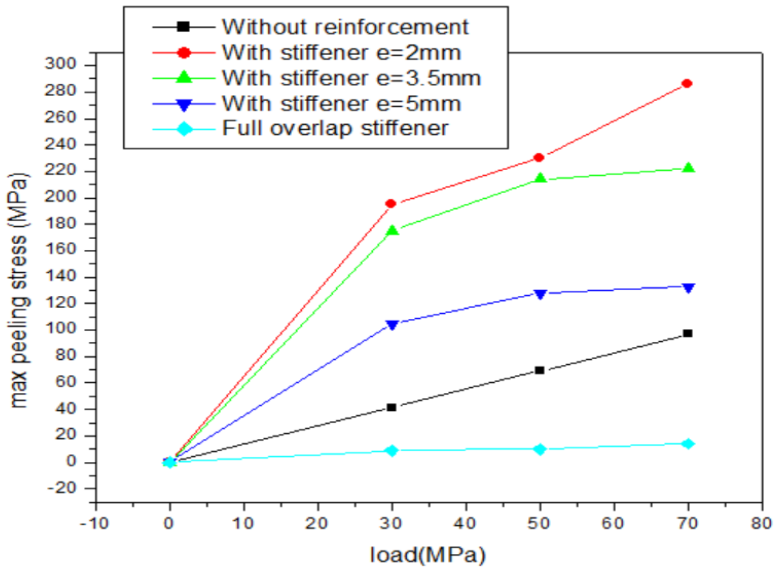


Figure 4.63 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort en rive de la zone de recouvrement)

L'analyse de la Figure 4.64 montre que le raidisseur perpendiculaire placé en rive du joint est défavorable au comportement en cisaillement, car il génère de fortes concentrations de contraintes, surtout pour les faibles épaisseurs ($e \leq 5$ mm). Il est donc recommandé d'éviter cette configuration et de privilégier un raidisseur parallèle ou un renforcement complet de type Full Overlap afin d'améliorer la répartition des efforts et la tenue mécanique de l'assemblage.

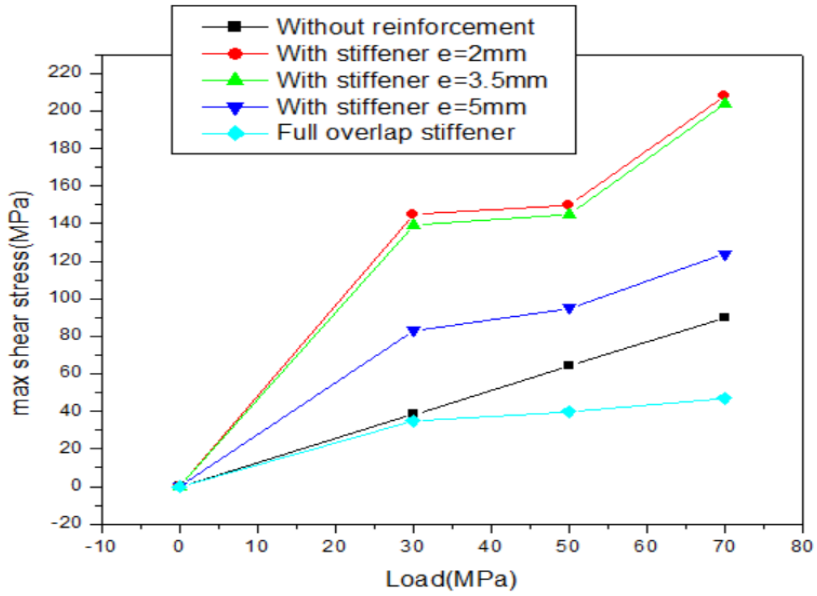


Figure 4.64 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort en rive de la zone de recouvrement)

La Figure 4.65 montre que le décalage de 10 mm du raidisseur perpendiculaire améliore le comportement par rapport à la position en rive, en supprimant l'effet de pivot et en réduisant les contraintes à forte charge (84 MPa contre 98 MPa), sous condition d'une épaisseur suffisante (e ≥ 5 mm). Cependant, cette configuration reste défavorable à faible charge (65 MPa contre 40 MPa à 30 MPa) en raison de la discontinuité de rigidité. Comparaison Directe de Design : Si l'on compare ces résultats avec la Figure 4.59 (raidisseur parallèle décalé de 10 mm, épaisseur 5 mm), le raidisseur parallèle abaissait le pelage à 19 MPa à haute charge sans pénaliser les faibles charges. L'orientation parallèle reste donc largement supérieure d'un point de vue de l'optimisation des contraintes.

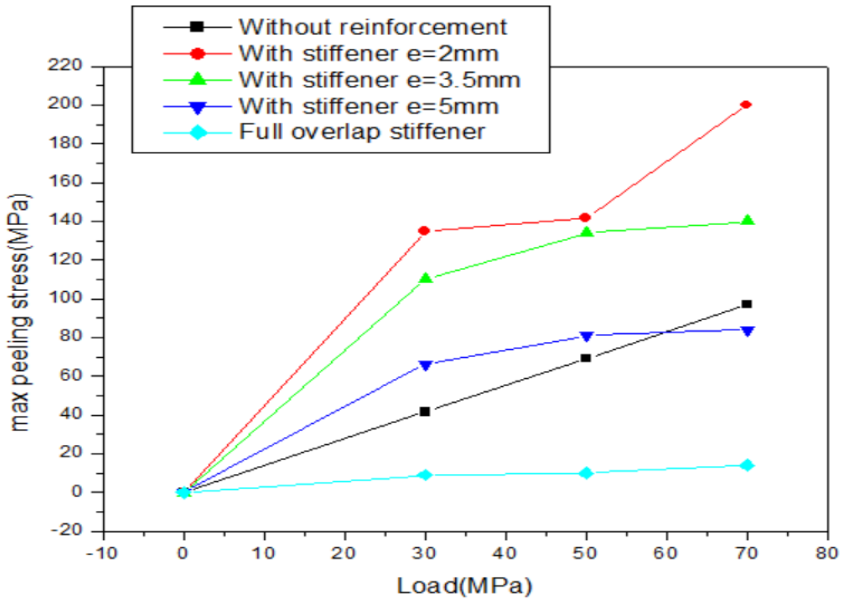


Figure 4.65 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort décalé de 10mm par rapport à l'extrémité du recouvrement)

La Figure 4.66 confirme les limites physiques de l'orientation orthogonale décalée : Condition impérative d'épaisseur : Décaler un raidisseur perpendiculaire de 10 mm permet d'abaisser le cisaillement maximal à haute charge (85 MPa contre 90 MPa), mais à la condition absolue que son épaisseur soit au moins de 5 mm. Une épaisseur plus faible (e = 2mm) crée un point dur interne destructeur (105 MPa). Infériorité par rapport au design parallèle : Si l'on compare cette configuration avec la Figure 4.60 (raidisseur parallèle décalé de 10 mm, épaisseur 5 mm). L'orientation parallèle reste le choix de conception le plus performant et le plus sûr.

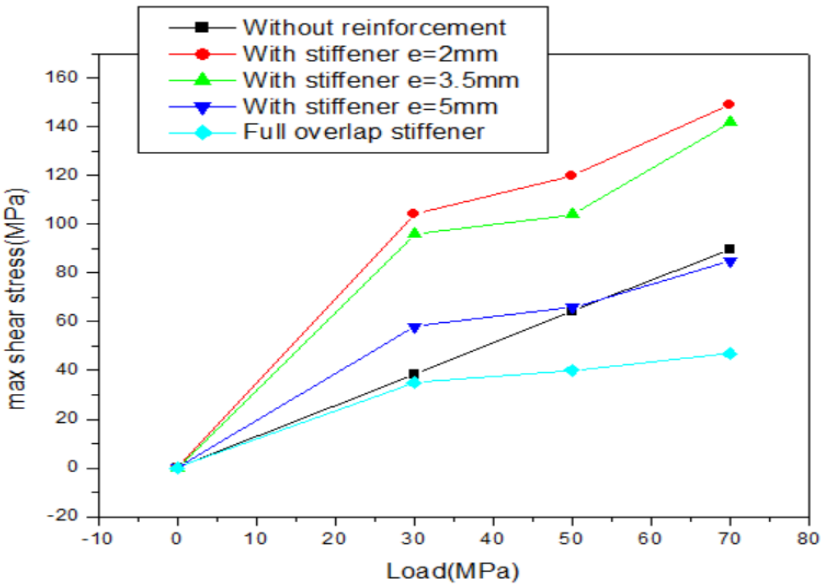


Figure 4.66 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort décalé de 10mm par rapport à l'extrémité du recouvrement)

La Figure 4.67 démontre que si l'on opte pour un raidisseur perpendiculaire, le positionnement au centre de la zone de recouvrement est la configuration locale la plus performante pour lutter contre le pelage.

Sur le plan du dimensionnement géométrique, l'épaisseur e =5mm représente l'optimum. Elle permet de bloquer au maximum l'ouverture du joint au centre.

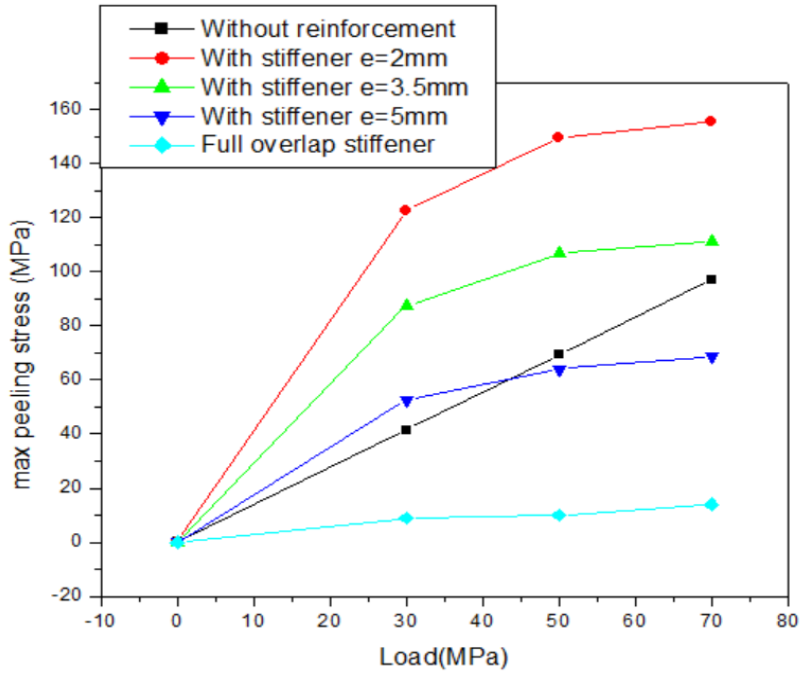


Figure 4.67 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de pelage (renfort au centre de la zone de recouvrement)

L'analyse de la Figure 4.68 confirme que pour un raidisseur perpendiculaire, le centre du recouvrement est la seule position locale efficace pour réduire de manière homogène les contraintes de cisaillement.

Sur le plan de l'optimisation structurale, l'épaisseur e =5 mm constitue l'optimum technique. Recommandation de design : L'utilisation d'un raidisseur perpendiculaire central de 5 mm constitue une excellente solution de compromis structurel. Il bloque le cisaillement maximal à 64 MPa au lieu de 90 MPa (Figure 4.68), tout en maintenant le pelage à 60 MPa au lieu de 98 MPa (Figure 4.67).

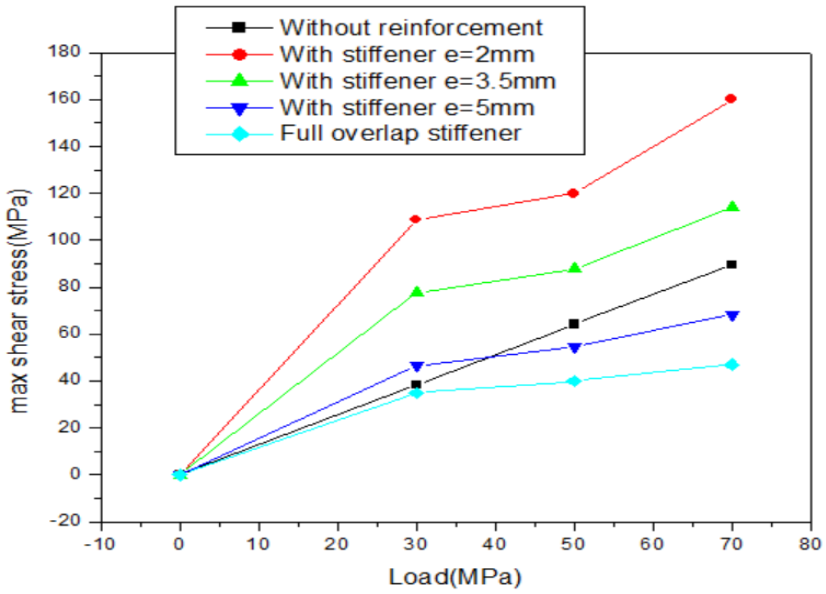


Figure 4.68 influence de l'épaisseur d'un raidisseur positionne perpendiculairement à la direction du chargement sur les contraintes de cisaillement (renfort au centre de la zone de recouvrement)

Conclusion générale :

L'étude numérique approfondie réalisée à travers les Figures (4.53 à 4.68) a permis d'analyser et d'optimiser le comportement mécanique d'un assemblage collé avec couvre-joint renforcé par des raidisseurs composites. L'analyse a porté principalement sur l'influence de la position, de l'orientation et de l'épaisseur du raidisseur sur l'évolution des contraintes de pelage (peeling) et de cisaillement (shear) sous chargement.

Les principaux résultats obtenus permettent de dégager les conclusions suivantes :

1. Performance optimale du Full Overlap Stiffener:

La configuration de type Full Overlap Stiffener se distingue comme la solution la plus performante parmi l'ensemble des cas étudiés. Elle permet une réduction très importante des contraintes de pelage, atteignant des valeurs faibles proches de 15 MPa, tout en maintenant les contraintes de cisaillement à un niveau minimal d'environ 50–52 MPa sous une charge maximale de 70 MPa.

Cette efficacité s'explique par la suppression des discontinuités de rigidité sur toute la zone de recouvrement, ce qui élimine les effets de bord et limite fortement la flexion locale responsable du décollement.

2. Influence de la géométrie des raidisseurs locaux :

Lorsque l'utilisation d'un renforcement complet n'est pas possible, les raidisseurs locaux constituent une alternative, mais leur efficacité dépend fortement de leur configuration :

- L'orientation parallèle à la direction du chargement est la plus favorable, car elle assure une meilleure continuité de la transmission des efforts et une répartition homogène des contraintes.
- À l'inverse, l'orientation perpendiculaire engendre des concentrations de contraintes importantes, notamment en rive, pouvant conduire à des valeurs très élevées de pelage et de cisaillement, parfois largement supérieures au cas sans renfort.
- Le positionnement central dans la zone de recouvrement constitue la configuration la plus efficace pour les raidisseurs locaux, car il permet de limiter l'ouverture du joint tout en réduisant les effets de bord.

3. Effet de la saturation de l'épaisseur :

L'analyse paramétrique des épaisseurs (2 mm, 3,5 mm et 5 mm) met en évidence un phénomène de saturation de l'amélioration mécanique :

- Pour les configurations parallèles, les résultats montrent que les performances obtenues pour 3,5 mm et 5 mm sont quasi identiques, ce qui indique qu'un accroissement supplémentaire de l'épaisseur n'apporte pas de gain significatif.

Ainsi, une épaisseur de 3,5 mm apparaît comme une valeur optimale du point de vue compromis performance/masse.

4. Recommandations de conception:

- Solution haute performance :
  L'adoption d'un Full Overlap Stiffener est recommandée afin d'obtenir une homogénéisation complète de l'interface adhésive et des performances mécaniques maximales.
- Solution optimisée (éco-conception) :
  Un raidisseur parallèle, centré dans la zone de recouvrement, avec une épaisseur de 3,5 mm, constitue le meilleur compromis. Cette configuration permet une réduction importante des contraintes de pelage (jusqu'à ~85 %) et des contraintes de cisaillement (environ 45 %), tout en limitant la masse de la structure par rapport à un renfort complet ou surdimensionné.

Références bibliographies :

[1] Adams R.D., Comyn J., Wake W.C. Structural Adhesive Joints in Engineering, Chapman & Hall, London, 1997.

[2] da Silva L.F.M., Öchsner A., Adams R.D., Handbook of Adhesion Technology, Springer, Berlin, 2011.

[3] Richard Gordon Budynas, J Keith Nisbett Shigley's Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill, New York, 2015.

[4] Hart-Smith L.J., Adhesive-Bonded Single-Lap Joints, NASA Contractor Report CR-112236, 1973.

[5] Daniel I.M., Ishai O., Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University Press, 2006.

[6] Soutis C., "Fibre reinforced composites in aircraft construction",Progress in Aerospace Sciences, 2005.

[7] Baker A.A., Jones R., Callinan R., Repair of Aircraft Structures, Springer, 1988.

[8] da Silva L.F.M., Campilho R.D.S.G., Advanced Analytical Methods for Lap Joints, Springer, 2017.

[9] Baker A., "Bonded composite fatigue-cracked primary aircraft structures", 1999.

[10] Amin Kimiaeifar, Henrik Stensgaard Toft, Erik Lund, Ole Thybo Thomsen, John Dalsgaard Sorensen., 2012, Reliability Analysis of Adhesive Bonded Scarf Joints.

[11] Goland M., Reissner E., "The stresses in cemented joints", Journal of Applied Mechanics, 1944.

[12] Volkersen O., (1938) "Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten", Luftfahrtforschung, Vol. 15, pp. 41-47.

[13] Rose L.R.F., "An application of the inclusion analogy for bonded reinforcements", International Journal of Solids and Structures, 1981.

[14] Soutis C., Hu F.Z., “Design and performance of bonded patch repairs of Composite Structures’’, 1997.

[15] Hart-Smith L.J., Adhesive Bonded Repairs for Aircraft Structures, NASA Technical Reports, 1973–1978.

[16] Baker Alan., Dutton Stuart., Kelly Donlad., Composite Materials for Aircraft Structures, Second Edition, 2004.

[17] Campilho R.D.S.G., da Silva L.F.M., “Advances in numerical modeling of adhesive joints’’, 1-93, 2011.

[18] da Silva L.F.M. Campilho R.D.S.G., Design of Adhesively-Bonded composite Joints, 2015.

[19] Baker A., Rose L., Jones R., Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structures, 2002.

[20] Kinloch A.J., Adhesion and Adhesives, Science and Technology, 1987.

[21] Paris, P.C., Erdogan, F., (1963). A critical analysis of crack propagation laws. Journal of Basic Engineering 85D, 528–534.

[22] Emami Geiglou, T.N. Chakherlou (2019). Numerical and experimental investigation of the effect of the cold expansion process on the fatigue behavior of hybrid (bonded- bolted) double shear lap aluminum joints. International Journal of Fatigue, Vol.126, pp 30-43.

[23] Forsyth PNE (1963). Fatigue damage and crack growth in aluminium alloysDeterioration par fatigue et propagation de fissures dans des alliages d'aluminiumErmüdungsschäden und risswachstum in Aluminiumlegierungen.

[24] R.O. Ritchie (1977). Influence of microstructure on near-threshold fatigue-crack propagation in ultra-high strength steel. Metal Science, 11(8-9), pp 8-9.

[25] J.R. Mohanty, B.B. Verma, P.K. Ray (2009). Prediction of fatigue crack growth and residual life using an exponential model: Part I (constant amplitude loading). International Journal of Fatigue 31, 418–424.

[26] 3M company. surface Preparation and pretreatment for structural Adhesives, Technical Bulletin, 2018.

[27] Tobler, D. Effective Surface Preparation for Adhesive Bonding, Sika White Paper 2024.

[28] Palmieri, F. L., Belcher, M. A., Wohl, C. J., Blohowiak, K. Y., & Connell, J. W. "Laser ablation Surface Preparation for Adhesive Bonding of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites," NASA, 2016.

[29] NASA. (2022). NASA Headquarters, Suite 5R30, Washington, DC 20546, United States of America. National Aeronautics and Space Administration.

[30] Duncan, B C; Broughton, W R (2023) *Characterising strength of adhesion.* Measurement Good Practice Guide.

[31] Elena Jasiūnienė, Bengisu Yilmaz, Damira Smagulova, Gawher Ahmad Bhat, Vaidotas Cicėnas, Egidijus Žukauskas, Liudas Mažeika., Non-Destructive Evaluation of the Quality of Adhesive Joints Using Ultrasound, X-ray and Feature-Based Data Fusion, 2022.

[32] C.J. Brotherhooh, B.W. Drinkwater , S. Dixon, The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques (2003).

[33] M. Cerri , R. Cusolito. Experiences in capability assessment of manual ultrasonic examination techniques for planar flaw detection and sizing in austenitic stainless steel joints, 1989.

[34] SAE International Information Report, ULTRASONIC INSPECTION, SAE Standard J428B_197805, Revised May, 1978.

[35] Qu, Zhi Peng Jiang , Weixu Zhang., Development and Application of Infrared Thermography Non-Destructive Testing Techniques, 2020.

[36] Francesco Ciampa ,Pooya Mahmoodi,Fulvio Pinto and Michele Meo., Recent Advances in Active Infrared Thermography for Non-Destructive Testing of Aerospace Components, 2018.

[37] Bengisu Yilmaz ,Abdoulaye Ba ,Elena Jasiuniene ,Huu-Kien Bui and Gérard Berthiau., Evaluation of Bonding Quality with Advanced Nondestructive Testing Methods and Data Fusion, 2020.

[38] Pengcheng C," Etude et optimisation de la réparation des composites stratifiés par collage des patchs externes",(2010).

[39] Yang Wei, Xihong Jin, Quantian Luo, Qing Li, Guangyong Sun. Adhesively bonded joints – A review on design, manufacturing, experiments, modeling and challenges, 2024.

[40] He, X., A review of finite element analysis of adhesively bonded joints, 2011.

[41] Broughton, W. R., (2023) .Durability Performance of Adhesive Joints.

[42] Francesca Cavezza, Mtthieu Boehm, Herman Terryn, Tom Hauffman. A Review on Adhesively Bonded Aluminium Joints in the Automotive Industry (2020).

[43] Bendemra Hamza., Paul compston., Phillip J.Crothers ., 2015, Optimisation study of tapered scarf and stepped-lap joints in composite repair patches.

[44] Harman, A. and Wang, C.H. Analytic and finite element stress predictions in two dimensional scarf joints. in Australian and International Aerospace Conference. 2005. Melbourne, Australia.

[45] Yisa Fan, Xiaopeng Wang, Ye Liu, Zhen Liu, Gaolei Xi, and Linjian Shangguan. Study on the Effect of Salt Solution on Durability of Basalt-Fiber-Reinforced Polymer Joints in High-Temperature Environment (2022).

[46] Khaoula Idrissa, Aurélien Maurel-Pantel, Frédéric Lebon, Noamen Guermazi.On the Durability Performance of Two Adhesives to Be Used in Bonded Secondary Structures for Offshore Wind Installations (2024).

[47] Ruitao Niu, Yang Yang, Zhen Liu, Ziyang Ding, Han Peng, Yisa Fan. Durability of Two Epoxy Adhesive BFRP Joints Dipped in Seawater under High Temperature Environment (2023).

[48] I.A Ashcroft, M.M.Abdel Wahab, A.D Crocombe, D.J Hughes, S.J Shaw. The effect of environment on the fatigue of bonded composite joints. Part 1: testing and fractography (2000).