

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Électromécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Maintenance industrielle

**Thème**

**Analyse numérique du comportement de joints adhésive a  
simple recouvrement avec différents substrats**

Préparé par :

**HALIMA MEGHERBI**

Soutenu publiquement le : **25 / 06 / 2025**, devant le jury composé de :

<b>Dr. ATHMANI Houari</b>	Maitre assistant Class A	Président
<b>Dr. BENAMAR BADR</b>	Maitre assistant Class A	Examineur
<b>Dr. GUEMMOUR Mohammed</b>	Maitre de Conférence Calss B	Examineur
<b>Dr. HOUARI Amin</b>	Maitre de conférence Class B	Encadrant

Année universitaire: 2024 – 202

## المخلص

بالعمليات مقارنةً لمزاياها ونظرًا. الطيران قطاع خاصةً، الصناعية القطاعات من عدد في مهمًا دورًا الآن الربط عملية تلعب لتشمل الأخيرة السنوات في تحديدًا أكثر وبشكل، المركبة المواد لتشمل العملية هذه نطاق توسيع يتم، الأخرى التقليدية الميكانيكية أنواع من مترابط تجميع في المختلفة الضغوط تباين تحليل في عملنا من الهدف يتمثل. (FGM) الوظيفية المتدرجة المواد ربط المادة وتأثير (وظيفية متدرجة مواد/وظيفية متدرجة مواد، معدن/وظيفية متدرجة مواد، مركب/مركب، معدن/معدن) مختلفة الفرعي الروتين باستخدام FGM لحالة للركائز الميكانيكية الخواص إدخال إجراء تم. الشد لاتجاه وفقًا المتدرجة اللاصقة الاعتبار في اللاصقة والمادة للركائز الميكانيكية الخواص تأثير أخذ تم. ABAQUS حساب كود خلال من USDFLD. للركائز الميكانيكية الخواص تحسين تم إذا المختلفة الضغوط قيمة تقليل يمكن أنه بوضوح النتائج أظهرت

## Abstract

Today, bonding plays an important role in a number of industrial sectors, particularly aerospace. Because of its advantages over other conventional mechanical processes, this process has been extended to composite materials, and more particularly in recent years to the assembly of functional gradient materials (FGM). The aim of our work is to analyze the variation of different stresses in a bonded assembly of different types (metal/metal, composite/composite, functional gradient materials/metal, functional gradient materials/functional gradient materials) and the effect of graded adhesive as a function of tensile direction. Substrate mechanical properties for the FGM case were entered using the USDFLD subroutine in the ABAQUS calculation code. The influence of substrate and adhesive mechanical properties was taken into account. The results clearly showed that the value of the various stresses can be reduced if the mechanical properties of the substrates are optimized.

**Key words:** Single-joint assembly, FGM, Composite, Aluminium 2024-T3, Von Mises, Peeling, Shear.

## Résumé

Le procédé de collage prend de nos jours une place importante dans plusieurs domaines industriels surtout en aéronautique. Vus ses avantages par rapport aux autres procédés mécaniques classiques, ce procédé s'étend pour être appliqué dans les matériaux composites et plus particulièrement, ces dernières années dans le collage des matériaux à gradients fonctionnels (FGM). Notre travail s'inscrit dans ce contexte, l'objectif est d'analyser la variation des différentes contraintes dans un assemblage collé de différents types (Métal/Métal, composite/composite, FGM/Métal, FGM/FGM) et l'effet de l'adhésive gradué suivant direction de la traction. L'introduction de propriétés mécaniques des substrats pour le cas du FGM c'est fait en utilisant sous-programme USDFLD à travers le code de calcul ABAQUS. L'effet des propriétés mécaniques des adhérents et de l'adhésif ont été pris en considération. Les résultats montrent clairement que la valeur des différentes contraintes pourra être réduite si on optimise les propriétés mécaniques des substrats.

Mots clés : Assemblage à simple joint, FGM, Composite, Aluminium 2024-T3, Von Mises, Pelage, Cisaillement.

# *Remerciement*

*Nous* souhaitons exprimer notre profonde gratitude à nos familles, à nos époux, ainsi qu'à nos amis, pour leur patience, leurs encouragements, leur gentillesse et leur soutien constant tout au long de ce projet. Leur présence et leurs paroles bienveillantes ont été une précieuse source d'inspiration qui nous a aidées à avancer et à mener ce travail à bien.

Nous tenons à remercier sincèrement **Dr. Amin**, notre encadreur, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, son attention constante et ses encouragements précieux tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son accompagnement a été d'un grand soutien et a largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions également les membres du jury **Mr. ATHMANI Houari**, **Mr BENAMAR BADR** et **Mr. GUEMMOUR Mohammed** pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail, ainsi que pour l'attention portée à notre mémoire et les observations enrichissantes qu'ils pourraient formuler.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département, pour la qualité de leur enseignement et l'engagement dont ils ont fait preuve tout au long de notre parcours universitaire. Leur contribution a joué un rôle essentiel dans notre formation.

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à :*

*À mes chers parents,*

*pour tous les sacrifices consentis, pour leur soutien durant  
toutes mes années d'études, et pour l'amour inépuisable  
qu'ils m'ont toujours témoigné,*

*Toute ma famille, mes frères et sœurs,*

*pour leur présence, leurs encouragements et les liens  
précieux que nous partageons,*

*A Mon mari*

*qui m'a encouragé et m'a aidé à terminer ce projet avec  
tous ses difficultés et à mon bébé **Mohamed Adem** qui  
m'a donnée l'énergie de continuer et de réussir.*

*A ceux qui ont été toujours à nos côtés mes frères et Ma  
Sœurs ainsi que tous les membres de ma famille.*

*MEGHARBI Halima*

## ***Table des Matières***

<b><i>Résumé</i></b> .....	
<b><i>Remercîment</i></b> .....	
<b><i>Dédicace</i></b> .....	
<b><i>Table de Matière</i></b> .....	
<b>Introduction générale</b> .....	<b>13</b>
<b><i>CHAPITRE I : TECHNIQUE D'ASSEMBLAGE PAR COLLAGE</i></b>	
<b>I.1. Introduction</b> .....	<b>16</b>
<b>I.2. Historique des assemblages par collage</b> .....	<b>16</b>
<b>I.3. Définition des assemblages par collage</b> .....	<b>17</b>
<b>I.4. Principe du collage</b> .....	<b>17</b>
<b>I.5. Conception des assemblages par collage.</b> .....	<b>18</b>
<b>I.6. Modes de chargement du joint collé</b> .....	<b>21</b>
<b>I.7. Étapes de l'assemblage par collage</b> .....	<b>22</b>
<b>I.8. Défauts dans les assemblages collés</b> .....	<b>23</b>
<b>I.9. Rupture dans les assemblages collés</b> .....	<b>24</b>
<b>I.10. Avantages et inconvénients d'assemblage par collage</b> .....	<b>25</b>
<b>I.11. Formulation des joints collés</b> .....	<b>26</b>
<b>I.11. Conclusion</b> .....	<b>29</b>
<b><i>CHAPITRE II : GENERALITE SUR DES MATERIAUX D'ASSEMBLAGE PAR COLLAGE</i></b>	
<b>2.1. Introduction</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2. Matériaux d'assemblage par collage</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2.1. Adhésion</b> .....	<b>31</b>

<b>2.2.2. Substrat .....</b>	<b>36</b>
<b>2.2.3. Choix du substrat .....</b>	<b>37</b>
<b>2.2.3. 1. Alliage d'aluminium 2024-T3.....</b>	<b>37</b>
<b>2.2.3. 2. Matériaux composites .....</b>	<b>38</b>
<b>a) Définition Un matériau composite .....</b>	<b>38</b>
<b>b) Classification des composites selon la forme de renforts .....</b>	<b>38</b>
<b>c) Classification des composites selon la nature de renforts .....</b>	<b>39</b>
<b>d) Matrices.....</b>	<b>40</b>
<b>2.2.3.3. Matériaux à gradient de propriétés (FGM) .....</b>	<b>41</b>
<b>a) Types de FGM .....</b>	<b>42</b>
<b>b) Domaines d'application des FGM .....</b>	<b>42</b>
<b>c) Conception du FGM .....</b>	<b>43</b>
<b>2.4. Conclusion .....</b>	<b>44</b>
 <b><i>CHAPITRE III : ANALYSER DIFFERENTES CONCEPTIONS ET MATERIAUX D'UN ASSEMBLAGE COLLE.</i></b> 	
<b>3.1. Introduction .....</b>	<b>46</b>
<b>3.2. Choix des matériaux.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3. Modèle Géométrique de l'assemblage collé .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.1. Description modèle d'assemblage colle (AL2024 T3/ AL2024 T3) .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.2. Description modèle d'assemblage colle (Composite -Composite) .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.3. Description modèle d'assemblage colle (METAL/FGM) .....</b>	<b>49</b>
<b>3.4. Méthode des éléments finis .....</b>	<b>54</b>
<b>3.4.1. Choix de Maillage .....</b>	<b>54</b>
<b>3.4.2. Conditions aux limites.....</b>	<b>55</b>
<b>3.5. Conclusion .....</b>	<b>55</b>

<b><i>CHAPITRE IV : ANALYSE NUMERIQUE D'UN ASSEMBLAGES PAR COLLAGE</i></b>	
<b>4.1. Analyse des résultats .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2 Validation des résultats numérique avec expérimentale.....</b>	<b>57</b>
<b>4.3. Niveau de Contraintes de Von mises dans l'assemblage collé .....</b>	<b>58</b>
<b>4.4. Niveau de Contraintes de Von mises dans le joint adhésif .....</b>	<b>61</b>
<b>4.5. Distribution contrainte de Von Mises dans le joint adhésif.....</b>	<b>63</b>
<b>4.7. Niveau de Contraintes de cisaillement dans le joint adhésif.....</b>	<b>66</b>
<b>4.8. Conclusion .....</b>	<b>71</b>
<b><i>Conclusion générale</i> .....</b>	<b>73</b>
<b><i>Reference</i>.....</b>	<b>75</b>

***Liste des Tableaux :***

**Tableau.3.1 : les propriétés mécaniques de l'adhésif ADIKIT A140 .....**

**Tableau.3.2 : les propriétés mécaniques de l'Aluminium 2024-T3.....**

**Tableau.3. 3 : Propriétés mécaniques de la fibre et la matrice .....**

**Tableau.3.4 : Propriétés mécanique du composite .....**

**Tableau.3.5 : Propriété matérielle de FGM .....**



## *Liste des figures :*

<b>Figure.1 : Assemblage par collage.....</b>	<b>17</b>
<b>Figure.2 : Joint deux plaques par collage .....</b>	<b>18</b>
<b>Figure 3. Principaux assemblages en bout, par recouvrement et mixtes. ....</b>	<b>18</b>
<b>Figure 4 : Joint en bout, bord à bord, ou butée simple.....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 5: Joint à simple recouvrement. ....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 6: Joint à recouvrement simple biseauté. ....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 7: Joint biseauté en bout, enture. ....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 8: A mi - épaisseur, ou recouvrement en gradin. ....</b>	<b>20</b>
<b>Figure 9: Joint embrevé ou recouvrement avec pliage. ....</b>	<b>20</b>
<b>Figure 10: Joint à recouvrement avec sertissage (pour les tôles). ....</b>	<b>20</b>
<b>Figure 11: Joint bord à bord à recouvrement, avec couvre-joint simple. ....</b>	<b>20</b>
<b>Figure. 12: Modes de sollicitations mécaniques d'un joint structural .....</b>	<b>21</b>
<b>Figure.13: Chargement dans le joint de l'adhésive .....</b>	<b>22</b>
<b>Figure.14 : Défauts typiques présents dans un joint de colle .....</b>	<b>23</b>
<b>Figure.15 : Présentation schématique des modes de rupture des joints collés, .....</b>	<b>24</b>
<b>Figure.16. Présente le modèle géométrique pour le joint à simple recouvrement.....</b>	<b>26</b>
<b>Figure.17 : Les contraintes dans un joint à simple recouvrement .....</b>	<b>27</b>
<b>Figure.18. Représentation schématique de la géométrie d'un joint à simple recouvrement. ....</b>	<b>27</b>
<b>Figure.19. Répartition des contraintes de cisaillement dans le joint .....</b>	<b>28</b>
<b>Figure.20 : Distribution de contraintes selon Goland et Reissner .....</b>	<b>29</b>
<b>Figure.2.1. ; mécanisme de l'adhésive .....</b>	<b>32</b>
<b>Figure.2.2 : Classification des adhésives .....</b>	<b>32</b>

<b>Figure.2.3 : Facteurs influençant la sélection d'un adhésif destiné à une application structurale .....</b>	<b>34</b>
<b>Figure.2.4. Montre l'application de composites sandwichs collés à l'aide d'un avion.</b>	<b>35</b>
<b>Figure.2. 5.. Matériaux de substrat utilisés dans l'industrie maritime .....</b>	<b>36</b>
<b>Figure.2.6 : Mécanisme d'un assemblage par collage .....</b>	<b>37</b>
<b>Figure.2.7. Composition des matériaux composites en général .....</b>	<b>38</b>
<b>Figure.2.8. Classification pour divers types de composites .....</b>	<b>39</b>
<b>Figure.2.9. Renforts fibres .....</b>	<b>40</b>
<b>Figure .2.10. Différentes formes de renforts continus .....</b>	<b>40</b>
<b>Figure.2.11. Diffèrent familles de matrice.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure .2.12 : Deux types de structures graduées. a) structure par étapes (FGM mince), b) structure continue (FGM en masse) c) FGM avec les fractions de volume des phases constitutives graduées. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figure.2.13 : Les différents domaines d'application des FGM.....</b>	<b>43</b>
<b>Figure.2.14 : Types de classification des gradients .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 2.15 : Une plaque FGM en masse. ....</b>	<b>44</b>
<b>Figure.3.1. Présentation des dimensions du modèle d'assemblage collé. ....</b>	<b>47</b>
<b>Figure.3.2. Présentation de l'assemblage collé composite/composite. ....</b>	<b>49</b>
<b>Fig.3.3. Reference geometry of the surface FGM .....</b>	<b>51</b>
<b>Figure.3.4. Assemblage collé FGM-1 (FGM/ Al 2024 T3). ....</b>	<b>52</b>
<b>Figure.3.5. Assemblage collé FGM-2 (FGM/ Al 2024 T3) .....</b>	<b>52</b>
<b>Figure.3.6. Assemblage collé FGM-3 (FGM/ FGM).....</b>	<b>53</b>
<b>Figure.3.7. Assemblage collé FGM-4 (FGM/ FGM).....</b>	<b>53</b>
<b>Figure. 3.8. Maillage du joint adhésif collé à simple recouvrement utilisée.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure. 3.9. Boundary conditions .....</b>	<b>55</b>

**Figure.4.1** présenté la Comparaison de la courbe expérimentale Force-déplacement avec les méthodes numérique de l'assemblage collé AL2024-T3 / AL2024-T3 .....57

**Figure.4.2.** Représenté Niveau de contraintes Von mises dans l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$  .....58

**Figure.4.3.** Représenté Niveau de contraintes Von mises dans l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 35$ .....59

**Figure.4.4 :** représenté Niveau de contraintes Von mises dans l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ . .....60

**Figure.4.5 :** Représenté la variation de la contrainte de von mises dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ . .....61

**Figure.4.6.** Représenté la variation de la contrainte de Von mises dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 35 \text{ MPa}$ . .....61

**Figure.4.7.** Représenté la variation de la contrainte de von mises dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ . .....62

**Figure.4.8.** Distribution de contraintes de Von mises dans le joint adhésif pour les différentes configurations d'assemblage. ....63

**Figure.4.9.** Niveau de contraintes de Von mises dans le joint adhésif pour les différentes configurations d'assemblage. ....64

**Figure.4.10 :** Niveau de contraintes de Von mises dans le joint adhésif pour les différentes configurations d'assemblage. ....65

**Figure.4.11 :** Représenté la variation de la contrainte de cisaillement dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ . .....66

**Figure.4.12 : Représenté la variation de la contrainte de cisaillement dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l’assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 35 MPa$ . .....67**

**Figure.4.13 : Représenté la variation de la contrainte de cisaillement dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l’assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 55 MPa$ . .....67**

**Figure.4.14 : Niveau de contraintes de cisaillement dans le joint adhésif pour les différentes configurations d’assemblage. ....68**

**Figure.4.15 : Niveau de contraintes de cisaillement dans le joint adhésif pour les différentes configurations d’assemblage. ....69**

**Figure.4.16 : Niveau de contraintes de cisaillement dans le joint adhésif pour les différentes configurations d’assemblage. ....70**

# **Introduction générale**

# Introduction générale

La fabrication d'une structure passe généralement par l'assemblage de pièces les unes avec les autres. Ainsi, une structure constituée de pièces différentes, en particulier au niveau de la nature des matériaux utilisés pour réaliser, est construite par l'assemblage de ces différentes pièces, l'assemblage joue un rôle majeur dans la structure. Les assemblages sont très fréquemment localisés dans les zones d'effort tranchant ou de moment fléchissant maximaux. La conception et les détails d'un assemblage sont importants, car ils conditionnent les problèmes de transmission d'efforts au-delà de rendre possible la construction d'une structure, l'assemblage assure la transmission des charges d'une pièce à l'autre, et par conséquent la technique d'assemblage devient un facteur prépondérant. Il existe de nombreux modes d'assemblage structural sont le soudage, le rivetage et le collage, chacun de ces modes possède ses avantages et ses inconvénients ainsi qu'un adaptateur aux sollicitations appliquées à la structure et donc aux pièces assemblées, aux fonctions particulières à remplir par les pièces et à la nature même de ces pièces. La maîtrise des assemblages structuraux dans une application industrielle s'avère alors être un des facteurs les plus importants pour réaliser un produit qui peut répondre aux différentes exigences économiques et techniques. Le choix du mode d'assemblage le mieux adapté à l'application reste l'élément clé pour avoir une structure robuste qui satisfasse au cahier des charges du produit.

L'assemblage de structures dans le domaine des transports, notamment l'aéronautique, se tourne de plus en plus vers des solutions d'assemblages par collage. Ces liaisons collées consistent en un joint d'adhésif unique, permettant de réunir deux pièces. Les recherches actuelles effectuées au cours des dernières décennies sont concentrées sur le collage des matériaux métalliques et composites. Cette technique d'assemblage présente de nombreux avantages, comme l'aptitude à assembler des matériaux de nature très différente, la meilleure répartition des contraintes, le gain de poids, la diminution des points de corrosion, absence de trous à l'usinage donc pas de concentration de contrainte. Dans les assemblages collés, les propriétés mécaniques de l'adhésif, le maillon faible, sont faibles par rapport à celles des adhérents. Ainsi, pour assurer la sécurité de la structure collée, il est nécessaire d'analyser la distribution des contraintes sur la couche adhésive.

L'objectif de ce travail est d'analyser par la méthode des éléments finis la répartition des contraintes dans un joint adhésif utilisé pour assembler deux plaques de

## Introduction générale

---

différents types (métal/métal, composite/métal, composite/composite) et d'autre part, voir comment se comporte cet adhésif dans des assemblages de types FGM. Avec l'apparition actuelle de nouveaux matériaux, on assiste à un développement en ce qui concerne le procédé d'assemblage qui s'étend de plus en plus dans plusieurs domaines et touche un grand nombre de matériaux parmi lesquels collages de composite et de matériaux FGM

On a modélisé les assemblages collés à l'aide du code de calcul par éléments finis ABAQUS. On a vu essentiel de présenter une étude de validation des résultats afin de donner une fiabilité à notre modèle numérique et de comparer les résultats de la sensibilité de maillage en modifiant le type et la densité d'éléments de maillage. L'objectif de ce travail est de déterminer la répartition des contraintes dans la couche d'adhésive pour le cas d'un assemblage de deux plaques collées. Dans cette mémoire on a essayé de regrouper tous les types d'assemblages FGM/FGM et FGM/Métal afin d'avoir une comparaison dans la valeur des contraintes dans le joint adhésif et dans l'assemblage

## Chapitre 1

# **T** ECHNIQUE D'ASSEMBLAGE PAR COLLAGE



## I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présente une revue bibliographique visant à approfondir la compréhension de l'assemblage par collage, notamment sa conception face aux sollicitations mécaniques. La présence de défauts de l'assemblage qui influence l'apparition des modes d'endommagement.

## I.2. Historique des assemblages par collage

La technique du collage remonte à plusieurs millénaires : on retrouve les premières fabrications vers 8000 av . J-C (même si certaines traces peuvent faire remonter l'utilisation d'adhésif à plus de 35 000 ans). Où de la bétuline (extrait du bouleau) est utilisée pour coller les deux parties, et cela dans les régions du Proche-Orient (en Judée) et en Basse-Égypte, mais également en Europe. De nombreuses substances sont utilisées comme adhésif au cours du Néolithique telles que le bitume, mais également les résines de conifères, de pistachiers, de bouleaux, d'acacias ou encore des protéines animales telles que le blanc d'œuf ou la caséine. En Égypte, 2 000 ans av. J-C., la gomme arabique sert à maintenir les pigments des ornements de sarcophages, mais également des papyrus. Dans la mythologie grecque, Dédale est l'inventeur de la colle, au même titre que la hachette et le fil à plomb. De l'autre côté de l'Atlantique, les civilisations précolombiennes (Azèques, Olmèques, Mayas, etc.) utilisent le caoutchouc dans de nombreuses applications.

Celui-ci fut importé par les Espagnols en Europe au XVI siècle. Mais c'est au XV siècle, avec l'essor de l'imprimerie, que l'utilisation des colles s'accroît. En effet, la fabrication de papier nécessite des quantités de colle importantes et la qualité du papier en dépend grandement. C'est également à cette période que des charges telles que le talc ou le kaolin sont ajoutées aux colles influant ainsi sur l'opacité du papier et son imperméabilité. Au XIX siècle, les colles évoluent de manière importante avec deux découvertes : celle du naphta (Charles Macintosh, 1823), qui est le solvant idéal du caoutchouc, et la découverte de la vulcanisation par le soufre (Charles Goodyear, 1840), permettant ainsi l'apparition des colles caoutchouc en 1845 [01].

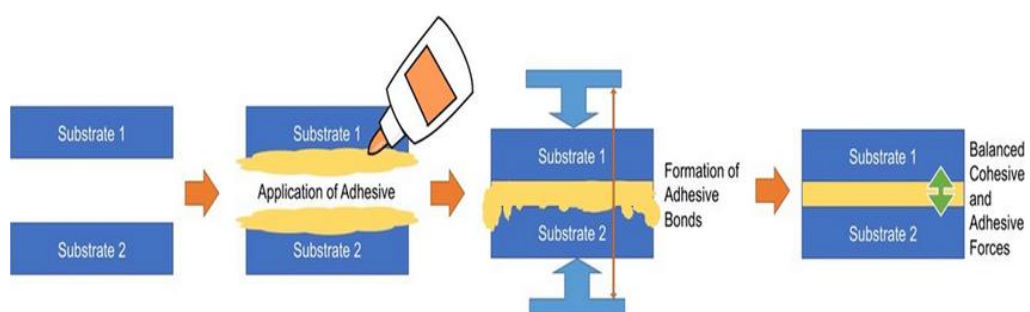
La Deuxième Guerre mondiale a permis le développement de la recherche, permettant de fabriquer des colles synthétiques afin de remplacer les substances naturelles. Les années 40 voient l'état de l'art du collage et l'apparition de la colle silicone, du polyuréthane et du polyisocyanate qui furent utilisés dans l'assemblage de structure d'avion : les premiers adhésifs structuraux étaient nés [2]. Puis dans les années 50 sont créés : les

époxydes, les colles anaérobies et les cyanoacrylates développés par la société Loctite. La décennie suivante voit l'élaboration des polyamides, colles qui résistent à des températures de 350°C et qui sont utilisées dans l'industrie spatiale, ainsi que les premières colles biocompatibles. De nos jours, d'importants progrès ont été réalisés sur les différentes familles de colles, et ont donné la diversité de colles que nous connaissons actuellement (cyanoacrylates, silicones, résines PVC, élastomères, époxydes, etc.).

### I.3. Définition des assemblages par collage

L'assemblage mécanique désigne un assemblage permanent de pièces par déformation, assurant la transmission des efforts. Parmi les différentes méthodes, nous privilégions ici l'assemblage par collage. Le collage, utilisant un adhésif pour assembler durablement des matériaux similaires ou différents, est une méthode courante. L'assemblage par collage est une technologie prometteuse pour assembler des matériaux et des géométries dissemblables et plus adaptée à des aspects tels que le rapport résistance/poids élevé, la flexibilité de conception, la tolérance aux dommages, la résistance à la fatigue, etc. Le collage est une technologie dont le développement a dépendu en grande partie de la compréhension de la chimie impliquée [03].

Le collage est un procédé qui permet de maintenir solidement et durablement deux matériaux semblables ou différents en créant une adhésion et une cohésion entre les deux surfaces au moyen d'une substance (figure.1). Le film adhésif s'accroche solidement sur les matériaux à assembler [04]



**Figure.1 : Assemblage par collage**

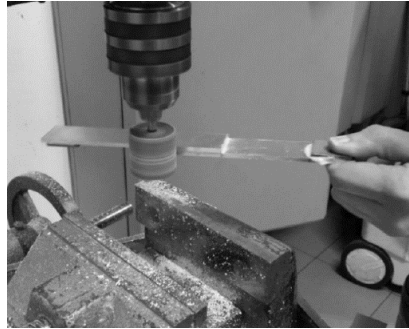
### I.4. Principe du collage

Le joint collé constitue essentiellement un procédé d'assemblage permettant :

- d'alléger les structures (pas de boulons, etc),
- d'éviter les modifications structurales internes des matériaux à réunir,

- de former un joint continu, résolvant des problèmes d'étanchéité, et parfois de corrosion,
- de répartir uniformément les contraintes.

Par exemple un joint collé à recouvrement simple est fabriqué à l'aide de deux adhérents (pièces composites ou pièces aluminium) assemblés par un adhésif (Figure.2).



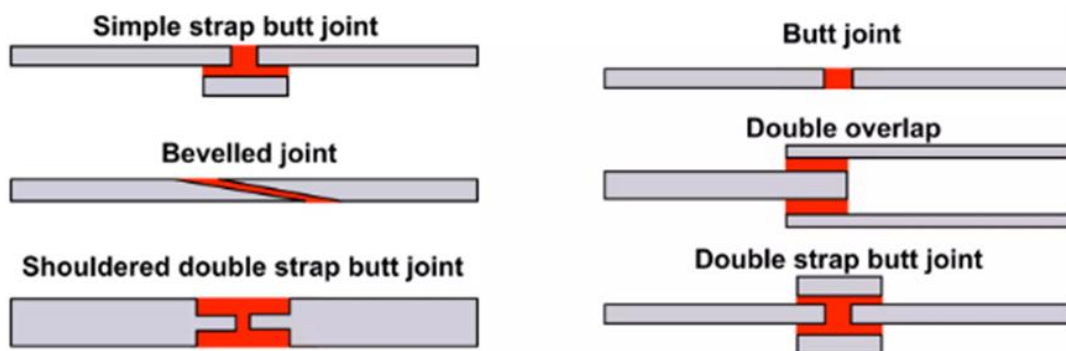
**Figure.2 : Joint deux plaques par collage [05].**

### I.5. Conception des assemblages par collage.

La performance des joints collés dépend de leur configuration, des propriétés géométriques et des matériaux, de la préparation de surface, du mode de rupture et des techniques d'assemblage. Une conception d'assemblage adaptée aux contraintes mécaniques de l'adhésif est essentielle, et doit respecter les règles suivantes :

- L'étendue de la surface collée est fonction des efforts supportés par la liaison et des caractéristiques de la colle.
- La résistance maximale d'un assemblage est obtenue si toute la surface collée est également sollicitée (de préférence compression ou cisaillement).

La figure 3 montre un aperçu général sur Les quatre principaux types de collage [06].



**Figure 3. Principaux assemblages en bout, par recouvrement et mixtes.**

### I.5.1. Joint en bout, bord à bord, ou butée simple

L'inconvénient principal de ce type de joint est une résistance insuffisante pour la transmission des sollicitations, la surface de collage étant très restreinte, la résistance de l'adhésif est très faible par rapport à celle des pièces assemblées. Ce type de joint est donc formellement déconseillé [06].

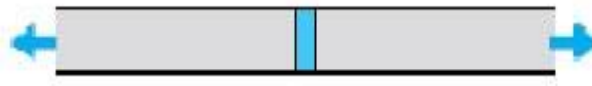


Figure 4: Joint en bout, bord à bord, ou butée simple.

### I.5.2 Joint à recouvrement simple

La répartition des charges est satisfaisante pour ce qui est des sollicitations normales. La répartition excentrique des charges engendre un moment de flexion (figure 5).



Figure 5: Joint à simple recouvrement.

### I.5.3. Joint à recouvrement simple biseauté

Cette forme permet une répartition plus favorable des contraintes, en les réduisant aux extrémités (figure 6).

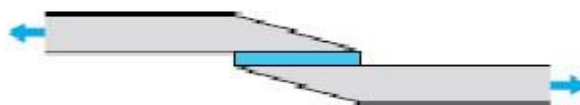


Figure 6: Joint à recouvrement simple biseauté.

### I.5.4 Joint biseauté en bout, enture

Assez bonne répartition des charges mais la section collée est faible (figure 7).



Figure 7: Joint biseauté en bout, enture.

### I.5.5 Joint à mi- épaisseur, ou recouvrement en gradin

Ce joint a une bonne résistance mais il est difficile à usiner (ne peut être réalisé qu'avec des tôles ou pièces épaisses) (figure 8).



Figure 8: A mi- épaisseur, ou recouvrement en gradin.

### I.5.6. Joint embrevé ou recouvrement avec pliage

Ce type permet une répartition plus favorable des contraintes et il est relativement aisé à réaliser (figure 9).

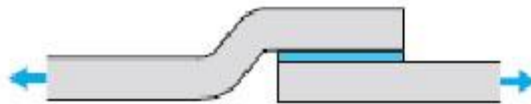


Figure 9: Joint embrevé ou recouvrement avec pliage.

### I.5.7. Joint à recouvrement avec sertissage (pour les tôles)

Encore plus solide et plus fiable que les précédents car il combine les avantages du collage et du sertissage (figure 10).



Figure 10: Joint à recouvrement avec sertissage (pour les tôles).

### I.5.8. Joint bord à bord à recouvrement, avec couvre-joint simple

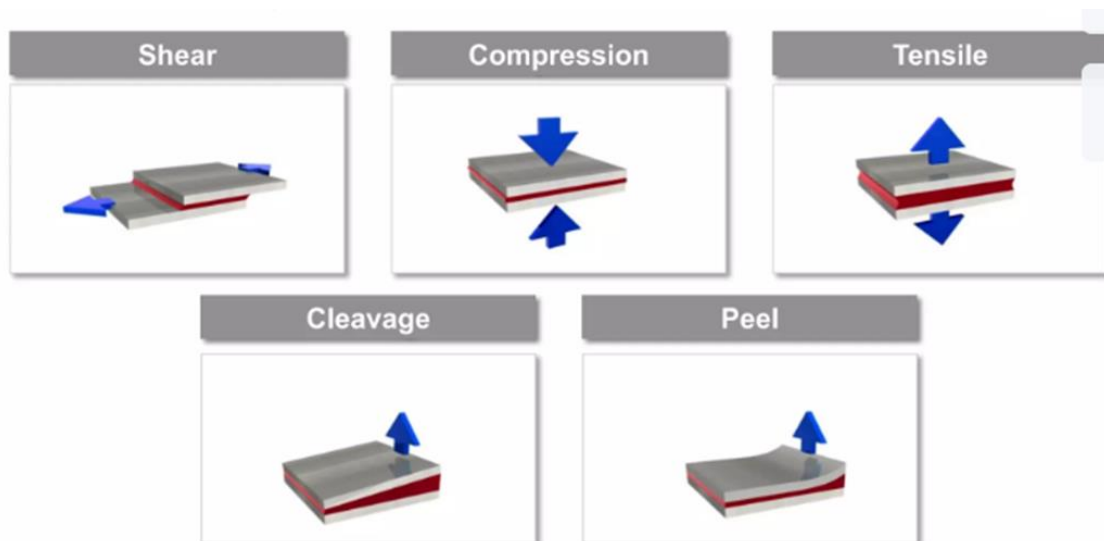
Dans la pratique, ce joint est recommandé lorsqu'une surface doit être lisse sans préparation particulière, permet une transmission satisfaisante des sollicitations pour les contraintes normales. Mais la répartition des charges est assez excentrique (apparition possible de contraintes de pelage ou de clivage) (figure 11).



Figure 11: Joint bord à bord à recouvrement, avec couvre-joint simple.

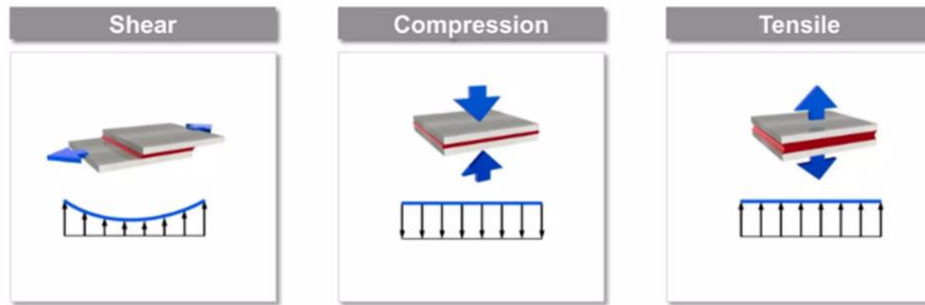
## I.6. Modes de chargement du joint collé

Il existe quatre modes principaux de sollicitation des joints adhésifs : cisaillement, tension, clivage et pelage (Fig. 12). Les adhésifs résistent mieux au cisaillement qu'aux autres modes, c'est pourquoi les joints sont généralement conçus pour privilégier ce type de sollicitation [07]. Le joint de cisaillement à recouvrement est couramment utilisé car il est facile à fabriquer.



**Figure. 12: Modes de sollicitations mécaniques d'un joint structural [08].**

Un joint est optimalement résistant sous cisaillement tangentiel parallèle au plan de recouvrement, particulièrement avec des substrats rigides (Fig. 12a). Une force de traction perpendiculaire au joint (tension pure) peut aussi induire une résistance élevée (Fig. 12b), à condition d'un alignement axial parfait, rarement atteignable en pratique. Le moindre désalignement introduit un mode d'ouverture, générant des moments de flexion et des concentrations de contraintes significatives [09]. Avec des adhérents rigides, ce mode est appelé clivage (Fig. 12c). Avec des substrats flexibles, il s'agit plutôt de pelage (Fig. 12d), où la tension s'accompagne de déformations importantes du substrat, exacerbant l'élongation de l'adhésif et étant aussi, voire plus, dommageable que le clivage. Ces deux modes d'ouverture sont à éviter en conception, car les concentrations de contraintes aux extrémités du joint initient et propagent rapidement les fissures [10]. La résistance de l'adhésif en compression est supérieure à celle en tension.



**Figure.13: Chargement dans le joint de l'adhésive**

En réalité, les joints adhésifs subissent des chargements combinés. Le concepteur doit donc adapter la conception de l'assemblage pour respecter les règles fondamentales, les règles de base suivantes :

- utiliser une surface de collage suffisamment grande.
- uniformiser la répartition de contraintes ;
- minimiser les efforts de pelage ou de clivage

Une fois qu'on applique ces principes fondamentaux, il existe malgré cela plusieurs autres aspects qui affecteront les proportions et les répartitions des modes énumérés à la Fig. 13. Entre autres, la rigidité de l'adhésif et des adhérents et les dimensions géométriques du joint peuvent affecter le chargement interne de la couche d'adhésif.

### **I.7. Étapes de l'assemblage par collage**

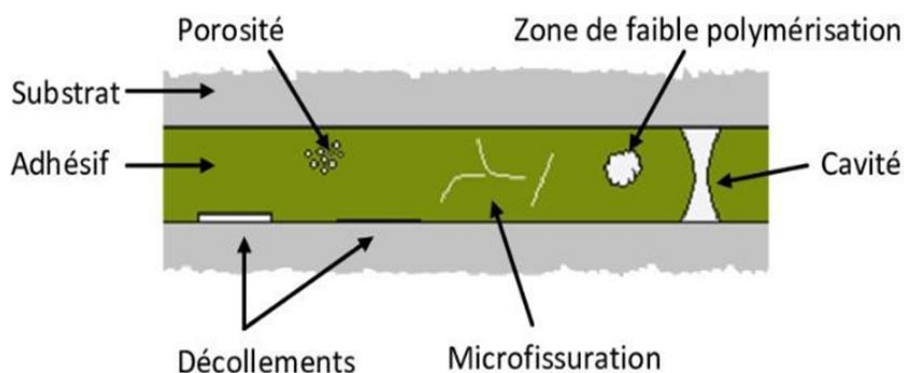
Les principales étapes du collage sont la préparation de surface, la mise en place et le durcissement des adhésifs. La préparation de la surface est l'une des étapes les plus importantes de l'adhérence [11]. La préparation de la surface des adhérents est nécessaire pour augmenter l'énergie de surface et favoriser un meilleur mouillage par l'adhésif. Trois principales étapes souvent utilisées dans la préparation des surfaces. La première étape consiste en un nettoyage général de la surface pour éliminer les particules étrangères. La deuxième étape implique l'abrasion de la surface pour augmenter la rugosité de la surface ou la surface de contact, ce qui augmente également l'emboîtement mécanique de l'adhésif et de l'adhérence. La dernière étape, qui est parfois appliquée en fonction des matériaux utilisés, consiste en un traitement chimique de la surface pour augmenter son énergie de surface

**I.8. Défauts dans les assemblages collés :**

L'adhérence des assemblages collés est généralement mesurée à l'aide d'essais Mécaniques de séparation de l'assemblage mais peut aussi être évaluée soit par des procédés de contrôle destructifs et non destructifs de l'assemblage qui permettent d'identifier des défauts dans le joint de colle tels que de la porosité, un déficit de polymérisation, de la microfissuration ou des décollements ponctuels. Les essais mis en œuvre permettent une étude de la répartition de l'état de contrainte en fonction des données géométriques de l'assemblage et de la loi de comportement de l'adhésif [12].

La nature des défauts que l'on peut rencontrer dans un assemblage collé varie selon le phénomène à l'origine de ce défaut. On peut ainsi trouver (figure 14):

- Une porosité due à des gaz de polymérisation ou de l'air emprisonné pendant la fabrication de l'assemblage.
- Des micros fissures dues à un fluage de l'adhésif, des contraintes résiduelles ou à des phénomènes de fatigue
- Des zones de faible polymérisation causées par exemple par un mauvais mélange de l'adhésif, un mauvais dosage des composants ou un temps de polymérisation insuffisant.
- Des cavités dues à une mauvaise application de l'adhésif ou à des dégagements gazeux durant la polymérisation.
- Des zones de décollements pouvant être conséquentes et provenant généralement d'une déficience de la préparation de surface du substrat, de phénomènes de condensation à l'interface, ou à la présence de contaminants lors du collage.



**Figure.14 : Défauts typiques présents dans un joint de colle [13].**



### I.9. Rupture dans les assemblages collés

Les assemblages collés présentent divers modes de défaillance, les plus fréquents étant [14] (figure.15):

- Défaillance cohésive au sein de la couche adhésive,
- Défaillance interfaciale à l'interface adhérente de l'adhésif,
- Défaillance de la matrice à la surface de l'adhérent,
- Défaillance interlaminaire dans le stratifié adhérent,
- Défaillance transversale de la lame superficielle due à une défaillance matricielle ou à une défaillance interfaciale.
- Défaillance longitudinale de la lame superficielle.

La force d'adhérence est également influencée par la présence de régions non durcies et/ou de défauts dans la zone collée. Parmi tous les mécanismes d'endommagement possibles décrits ci-dessus, ceux nécessitant le moins d'énergie contrôleront la défaillance finale de l'articulation. Les défaillances cohésives et adhésives sont les deux modes généralement distingués. Une défaillance cohésive à l'intérieur de l'adhérent indique généralement une sélection appropriée de l'adhésif. Un matériau matriciel cassant, une architecture de renforcement anisotrope ou une mauvaise consolidation des adhérents composites peuvent favoriser une rupture précoce en traction ou un délaminage des éléments collés.

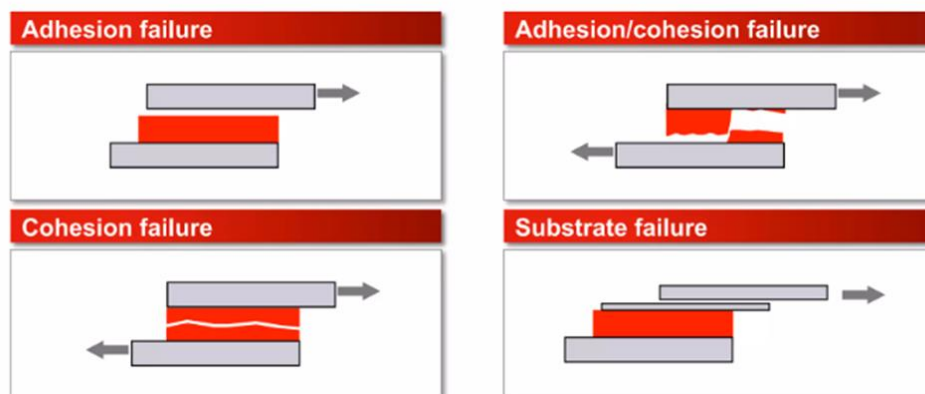


Figure.15 : Présentation schématique des modes de rupture des joints collés, [15].

**I.10. Avantages et inconvénients d'assemblage par collage [16] :****I.10.1. Avantages de collage :**

Le collage est irremplaçable pour les produits de grande consommation qui ne sont pas destinés à supporter de grands efforts ni à être exposés à des environnements agressifs. C'est souvent la meilleure solution pour assembler des matériaux fragiles et/ou différents, par exemple les vitrages d'immeubles ou les pare-brise d'automobiles. Le défi actuel est d'en assurer la fiabilité à long terme

- Le collage permet d'assembler des matériaux composites, sans en rompre les fibres ;
- Assemblage de matériaux d'épaisseurs très différentes ;
- Le collage est une technique universelle puisqu'à priori il est possible de tout coller, si ;
- Nous conditionnons convenablement les surfaces à assembler ;
- Le collage altère peu les substrats puisque seul le traitement de surface des substrats ;
- intervient (dans le sens où le décapage dégrade la surface mais moins que le perçage) ;
- Le collage permet d'obtenir une meilleure répartition des contraintes, due au transfert de ;
- Charge continu, ceci implique une meilleure tenue aux chocs et aux vibrations.
- Le collage diminue le risque de corrosion galvanique entre deux métaux différents.
- Le collage permet de réduire le poids de la structure assemblée (comparée à une structure boulonnée) ;
- Le collage permet d'obtenir des structures lisses (avantage aérodynamique) ;

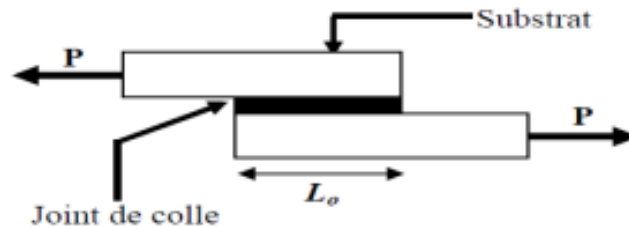
**I.10.2. Inconvénients:**

- Temps de manipulation des pièces ;
- Durabilité des assemblages en milieux agressifs ;
- Résistance à la chaleur limitée ;
- Durée de vie du joint collé ;
- Résistance qu'à certaines sollicitations ;
- Maîtrise du procédé indispensable pour fiabiliser l'assemblage ;
- Démontrabilité : démontage en maintenance ou en fin de vie ;
- Traitements de surface souvent polluants (solvants, acides, ...)
- Manipulation des adhésifs (produits réactifs ou solvantés) ;
- Températures d'utilisation limitées ;

- Un positionnement incorrect des pièces assemblées ne peut plus être rectifié après la prise de l'adhésif ;
- Les essais non destructifs sont onéreux ;

### I.11. Formulation des joints collés

Les joints peuvent exister sous différentes formes : en bout à bout, en forme de T, en recouvrement simple ou double, en tubes emboîtées l'une sur l'autre, etc. Mais en production, le recouvrement simple est la configuration la plus répandue, probablement pour des raisons de facilité de mise en œuvre. On considère que le recouvrement simple dans le cadre de cette étude. La Figure.16 présente un exemple typique de joint à recouvrement simple et permet de définir les dimensions permettant de décrire de tels joints.



**Figure.16. présente le modèle géométrique pour le joint à simple recouvrement.**

L'équilibre de force de l'adhérent supérieur et inférieur dans la figure.17, Pour l'adhérent supérieur et inférieur, les équations d'équilibre sont :

$$\frac{dN_1}{dx} + \tau = 0; \frac{dQ_1}{dx} + \sigma = 0; \frac{dM_1}{dx} + \frac{t_1}{2} \tau - Q_1 = 0 \quad (01)$$

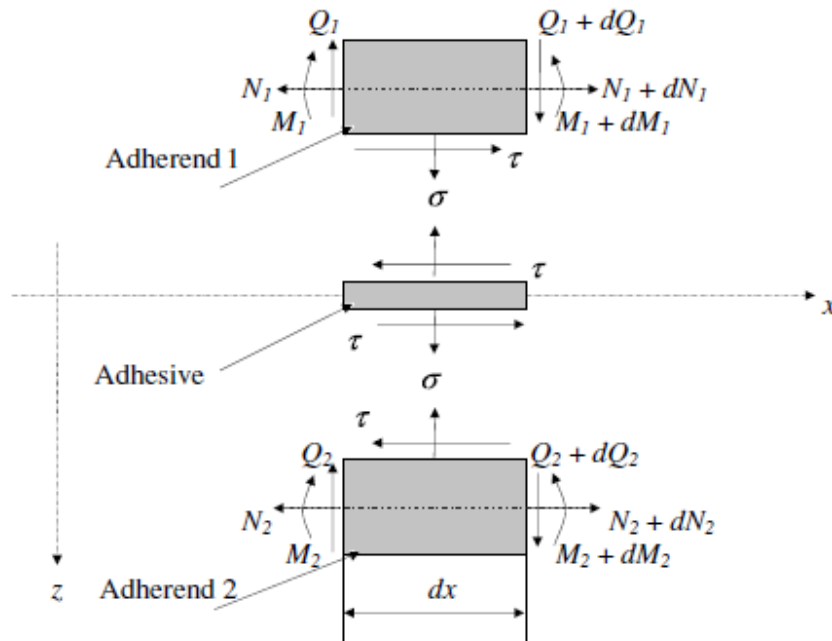
$$\frac{dN_2}{dx} + \tau = 0; \frac{dQ_2}{dx} + \sigma = 0; \frac{dM_2}{dx} + \frac{t_1}{2} \tau - Q_2 = 0 \quad (02)$$

Là où  $N_i$ ,  $Q_i$ , et  $M_i$  ( $i = 1,2$ ) sont les forces longitudinales, les contraintes de cisaillement transversales et les moments de flexion par largeur d'unité pour les adhérents.

Les équations différentielles (01) et (02) peuvent être combinées ensemble par la contrainte de cisaillement tangentielle dans la couche d'adhésif comme suit :

$$\tau = G_a \gamma = \frac{G_a}{\eta} (u_i - u_o) \tag{03}$$

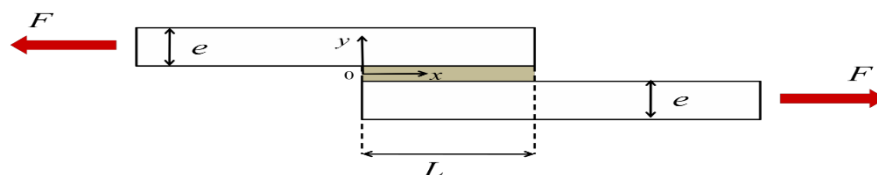
Là où  $G_a$  est le module de cisaillement de l'adhésif,  $u$  le déplacement longitudinal,  $\gamma$  et  $\eta$  sont la déformation de cisaillement et l'épaisseur de la couche d'adhésif, respectivement.



**Figure.17 : Les contraintes dans un joint à simple recouvrement [17] [4]**

L'approche la plus simple consiste à considérer que les substrats sont rigides et que seul l'adhésif se déforme en cisaillement. Pour un échantillon de largeur  $w$ , d'épaisseur  $e$  et de longueur de recouvrement  $L$  (figure.18), la contrainte de cisaillement est donnée par :

$$\tau = \frac{F}{wL} \tag{04}$$



**Figure.18. Représentation schématique de la géométrie d'un joint à simple recouvrement.**

Cependant la distribution de contrainte dans le joint n'est pas uniforme en raison de l'élongation des substrats qui augmente dans la zone de recouvrement à partir des

extrémités. L'effet observé, est une forte concentration de contrainte en cisaillement proche des extrémités de la zone de recouvrement. L'analyse de Volkersen [18] (**Figure.19**) permet d'exprimer la distribution de contraintes en cisaillement dans l'adhésif :

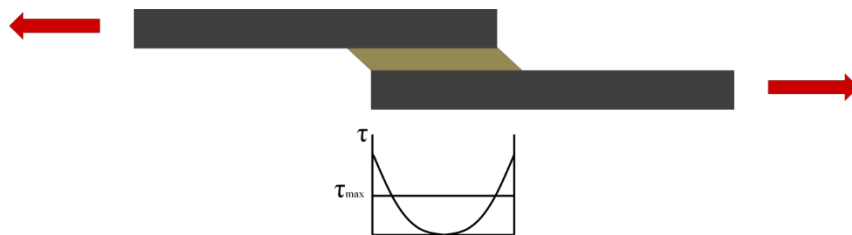
$$\tau(x) = \tau_m \frac{wL}{2} \left[ \frac{\cosh(wx)}{\sinh(\frac{wL}{2})} + \frac{E_1 e_1 - E_2 e_2}{E_1 e_1 + E_2 e_2} \cdot \frac{\sinh(wx)}{\cosh(\frac{wL}{2})} \right] \quad (05)$$

Où  $\tau_m$  est la contrainte de cisaillement moyenne,  $E_1$  et  $E_2$  sont les modules de Young des substrats,  $e_1$  et  $e_2$ , leurs épaisseurs, et :

$$w = \sqrt{\frac{G}{e} \left( \frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2} \right)} \quad (06)$$

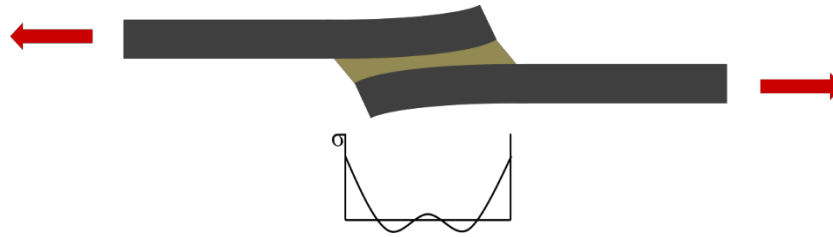
Avec  $e$ , l'épaisseur de joint, et  $G$ , le module de cisaillement de l'adhésif. Dans le cas où les substrats sont de même nature,  $E_1 = E_2$ , l'équation (05) peut être simplifiée en prenant  $e_1 = e_2$  (Équation 06). Dans ces conditions, le système est dit équilibré et la contrainte de cisaillement maximale  $\tau_{max}$  est donnée par :

$$\tau_{max} = \tau_m \frac{wL}{2} \coth\left(\frac{wL}{2}\right) \quad (07)$$



**Figure.19. Répartition des contraintes de cisaillement dans le joint [1].**

Cependant, pour un joint à simple recouvrement, l'application de la force est excentrée. Il existe donc un moment de flexion  $M_f$  qui provoque la rotation du joint à l'origine de l'apparition de contraintes de pelage normales au joint qui viennent s'additionner aux contraintes de cisaillement. Goland et Reissner [19] (Figure.20) ont introduit la contrainte de pelage à l'analyse de Volkersen.



**Figure.20 : Distribution de contraintes selon Goland et Reissner [19]**

### **I.11. Conclusion**

Ce chapitre explore l'assemblage par collage, en synthétisant les avantages et inconvénients de cette technique par rapport au soudage, rivetage et boulonnage, d'après une étude bibliographique. Son application aéronautique, notamment pour réduire la concentration de contraintes dans les structures, est également abordée.

Un joint adhésif simple recouvrement est constitué de deux pièces (composite ou aluminium) assemblées par un adhésif. L'étude porte sur les assemblages composite/aluminium et composite/composite.

## **CHAPITRE 2**

# **G**ENERALITE SUR DES MATERIAUX D'ASSEMBLAGE PAR COLLAGE

### 2.1. Introduction

Les matériaux collés peuvent généralement supporter des charges plus importantes que les polymères ou les composites fixés mécaniquement. Avec les joints adhésifs, la charge est généralement répartie plus uniformément sur de grandes surfaces, ce qui permet de réduire les contraintes. La résistance du matériau adhésif détermine généralement la contrainte d'adhérence maximale, et la structure chimique et la température de l'adhésif déterminent en fin de compte le comportement mécanique du joint pendant sa durée de vie.

Le collage des composites a fait l'objet d'études approfondies, et plusieurs problèmes clés ont été relevés [20]. Il s'agit notamment de la sélection de l'adhésif, de la préparation de la surface des adhérents composites, du mouillage, des mécanismes de liaison, de la durabilité à long terme à chaud et humide et du collage de matériaux différents. Avec les composites, les liaisons adhésives ne sont utiles que pour fixer des surfaces, car les renforts ne sont pas « entrelacés » dans le processus [21]. En générale, Dans cette partie on va discuter privément sur les deux compose primales matériaux de collage (l'adhésif et l'adhérent.).

### 2.2. Matériaux d'assemblage par collage

#### 2.2.1. Adhésion

Ces dernières années, l'adhésion métal/métal a révolutionné la construction aéronautique grâce à l'avènement du collage et à la découverte des adhésifs structuraux comme type résine époxyde [22]. Pour cette raison nous avons choisis dans notre étude d'adhésifs structuraux

##### 2.2.1.1 Définition de l'adhésive

D'après la définition fournie par Adams et al. [23] un adhésif est une substance polymère qui est appliquée sur les surfaces des substrats afin de les assembler et d'empêcher la séparation. Un adhésif est une substance capable de maintenir les matériaux ensemble par une fixation de surface [24]. En tant que l'un des avantages les plus importants des joints collés, cette méthode offre la possibilité d'assembler divers matériaux. Néanmoins, le choix de l'adhésif doit être effectué en fonction des résultats expérimentaux standard/de routine.



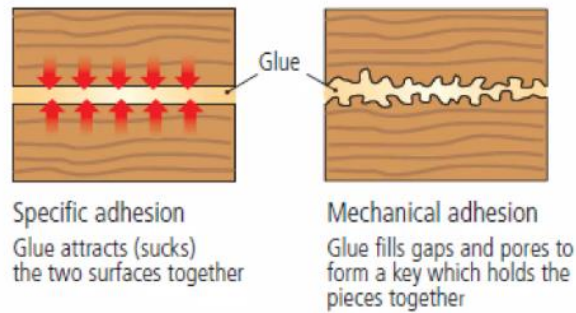


Figure.2.1. ; mécanisme de l'adhésive [25]

### 2.2.1.2. Différents types de l'adhésive

Il existe de nombreux types d'adhésifs différents, tous conçus pour des conditions et des applications spécifiques. Il y a donc de multiples facteurs à prendre en compte pour choisir le bon produit. Pour mieux s'y retrouver, les adhésifs peuvent être catégorisés de différentes manières, selon leur composition chimique, leur état (solide, liquide, etc.), leur classification ou leur capacité de charge. Dans cet article, nous aborderons les différentes catégories d'adhésifs et la manière d'utiliser chacun d'entre eux.

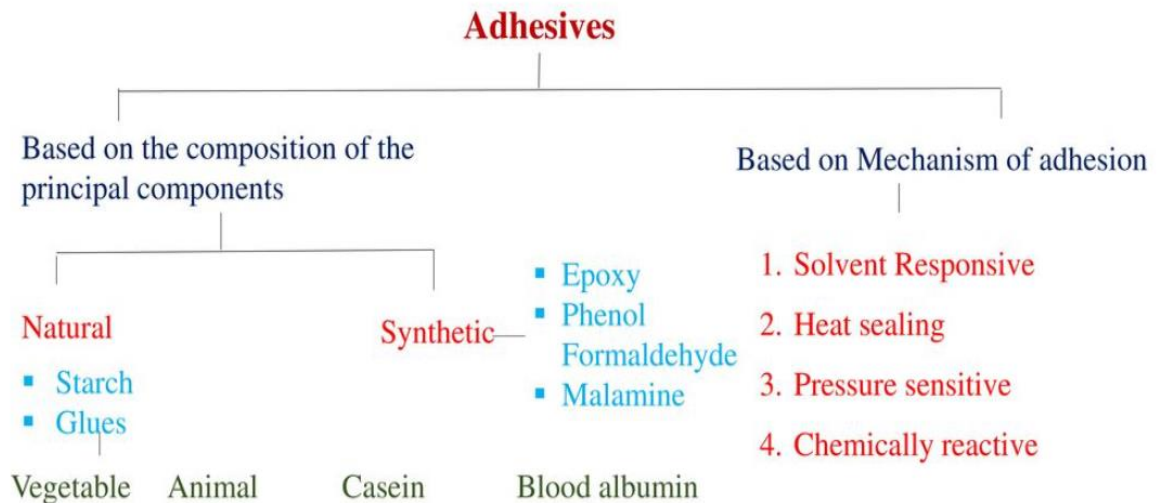


Figure.2.2: Classification des adhésives [26]

Les adhésifs peuvent être classés de différentes manières : suivant leur origine, leur famille chimique ou leur domaine d'application . Si l'on considère l'origine, le terme de « colle » est souvent employé pour des résines naturelles alors que celui « d'adhésif » est employé pour des résines synthétiques.

## Chapitre II : Généralité sur des matériaux d'assemblage par collage

Tableau 2.1. Adhésifs courants et leurs utilisations. [27]

TYPES D'ADHÉSIFS		
Type d'adhésif	Sources/Propriétés	Utilisations courantes
Colle animale	Obtenu à partir de sous-produits animaux tels que les os, le sang et les sabots	Liage d'abrasifs dans le papier de verre et autres matériaux de meulage
Caséine	Principales protéines du lait	Les étiquettes sur les bouteilles de bière qui ne se détachent pas dans l'eau glacée recyclable
Amidon	À partir de maïs et de maïs	Collage du carton ondulé
Caoutchouc naturel	Pas « assez collant » en soi, mais est utilisé comme un Additif dans d'autres adhésifs	Enveloppes autocollantes et autres adhésifs sensibles à la pression ; adhésifs qui adhèrent aux substrats au contact (comme les rubans)
Caoutchouc butyle/isobutylène	Il est élastomère, il s'étire	Additif pour adhésifs thermofusibles, produits d'étanchéité pour fenêtres et Adhésifs sensibles à la pression
Résines aminés	Adhésifs solubles dans l'eau	Collage de couches dans le contreplaqué et collage de particules dans panneau de particules
Polyuréthane	Un <u>adhésif flexible</u>	Collage des semelles sur le corps des chaussures ; Également utilisé dans l'emballage alimentaire
<u>Acétate de polyvinyle</u>	Colle « blanche » commune	Reliures et étiquettes de livres
Copolymère polyoléfine/ <u>éthylène</u>	Aucun solvant impliqué	Adhésifs thermofusibles
Acrylates ou adhésifs anaérobies	Durcissement lorsque l'air est éliminé	Adhésif utilisé pour maintenir les écrous serrés sur les boulons, tels que ceux à l'intérieur des guichets automatiques et machinerie lourde
Silicone	À la fois un adhésif et un scellant et le seul adhésif commun qui est à base de silicium plutôt que de carbone	Produits d'étanchéité pour baignoires et douches ; également de nombreuses applications automobiles, telles que l'huile Casseroles et joints de culasse

## Chapitre II : Généralité sur des matériaux d'assemblage par collage

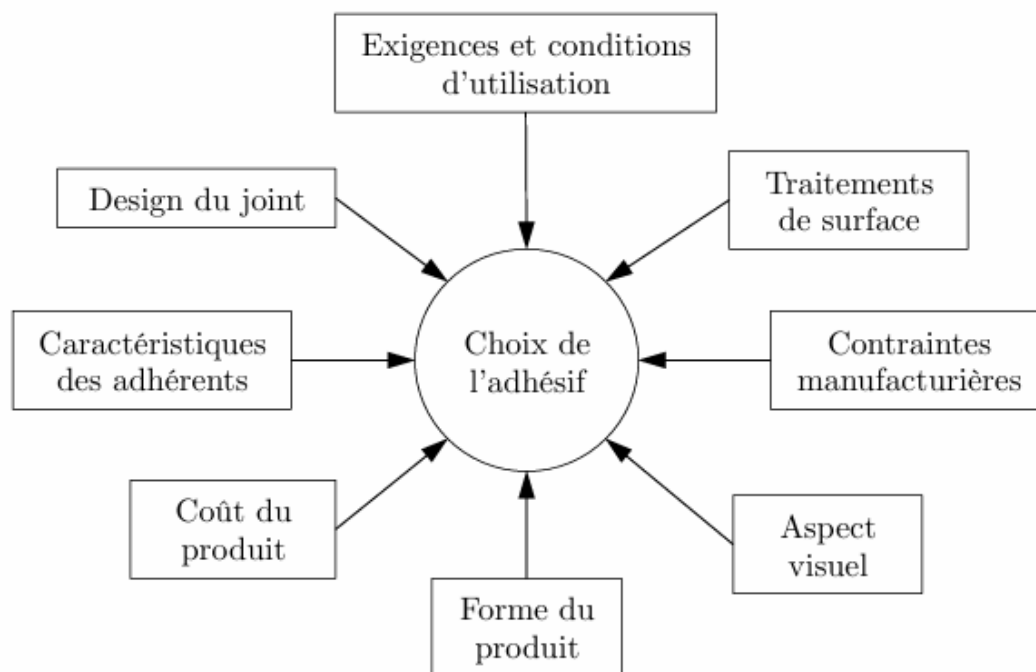
En comprenant les différents types d'adhésifs et leurs propriétés, vous pouvez choisir l'adhésif adapté à votre application spécifique. Bien qu'il n'existe pas d'adhésif universel pour les composites, les observations générales suivantes peuvent être utilisées pour éliminer les systèmes candidats improbables [27]

### 2.2.1.3. Choix type d'adhésive

Le type d'adhésif que vous choisirez dépendra des matériaux que vous collez, de la force de la liaison requise et de l'environnement dans lequel la liaison sera utilisée. Lors du choix d'un adhésif, il est important de prendre en compte les facteurs suivants (figure.2.3) :

- Le type de matériaux que vous collez
- La force de l'adhérence requise
- La conception du joint collé
- L'environnement dans lequel l'obligation sera utilisée

Les critères environnementaux déterminant le choix d'un adhésif structurel incluent la résistance à la chaleur (vieillessement à court et long terme), à l'humidité et aux chocs, ainsi que la dilatation thermique du substrat [28 ].



**Figure.2.3 : Facteurs influençant la sélection d'un adhésif destiné à une application structurale**

## Chapitre II : Généralité sur des matériaux d'assemblage par collage

Aujourd'hui, le grand choix d'adhésifs structuraux sont l'un des adhésifs les plus couramment utilisés. Un adhésif structural peut être décrit simplement comme une « colle à haute résistance » qui lie les composants d'une structure porteuse [24]. Les adhésifs structuraux sont largement utilisés dans les avions pour le collage de pièces métal sur métal, métal sur composite et composite sur composite [29]. En plus d'assembler des composants structuraux, des adhésifs sont utilisés pour coller les peaux et le noyau dans les composites sandwich. La figure .2.4 montre l'application de composites sandwich collés à l'aide d'un avion.



**Figure.2.4..Montre l'application de composites sandwich collés à l'aide d'un avion [24]**

Les avantages des adhésifs structuraux sont les suivants [29]

- fournir une répartition uniforme de la charge sur toute la surface de liaison pour minimiser les concentrations de contraintes ;
- la réduction du coût total de la main-d'œuvre ;
- fournir une étanchéité contre l'intrusion d'humidité ;
- collage de matériaux différents et légers;
- permettant des designs uniques et une apparence améliorée grâce à des lignes de liaison cachées et invisibles.

Les adhésifs structuraux présentent de nombreux avantages potentiels par rapport aux techniques de fixation mécanique traditionnelles. De tels assemblages peuvent

également être assurés par divers substrats. De même, le collage peut être permanent, pour l'assemblage de pièces de carrosseries automobiles ou sur les cellules d'avions.

### 2.2.2. Substrat

Les termes « substrat » et « surface » peuvent tous deux désigner le matériau à fixer pour créer un assemblage, tel que le bois ou le fer. Techniquement, le substrat comprend toutes les propriétés du matériau : des propriétés du substrat comme la flexibilité ou l'atténuation des vibrations, ainsi que les propriétés de surface comme la résistance à l'abrasion ou la texture. Dans la plupart des cas, les termes « substrat » et « surface » sont interchangeables dans le cadre du collage et font référence à la partie spécifique sur laquelle vous êtes en train de coller, là où l'adhésif est en contact.

Lors de la conception d'un assemblage, les substrats sont choisis pour diverses raisons, notamment la performance, l'esthétique, le poids ou d'autres facteurs. La conception de la pièce tend également à dicter la géométrie du joint collé. Par conséquent, lors du choix d'un adhésif, il est important de comprendre comment la composition chimique de l'adhésif interagit avec la surface des substrats. La figure 2.5. montre les matériaux adhérents utilisés dans les applications marines [30].

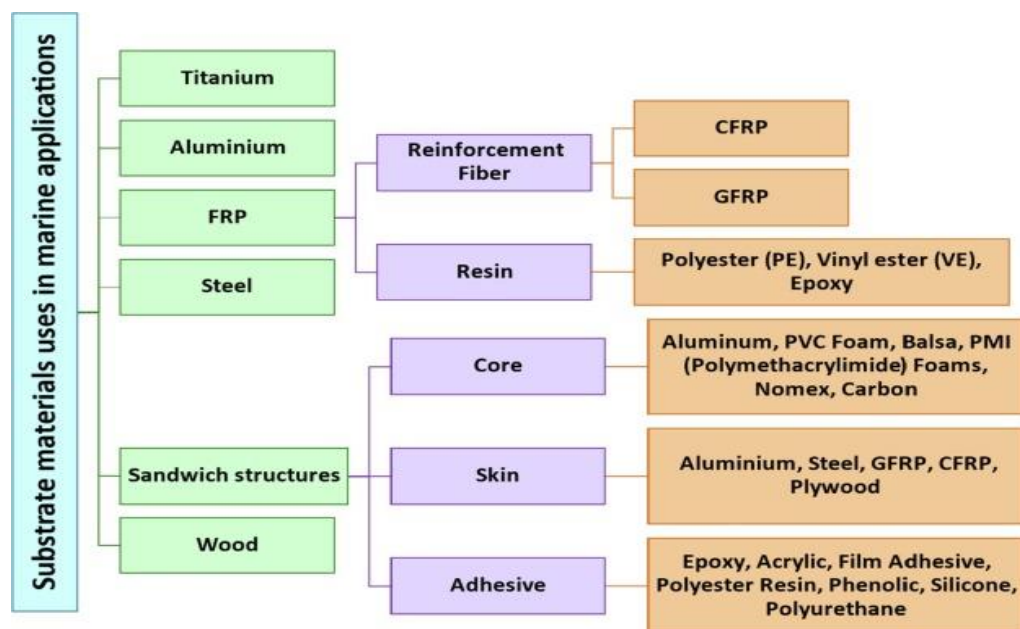
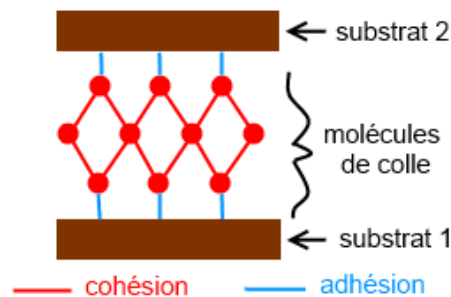


Figure.2.5.. Matériaux de substrat utilisés dans l'industrie maritime. [30]

### 2.2.3. Choix du substrat

Pour effectuer une mise en contact avec une surface, un adhésif doit avoir des propriétés appropriées. Cela inclut sa composition chimique et sa viscosité (celles-ci sont détaillées dans d'autres articles), mais la surface doit également posséder les propriétés appropriées. Les trois propriétés énumérées ci-dessous (énergie de surface, propreté et rugosité) sont les facteurs les plus importants pour établir un contact optimal (**Figure.2.6**).



**Figure.2.6 : Mécanisme d'un assemblage par collage [31]**

Pour former une liaison adhésive, l'adhésif doit être mis en contact étroit avec la surface de chaque substrat. Par conséquent, l'adhésif doit être choisi en fonction de l'énergie de surface et de la propreté des substrats. En outre, l'adhésif doit présenter une résistance à la rupture suffisante pour répondre aux besoins de l'application. Une fois que vous avez choisi les substrats de votre conception.

#### 2.2.3. 1. Alliage d'aluminium 2024-T3

L'élément aluminium a été découvert en 1825. C'est l'élément métallique le plus présent à la surface de la terre [32]. Cependant, ce métal (et ses alliages) arrive en seconde position lorsque l'on parle de l'utilisation des matériaux métalliques.

La métallurgie de l'aluminium et ses alliages prend de plus en plus de l'ampleur et reste encore un domaine de recherche et d'actualité pour les différentes possibilités qu'ils peuvent engendrer. L'aluminium et ses alliages sont largement utilisés dans l'industrie : aéronautique, construction navale, automobile et éventuellement dans la construction métallique à cause de leur propriétés mécaniques et physiques telle que, la faible densité, la très haute résistance à la corrosion, la bonne ductilité, la très bonne usinabilité, la bonne soudabilité et la très bonne conductibilité électrique et thermique.

### 2.2.3. 2. Matériaux composites

Les plaques composites sont généralement minces et faite de n'importe quel matériau disponible en couches. Ils peuvent être en bois, en métal ou en matériaux composites. Le choix de la nature et de l'ordre des couches dépendra de l'utilisation du composite. L'utilisation des matériaux composites est en expansion dans plusieurs industries et particulièrement dans le domaine de l'aéronautique où on leur trouve de nombreuses applications mettant à profil leurs propriétés. En effet, les matériaux composites permettent d'obtenir de bonnes propriétés mécaniques avec un poids réduit et présentent une bonne résistance à la fatigue et à la corrosion.

#### a) Définition Un matériau composite

Un matériau composite est un assemblage constitué au minimum de deux matériaux qui ne fusionnent pas mais qui ont une forte capacité d'adhésion. Ils sont assemblés en une structure particulière qui lui donne ses caractéristiques (Figure 2.7) [33]. Plusieurs structures de matériaux composites sont de plus en plus adaptées, dans des domaines très variés, tels que l'aéronautique pour améliorer la tenue en service et par conséquent la durée de vie.

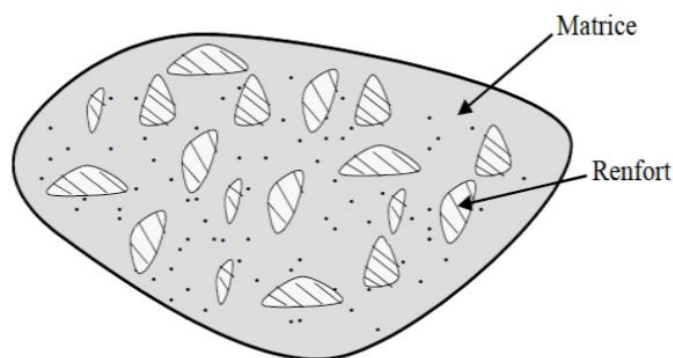


Figure.2.7. Composition des matériaux composites en général [33]

#### b) Classification des composites selon la forme de renforts

En fonction du type de résistance et du poids requis, les composites sont classés en différentes catégories telles que composites renforcés par des particules, renforcés par des fibres et les composites structurels, voir figure 2.8.

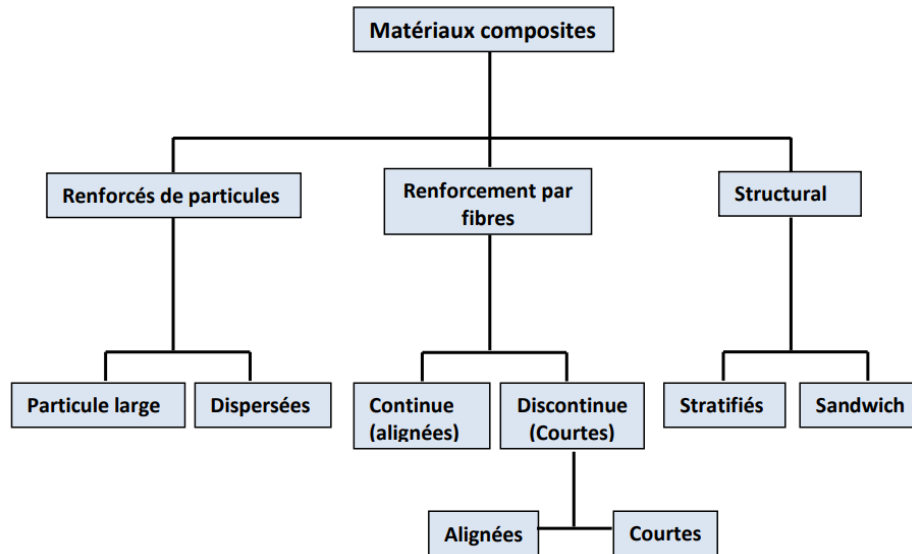


Figure.2.8. Classification pour divers types de composites [34]

Dans le cas de notre étude, on s'est limité aux composites renforcées par des fibres continues. La charge mécanique appliquée sur ces matériaux est transmise et distribuée au renfort via la phase de matrice. La maîtrise de la forme et de la répartition des armatures est considérée comme des paramètres importants pour atteindre un niveau de résistance et une rigidité élevée [34].

### c) Classification des composites selon la nature de renforts

Le renfort apporte au matériau composite ses propriétés mécaniques et assure sa bonne tenue. Il se distingue d'abord par la nature de ses fibres, puis par la manière dont celles-ci sont agencées entre elles. Il existe sur le marché un grand nombre de fibres, choisies en fonction de l'application de la structure réalisée et du coût de revient recherché. Parmi les différentes natures de fibres possibles, présentées dans la Figure 2.9, nous pouvons citer les plus couramment utilisées : les fibres de verre, de carbone, les fibres aramides ou les fibres végétales [35]. Les fibres de verre sont les plus répandues (95% des renforts), car elles offrent un excellent rapport performance/prix, permettant une large gamme d'application aux pièces composites ainsi créées, et sont particulièrement adaptées aux pièces produites en grande série. Les fibres de carbone sont également plébiscitées car elles présentent de plus fortes propriétés mécaniques : elles sont ainsi privilégiées dans les domaines de l'aéronautique, de la construction industrielle ou des sports et loisirs. Notons que c'est la fibre qui confère au matériau composite sa résistance à la rupture et sa rigidité.

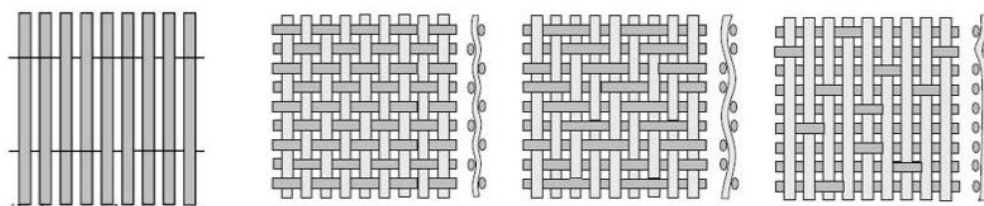




(a) Fibre de verre (b) Fibre de carbone (c) Fibre d'aramide

**Figure.2.9. Renforts fibres [35].**

Tout comme la nature du matériau du renfort, sa géométrie est choisie en fonction de l'application visée. Dans les composites UD, les fibres sont alignées parallèlement entre elles et retenues dans leur position par des légères trames. Les stratifiés résultant possèdent donc une résistance mécanique plus importante dans la direction des fibres que dans les autres directions. Les tissus plans (2D) et multidirectionnels (3D) sont obtenus par entrecroisement de chaînes et trames (Figure 2.10(b)-(d)) conduisant à une manipulation plus aisée et à un risque d'usure plus faible. Pour certaines applications, des renforts de différentes natures peuvent être superposés ou tissés formant ainsi des renforts hybrides.

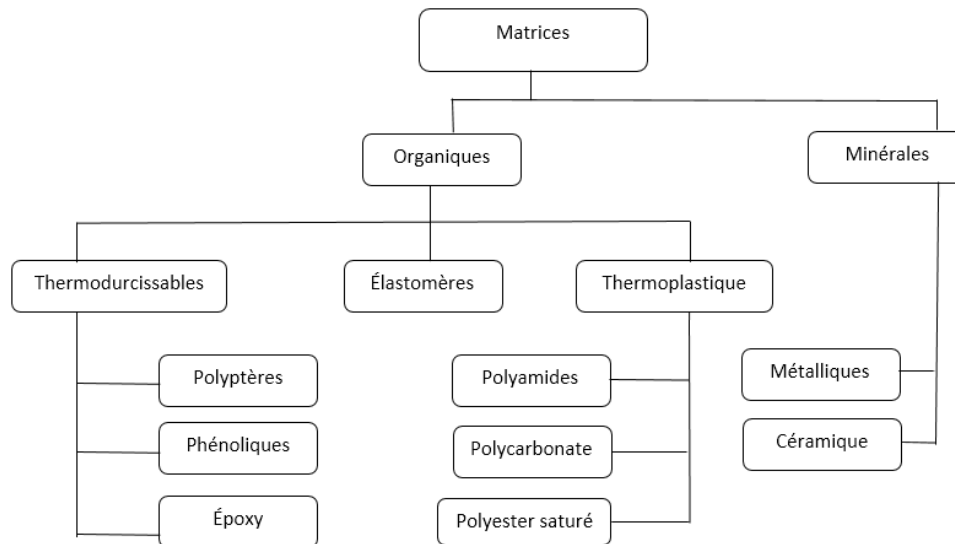


(a) Armure unidirectionnel (b) Armure taffetas (c) Armure sergé (d) Armure satin

**Figure .2.10. Différentes formes de renforts continus [36].**

### d) Matrices.

Les matrices ont pour principal but d'assurer la cohésion des renforts au sein de la structure et de faciliter la transmission des efforts mécaniques aux renforts. Elles permettent de protéger le renfort vis-à-vis des conditions environnementales et de donner la forme souhaitée au produit réalisé. Parmi les matrices actuellement utilisées, les matrices organiques sont les plus répandues à l'échelle industrielle. Les autres matrices, telles que les matrices céramiques et les matrices métalliques, sont utilisées pour des applications spécifiques quand les contraintes de température ou d'hygrométrie sont sévères (figure.2.11).



**Figure.2.11. Diffèrent familles de matrice [37].**

La fonction de la matrice consiste à assurer la liaison entre les fibres, à répartir les contraintes subies, à conférer une résistance chimique à la structure, et à modeler le produit selon les spécifications souhaitées.

- **La structure des thermoplastiques :** La configuration des thermoplastiques se manifeste à travers des chaînes linéaires. Leur mise en forme nécessite un chauffage, provoquant ainsi la flexion des chaînes, et leur fixation s'opère par refroidissement, bloquant ainsi les chaînes. Ce processus est réversible.
- **La structure des thermodurcissables :** La structure des thermodurcissables adopte une forme de réseau tridimensionnel qui subit une polymérisation croisée (double liaison) pour se solidifier de manière permanente lors d'une exposition à la chaleur [38].
- **La résine époxy :** Les résines époxy et les polyesters insaturés sont largement utilisés en tant que résines thermodurcissables. Une vaste gamme de propriétés physiques et mécaniques peut être obtenue en exploitant ces résines. Les caractéristiques mécaniques de la matrice dépendent de sa composition chimique, où le produit chimique de la matrice influence ces propriétés. Parallèlement, le durcissement chimique joue un rôle crucial dans la densité et la longueur du réseau formé.

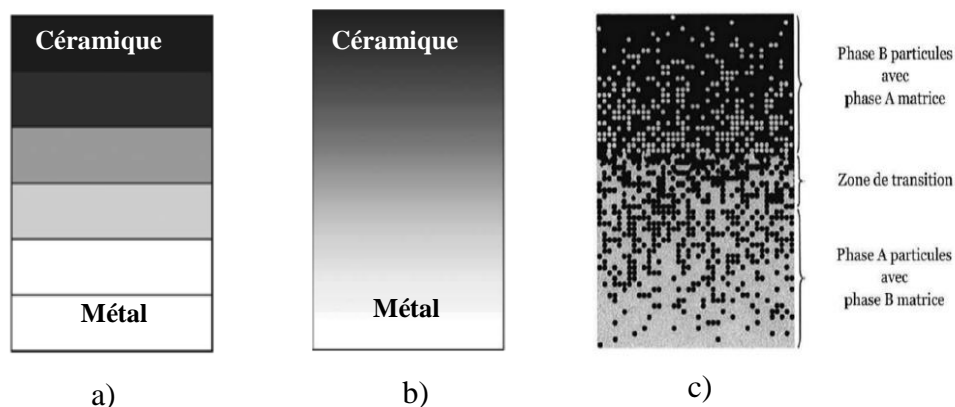
### 2.2.3.3. Matériaux à gradient de propriétés (FGM)

Récemment, une nouvelle classe de matériaux composites, connus sous le nom de matériaux à gradation fonctionnelle (FGM) a attiré une attention considérable des chercheurs. On obtient un FGM typique avec un fort effet de couplage flexion-étirement,

c'est un composite non homogène composé de différentes phases de constituants de matériaux (généralement de la céramique et du métal). Au sein des FGM, les différentes phases de la microstructure ont des fonctions différentes et ces derniers atteignent le statut multi structural à partir de la gradation de leurs propriétés. En faisant varier progressivement la fraction volumique des matériaux constitutifs, leurs propriétés changent progressivement d'une surface à l'autre, en éliminant ainsi les problèmes d'interface et atténuant les concentrations de contraintes thermiques.

### a) Types de FGM

Les matériaux à gradient fonctionnel peuvent être classés en plusieurs critères. Ils peuvent être classés en fonction de leurs utilisations, de leurs types de gradation, de leur composition et de leur combinaison de matériaux.



**Figure .2.12 : Deux types de structures graduées. a) structure par étapes (FGM mince), b) structure continue (FGM en masse) c) FGM avec les fractions de volume des phases constitutives graduées. [39].**

Souvent, les FGMs structurelles sont divisés en deux types, à savoir la structure continue (FGM en masse) représentée sur la figure 2.10. (b) et la structure par étapes (FGM mince) illustrée sur la figure.2.10.(a).

### b) Domaines d'application des FGMs

Il existe une large gamme d'applications pour FGM et on s'attend à ce qu'elle augmente à mesure que le coût du traitement des matériaux et des processus de fabrication est réduit en améliorant ces processus [65] [40]. Dans cette partie, diverses applications de FGM comme illustré dans figure.2.13 ont été discutées qui pourraient être très utiles dans les développements. On trouve également des applications dans le domaine de l'électronique, les composants de moteur d'automobile, de la production d'outillage. Cette liste n'est

évidemment pas exhaustive et on imagine qu'au fur et à mesure des avancées scientifiques l'appropriation de ce type de structure par les concepteurs permettront encore de l'élargir.

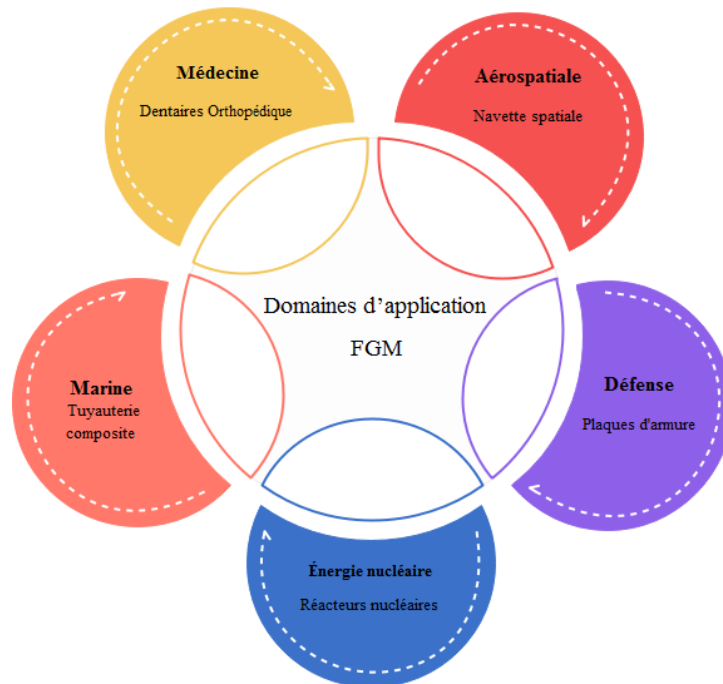


Figure.2.13: Les différents domaines d'application des FGMs. [41]

### c) Conception du FGM

La distribution des propriétés matérielles suivant une ou plusieurs directions, a été conditionnée automatiquement selon la forme de la structure. La complexité des structures réalisées, que ce soit en terme géométrie ou de distribution des matériaux, n'est pas souvent très fiable. La figure 2.14 montre un diagramme qui classe comment le gradient des pièces FGM peut être attribuée.

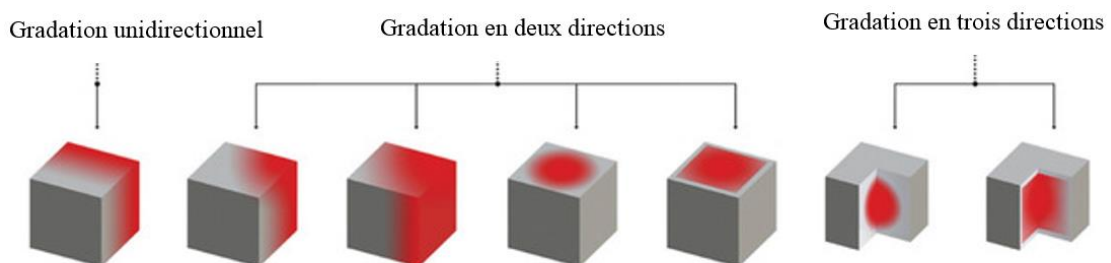


Figure.2.14 : Types de classification des gradients [42] .

## Chapitre II : Généralité sur des matériaux d'assemblage par collage

Le cas de la variation continue des propriétés suivant l'épaisseur d'une plaque FGM montrée sur la figure. 2.15 , la face supérieure 100% céramique est exposée à une haute température alors que la face inférieure 100% métal est exposée à une basse température, avec une transition graduelle entre les deux (figure 2.15 ).

La gradation améliorerait aussi la ténacité de la face céramique et empêcherait également le décollement céramique-métal. L'assemblage de la céramique aux métaux de manière unique lui donne :

- Haute résistance à l'abrasion (face céramique)
- Haute résistance aux chocs thermique ou mécanique (face métal).
- Très bonne ténacité.

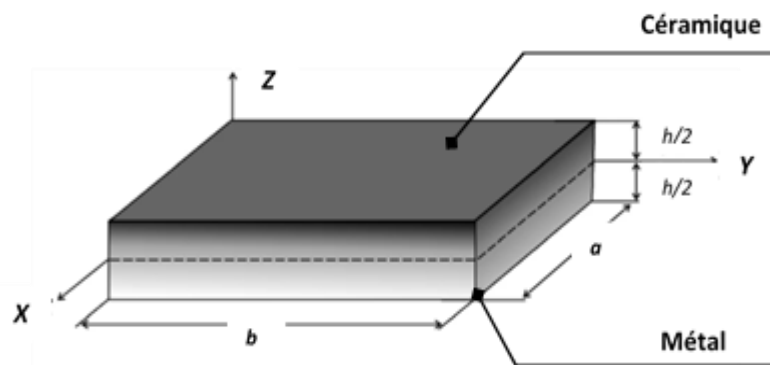


Figure 2.15 : Une plaque FGM en masse.

### 2.4. Conclusion :

Ce chapitre a pour objectif de présenter la nature de différents compositions de l'assemblage par collage. Ces deux matériaux sont la base de l'assemblage. Un bon choix de la nature de ces deux matériaux procure un bon assemblage de la structure en terme résistance et durabilité. Vu le progrès dans l'élaboration des matériaux, le matériau FGM, composite vu que ses propriétés mécaniques peuvent être adapté selon la concentration de contraintes dans la zone d'assemblage.

## **Chapitre 3**

# **A**NALYSER DIFFERENTES CONCEPTIONS ET MATERIAUX D'UN ASSEMBLAGE COLLE.

### 3.1. Introduction

Le modèle numérique développé sur ABAQUS pour l'analyse de la distribution des contraintes dans les assemblages collé simple recouvrement en tenant compte des propriétés mécaniques des substrats est présenté ci-dessous. Notons que, le type des éléments et de maillage, les propriétés de contact, les matériaux et les conditions aux limites sont identiques.

### 3.2. Choix des matériaux

Les modèles numériques d'assemblages collés sont simulées avec des différents type des matériaux pour obtenir les résultats les plus cohérents possibles d'un notre analyse. Il est possible d'avoir un avengement:

- Métal Al 2024-T3 –Métal Al 2024-T3
- CFRP/CFRP
- FGM/METAL Al 2024 T3.
- FGM/FGM

Dans les assemblages de type composite/ composite, la nature de la fibre est de type carbone ou verre cependant, la matrice est en époxyde et le FGM type (AL/SiC). Pour le collage du composite sur la zone endommagée, notre choix s'est basé sur l'adhésif époxyde bi-composants de type ADEKIT-A-140. C'est un adhésif époxyde de haute résistance pour des applications structurales. Les propriétés mécaniques de l'adhésif ADIKIT A140 sont présentées dans le tableau 3.1.

**Tableau.3.1 : les propriétés mécaniques de l'adhésif ADIKIT A140 [43].**

Matériaux	$E$ (MPa)	$\nu$	$\tau_{II}, \tau_{III}$	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_m$	A %
Adekit A-140	2692	0.33	24.1	16	31.7	1.1

### 3.3. Modèle Géométrique de l'assemblage collé

#### 3.3.1. Description modèle d'assemblage colle (AL2024 T3/ AL2024 T3)

On considère un assemblage à simple joint constitué de deux plaques en aluminium AL2024 T3, avec les dimensions suivantes, longueur =125 mm, Largeur  $W=25mm$ , Longueur de recouvrement 25mm, une épaisseur  $H=2$  mm ; collé par un adhésif type ADEKIT A-140 avec les dimensions suivantes : longueur  $Lc=25mm$ , largeur  $W=25mm$  et

une épaisseur  $t=0.2mm$ . Les dimensions des deux plaques et de la couche adhésive sont montrées dans la figure.3.1.. Pour tous les modèles, on considère un encastrement d'une plaque sur l'une de ces extrémités et on applique une force  $\sigma_{\infty} = 15$  ,  $\sigma_{\infty} = 35$  et  $\sigma_{\infty} = 55 MPa$  sur l'extrémité de l'autre plaque. Ce type d'assemblage requière de générer des contacts entre les différents éléments. Quatre surfaces de contact peuvent être définies :

- Le plan de contacts entre la plaque et la colle,
- Le plan de contacts entre la colle et le métal,

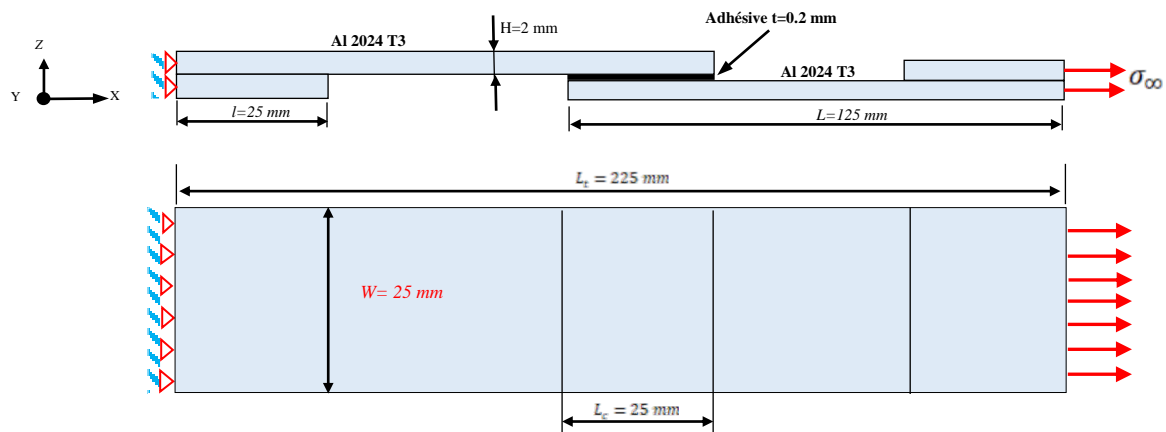


Figure.3.1. Présentation des dimensions du modèle d'assemblage collé.

Pour l'analyse statique de notre modèle, on n'a considéré que les propriétés d'Aluminium présentées dans le tableau.3.2.

Tableau.3.2 : les propriétés mécaniques de l'Aluminium 2024-T3 [43]

Matériaux	$E$ (MPa)	$\nu$	$\sigma_Y$ (MPa)	$\sigma_m$	A %
Aluminium 2024 T3	73000	0.33	230	496.1	1.1

### 3.3.2. Description modèle d'assemblage colle (Composite -Composite)

Avant de choisir les dimensions pour les modèles, il faut introduire les propriétés mécaniques des matériaux utilisés pour les adhérents et l'adhésif. Les propriétés concernent les modules d'Young dans les directions principales du composite global ou de chaque couches individuelles (*dépendant de l'approche de modélisation*), leurs coefficients de Poisson et les modules de cisaillement dans les trois directions. Pour les composites, il faut prévoir des propriétés différentes dans les trois directions (longitudinale, transversale et hors plan du laminé). Il y a deux approches possibles. La



première consiste à utiliser les orientations de chacun des plis qui constitueront l'adhérent. La deuxième consiste à utiliser la théorie des laminés pour trouver les propriétés globales (propriétés d'ensemble) de l'adhérent. La première méthode permet de savoir ce qui se passe dans chacun des plis ce qui proche de la réalité (ex : contraintes, déformations, séquence de rupture des plis, contraintes hors plan à l'intérieur du laminé). Cependant, si on s'intéresse uniquement aux contraintes dans l'adhésif, la deuxième méthode est envisageable. La première méthode est utilisée pour les modèles éléments finis.

Le composite utilisé pour l'assemblage est un stratifié carbone-époxyde, composé de fibres de carbone (**CFRP**) et d'une résine époxydique. Ou l'épaisseur de chaque pli est de 0.125 mm dont l'empilement est le suivant  $[0]_{16}$  d'une épaisseur totale de 2mm. La fibre de carbone utilisée ici est la fibre carbone HR, appartenant au groupe des fibres à hautes résistances. Les propriétés de ces deux constituants sont données dans le tableau.3.3.

**Tableau.3. 3 : Propriétés mécaniques de la fibre et la matrice [44].**

Caractéristique mécanique du fibre en carbone CFRP (MPa)								
E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23
235000	12900	12900	0.27	0.27	0.27	8050	8050	8050
Caractéristique mécanique de la matrice (GPa)								
E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23
3700	-	-	0.33	-	-	1380	-	-

Les dimensions et la géométrie de l'assemblage collé de deux plaques composites sont présentées dans la figure.3.2. Toutes les dimensions, les conditions aux limites et type de l'adhésif ADEKIT A-140 sont les mêmes que pour le cas de l'assemblage de plaques métalliques.



**Figure.3.2. Présentation de l'assemblage collé composite/composite.**

### 3.3.3. Description modèle d'assemblage colle (METAL/FGM)

Notre choix du FGM dans cette partie a pour but d'améliorer la répartition des contraintes et augmente la résistance l'assemblage qui peut être utilisé dans de nombreuses applications, parmi lesquelles nous citons en priorité l'Aéronautique et l'Aérospatiale. Les propriétés mécaniques de FGM sont illustrées dans le tableau.5.

**Taleau.3.5 : Propriété matérielle de FGM [45].**

Propriété	Métal AL	Céramique SiC
Module de Young E	67000 MPa	302000 MPa
Coefficient de Poisson $\nu$	0.33	0.17
Limite élastique $\sigma_Y$	95.1 MPa	-
Contrainte maximale	160	1400
Énergie de fracture $G_{Ic}$	6.17 KJ/m <sup>2</sup>	0.065 KJ/m <sup>2</sup>
Module d'écrouissage H	1000 MPa	-
Rapport de transfert contrainte-déformation "q"	4800 MPa*	

Les matériaux céramiques sont définis comme matériel fragile avec modules élastiques plus hauts et résistance supérieurs à ceux du métal qui ont des propriétés généralement ductiles. Donc, les particules de céramique dans les FGM sont supposées avoir une élasticité linéaire lors de la déformation.

La plupart des articles de la littérature sur les FGMs utilisent la règle simple du mélange pour obtenir les propriétés matérielles efficaces. En ce qui concerne les fonctions de distribution de fraction volumique de la plaque, donc les propriétés matérielles équivalentes des FGMs pourraient être déterminées en fonctions de la variation de loi de puissance (P-FGM) suivant l'épaisseur de la plaque [41] :

$$V(z) = \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^\beta \quad (11)$$

$$V_m(z) = 1 - V_c(z) \quad (12)$$

Où  $\beta$  : exposant de la fraction volumique non négatif,  $h$  est l'épaisseur de la plaque. Une fois la fraction volumique  $V(z)$  a été définie, l'équation de la loi des mélanges écrit [46]:

$$P(z) = (P_m - P_c) \cdot V_m(z) + P_c \quad (13)$$

$P(z)$  : Représente les propriétés matérielle effective de FGM (SDV) est représentée sur la figure.4-6 et  $V_m(z)$  est la fraction volumique du métal dans les plaques de FGM, Ou les indices c et m représentent respectivement les phases céramique et métallique.

Le modèle de TTO [47] est une méthode d'homogénéisation d'alliage métallique sont utilisés pour évaluer localement des paramètres élastoplastiques efficaces du composé de FGM-AL/SiC. Dans le modèle TTO, un paramètre supplémentaire  $q$  qui représente le rapport entre la contrainte et le transfert de déformation, notez que :

$$q = [(\sigma_c - \sigma_m)/(\varepsilon_c - \varepsilon_m)], \quad 0 < q < \infty \quad (14)$$

Dans le modèle de TTO, le mélange des matériaux est traité comme élastoplastique avec le durcissement linéaire isotrope, pour lequel le module d'Young effectif  $E(z)$ , limite élastique  $\sigma_{Y_0}(z)$  et module tangent  $H(z)$  sont définis comme suit :

$$E(z) = [(q + E_c/q + E_m) \cdot E_m \cdot V_m(z) + E_c \cdot (1 - V_m)] / [(q + E_c/q + E_m) \cdot V_m(z) + (1 - V_m(z))] \quad (15)$$

$$\sigma_y(z) = \sigma_m \cdot [(q + E_c/q + E_m)(E_c/E_m) \cdot (1 - V_m(z)) + V_m(z)] \quad (16)$$

$$H(z) = [(q + E_c/q + H_m) \cdot H_m \cdot V_m(z) + E_c \cdot (1 - V_m)] / [(q + E_c/q + H_m) \cdot V_m(z) + (1 - V_m(z))] \quad (17)$$

Pour déterminer les propriétés effective de FGM avec modèle TTO dans code élément fins ABAQUS, un sous-programme USDFLD est mis en application dans ABAQUS pour définir les propriétés matérielles de la FGM selon les coordonnées des points d'intégration dans un modèle élément finis. Dans ce travail, Nous utilisons des points d'intégration disposés à travers la direction d'épaisseur de la plaque FGM (céramique/métal). La fonction de fraction volumique déterminer avec une méthode élément finis plus proche l'expérimental, cette méthode pour but aussi d'améliorer les performances de l'élément en termes de continuité la distribution les propriétés matérielle et la continuité de contrainte aux interfaces pour but calculer la contrainte résultante. On a proposé une méthode de surface est obtenue en subdivisant l'intervalle  $[-\frac{H}{2}, \frac{H}{2}]$  de la plaque en  $m$  : nombre de surface :

$$z_i = -\frac{H}{2} + (i - 1)h \quad (18)$$

Ou  $z_i$  : cordonné da la surface par apport ou référence global,  $i = 1, \dots, m$  : position de la surface dans la plaque FGM,  $h = \frac{H}{n}$  :distance entre deux surface successivement et  $m = n + 1$  nombre des surface de la plaque et  $n$  nombre des couche. Pour déterminer l'équation.15, on suppose que la surface situé exactement sur le point d'intégration [41] .

$$E_{USDFLD}(z) = \frac{\left[ (q + E_1/q + E_m) \cdot E_m \left( \frac{2z_i + h}{2h} \right)^n + E_c \cdot \left( 1 - \left( \frac{2z_i + h}{2h} \right)^n \right) \right]}{\left[ (q + E_1/q + E_m) \cdot \left( \frac{2z_i + h}{2h} \right)^n + \left( 1 - \left( \frac{2z_i + h}{2h} \right)^n \right) \right]} \quad (18)$$

Où  $E_{USDFLD}(z)$  est la module d'Young effectif du FGM de la couche  $k$  ( $k=1, 2, 3, \dots, n$ ). Notez que  $E(z_1)$  et  $E(z_m)$  sont les modules d'Young des faces supérieure et inférieure de l'intervalle  $H$ , respectivement. La gradation dans le modèle élément finis se fait par couche suivant l'épaisseur de la plaque avec modèle TTO donnée par les formules suivantes (fig.3.3) :

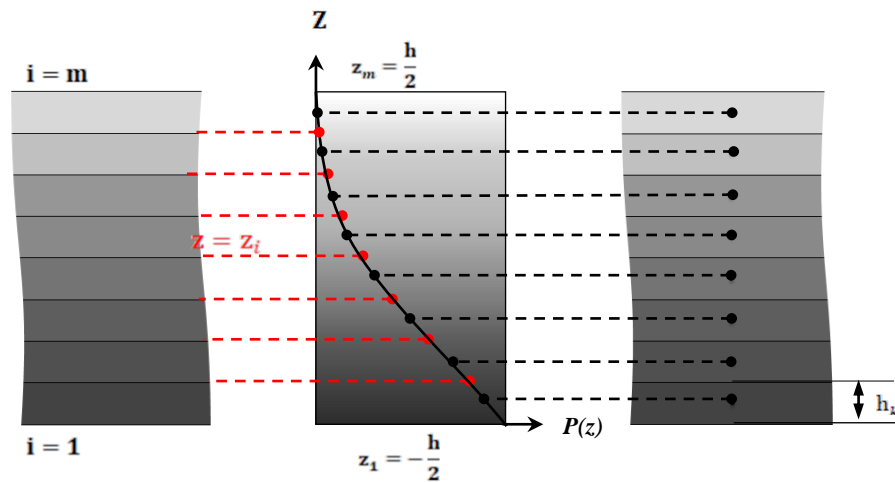


Fig.3.3. Reference geometry of the surface FGM [45] .

Les figures (3.4-3.7) sont présenté la variation de module d'Young effectif du FGM en fonction de l'épaisseur en tant que fonctions du champ variables (SDV) avec un exposant de la fraction volumique  $n=1$ .



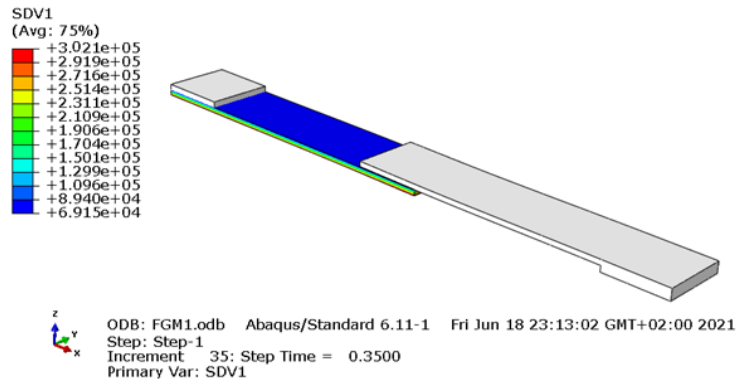


Figure.3.4. Assemblage collé FGM-1 (FGM/ Al 2024 T3).

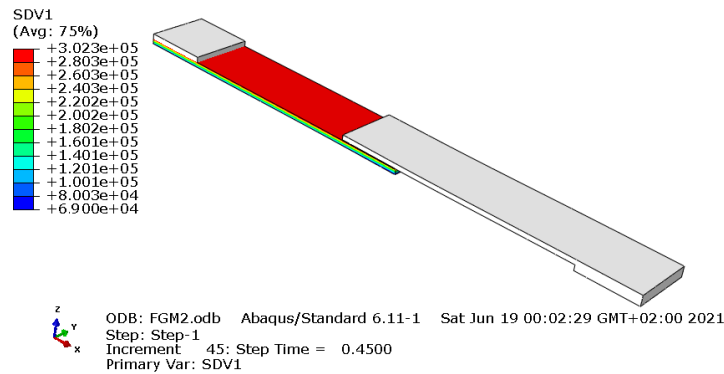
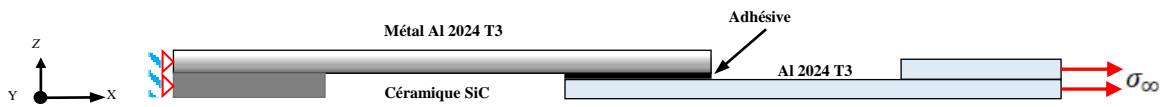
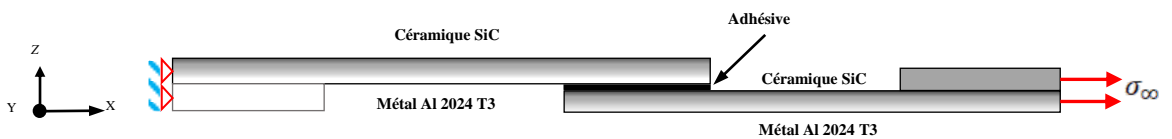


Figure.3.5. Assemblage collé FGM-2 (FGM/ Al 2024 T3)

Dans la première configuration de l'assemblage le métal AL2024 T3/ FGM est supposé encastrée, la face métal est en contact avec l'adhésive (figure.3.4). Cependant pour la deuxième configuration on a inversé les surfaces de sorte que la face céramique est en contact avec le joint adhésif (figure.3.5)

Dans la configuration de la figure.3.6 on a supposé les deux plaques en FGM et le contact suivant l'adhésive se fera d'une part la face métal de la plaque 1 et la face céramique de la plaque 2.



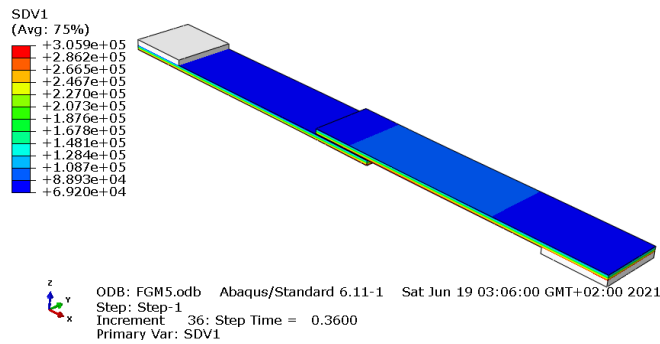


Figure.3.6. Assemblage collé FGM-3 (FGM/ FGM)

La dernière configuration assure un contact à travers l'adhésive coté céramique de la Plaque 1 avec cote céramique de la face de la plaque 2 (figure.3.7).

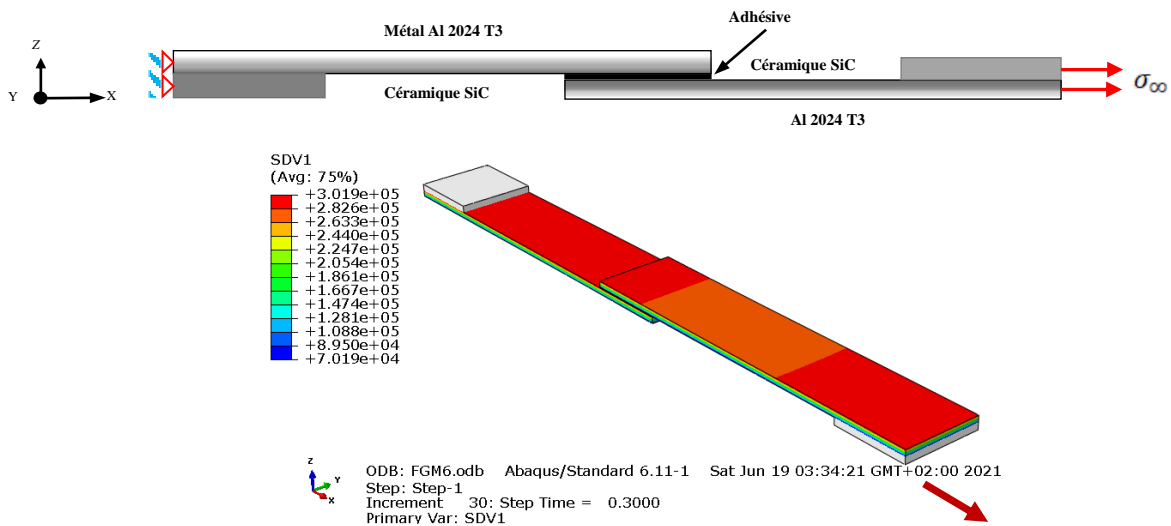


Figure.3.7. Assemblage collé FGM-4 (FGM/ FGM)

### 3.4. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (M.E.F) est communément utilisée aujourd'hui pour l'analyse des structures dans de nombreux secteurs de l'industrie : aérospatial, nucléaire, génie civil, construction navale, génie mécanique. Par ailleurs, il est intéressant de remarquer que la M.E.F appliquée au calcul des structures est une technique récente, à caractère pluridisciplinaire, car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base : La mécanique des structures, l'analyse numérique et l'informatique appliquée.

Pour notre travail de fin d'étude qui porte sur la modélisation par éléments finis des assemblages métallique, on va opter pour le code de calcul ABAQUS qui présente l'avantage d'être très approprié pour le traitement des conditions de contact et qui possède

une interface graphique très puissante permettant la modélisation des géométries à deux et à trois dimension très complexes tel que les assemblages métalliques.

Code de calcul ABAQUS permet donc une simulation par éléments finis des problèmes très variés en mécanique, il présente plusieurs choix pour discrétiser une géométrie à savoir des éléments : triangulaire à quatre nœuds et à dix nœuds, quadrilatéral à quatre nœuds et à huit nœuds, (Figure 3.7).

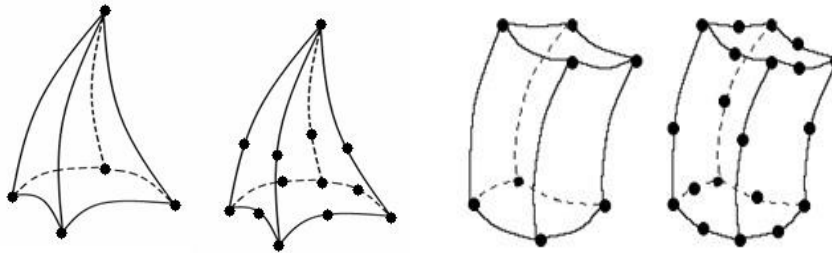


Figure 3.7: Représentations des éléments finis pour problèmes mécaniques on 3D.

#### 3.4.1. Choix de Maillage :

Plusieurs stratégies de maillage peuvent être utilisées. Il est possible de mailler toute la pièce de la même façon ou alors de raffiner le maillage dans les zones de fortes concentrations de contraintes. La figure.3.8 donne un aperçu d'un maillage 3D d'assemblages joint collé composé de deux plaques réalisé avec le logiciel ABAQUS, On a utilisé des éléments tridimensionnels-solides dans toutes les parties de l'assemblage avec différentes densités des éléments finis. L'adhésif et les zones extrêmes de la longueur de recouvrement doivent comporter un maillage très fin par rapport aux autres zones qui doivent comporter un maillage grossier pour éviter d'avoir un nombre volumineux de degrés de liberté inutilement.

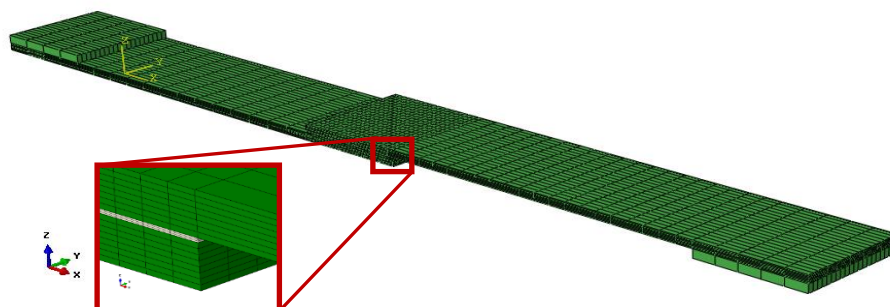


Figure. 3.8. Maillage du joint adhésif collé à simple recouvrement utilisée

### 3.4.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites à prendre en considération dépendent généralement du mode de fonctionnement de l'assemblage (par frottement ou bien par butée), de la géométrie de l'assemblage ainsi que le chargement appliqué. La figure.3.9 montre un exemple de conditions aux limites prise sur la modélisation de deux plaques par un boulon ordinaire (cas d'un assemblage par frottement).

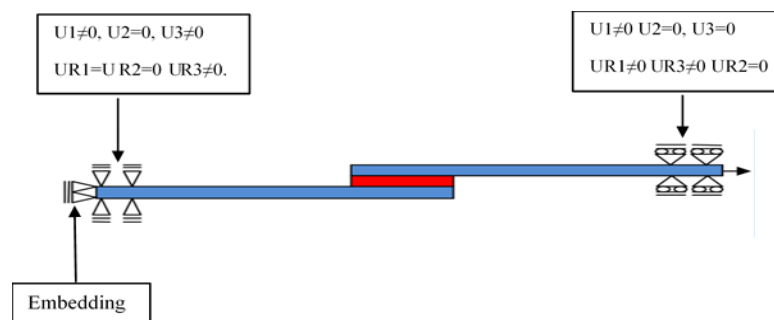


Fig. 3.9. Boundary conditions

Les conditions limites aux frontières de l'éprouvette sont reproduites de la manière suivante :

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

Ce type d'assemblage requière de générer des contacts entre les différents éléments.

### 3.5. Conclusion

Le modèle est construit avec le logiciel commercial d'éléments finis ABAQUS et son sous-programme USDFLD. Les adhérences sont modélisées à l'aide d'éléments de déformation plane quadrilatérale à quatre nœuds. Étant donné que le modèle de joint de recouvrement subira une déformation et une rotation importantes dans la région de chevauchement, la non-linéarité géométrique a été prise en compte au cours du processus de calcul. Avec le CZM et ses paramètres de cohésion discutés ci-dessus, la résistance et la défaillance interfaciale des joints adhésifs



## Chapitre 4

# **A**NALYSE NUMERIQUE D'UN ASSEMBLAGES PAR COLLAGE

### 4.1. Analyse des résultats

Les résultats d'assemblage collé par différents concepts et d'autres paramètres pour but d'évalue le comportement de l'assemblage collé

### 4.2 Validation des résultats numérique avec expérimentale

La figure 4.1 montre une validation des courbes force-déplacement, La technique USDFLD présente des résultats plus proches de l'expérimentale [48] en ce qui concerne la contrainte maximale. Un très bon accord des résultats est clairement montré par rapport au comportement global d'assemblage avec une très légère différence par rapport à la valeur maximale de force à la rupture utilisant le type d'élément C3D20R.

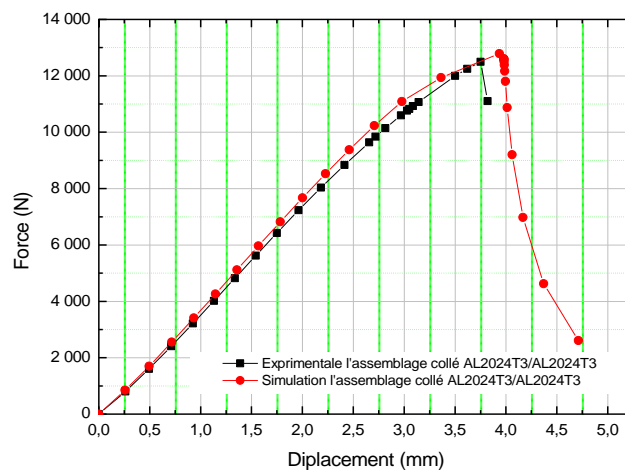


Figure.4.1 présenté la Comparaison de la courbe expérimentale Force-déplacement avec les méthodes numérique de l'assemblage collé AL2024-T3 / AL2024-T3

### 4.3. Niveau de Contraintes de Von mises dans l'assemblage collé

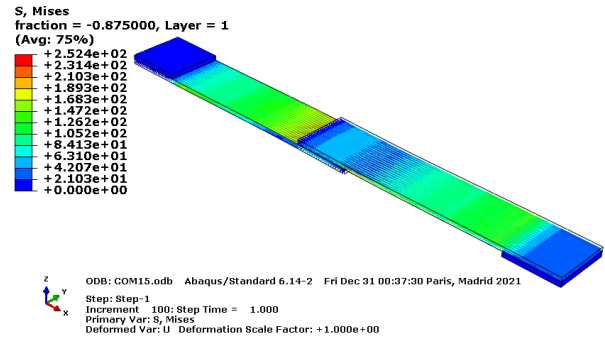
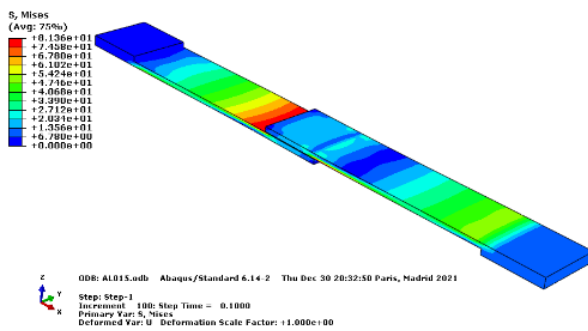
D'après les **Figures .4.2-4.4**, La plaque aux faibles propriétés mécaniques transmet moins de contraintes à l'adhésif, cependant, celles aux propriétés mécaniques élevées transmet la quasi-totalité de la charge appliquée à l'adhésif. Dans le cas d'assemblage de matériaux en FGM, La valeur maximale de la contrainte de Von Mises dépend de la face du métal qui est en contact avec la couche d'adhésive. La valeur maximale de la contrainte est notée pour le cas où la couche de céramique se trouve à l'extérieur en contact avec l'adhésif, la valeur la plus faible de la contrainte de Von Mises est pour le cas où l'aluminium est en contact avec l'adhésive FGM/Aluminium. Dans le matériau

FGM/metal, la valeur maximale dépend de la position de la couche d'aluminium. Le cas où l'aluminium est à l'extérieur de la plaque FGM et donc en contact avec l'adhésive présente la valeur la plus faible.

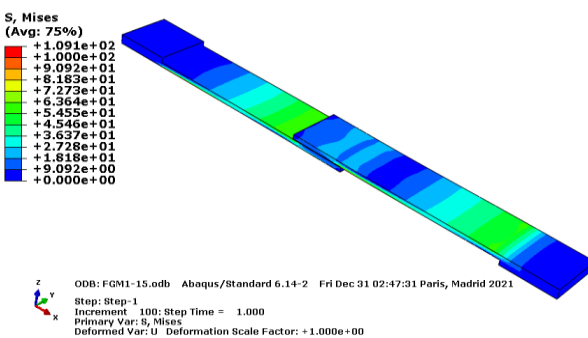
Pour  $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$

AL2024 T3/ AL2024 T3 ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )

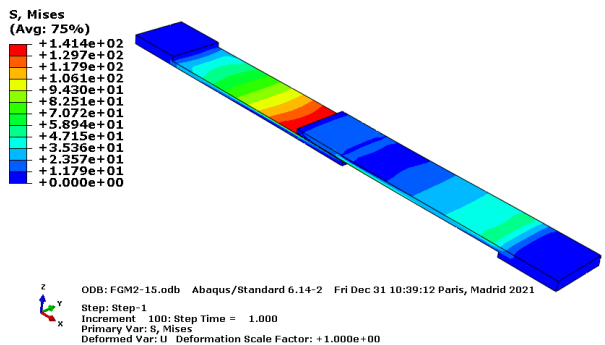
Composite/Composite ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )



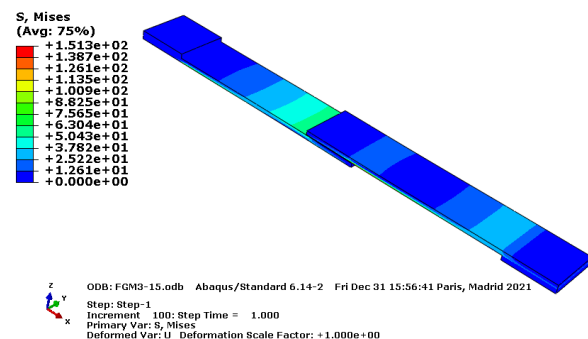
FGM1 ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )



FGM2 ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )



FGM3 ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )



FGM4 ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )

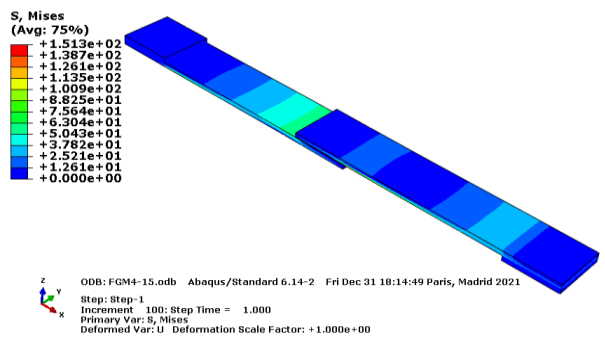


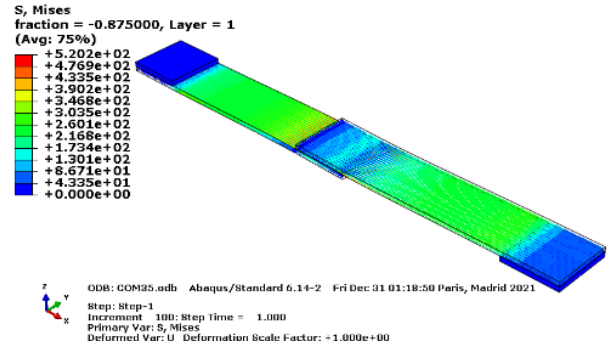
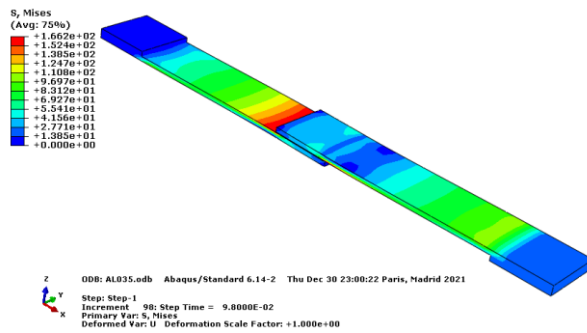
Figure.4.2. représenté Niveau de contraintes Von mises dans l'assemblage collé pour

$\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ .

Pour  $\sigma_{\infty} = 35$  MPa

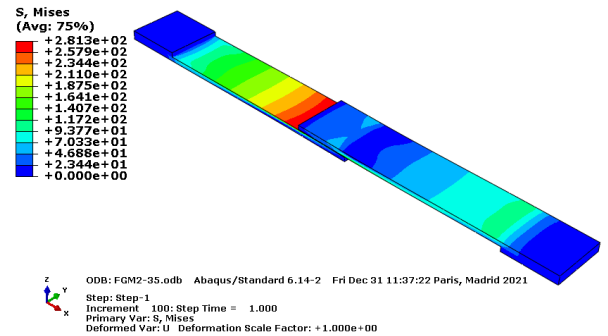
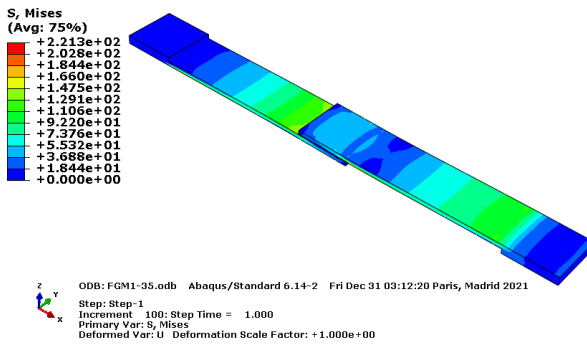
AL2024 T3/ AL2024 T3 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)  
MPa)

Composite/Composite ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)



FGM1 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)

FGM2 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)



FGM3 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)

FGM4 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)

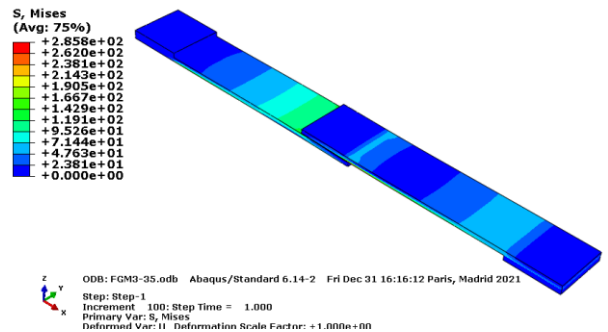
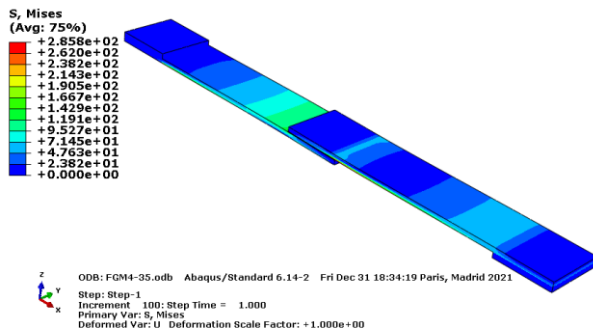
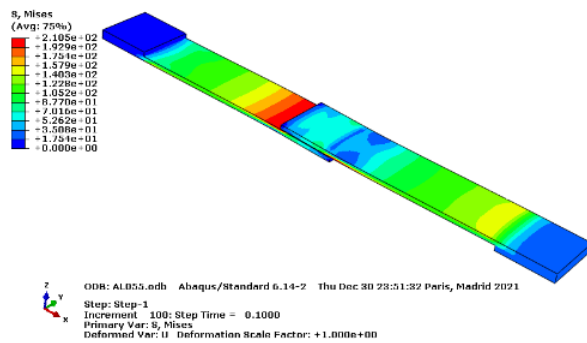


Figure.4.3. représenté Niveau de contraintes Von mises dans l'assemblage collé pour

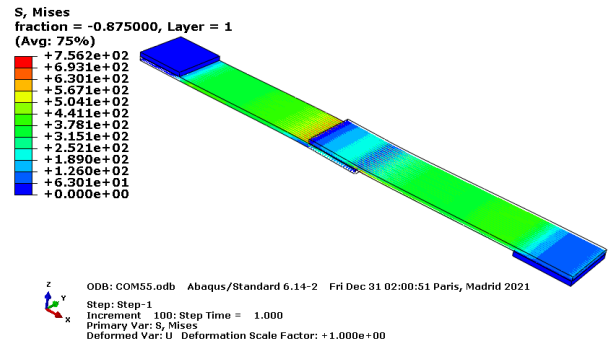
$\sigma_{\infty} = 35$ .

Pour  $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$

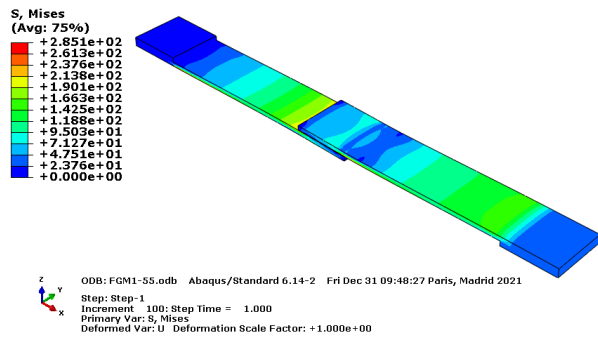
AL2024 T3/ AL2024 T3 ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )



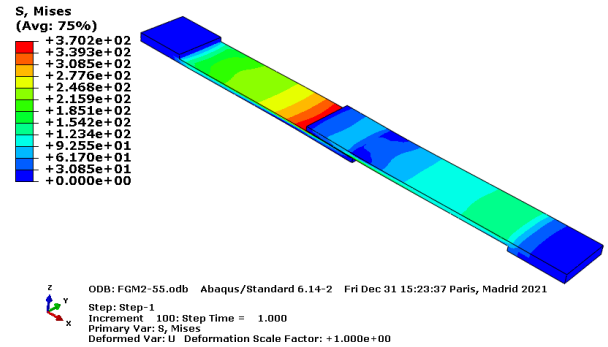
Composite/Composite ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )



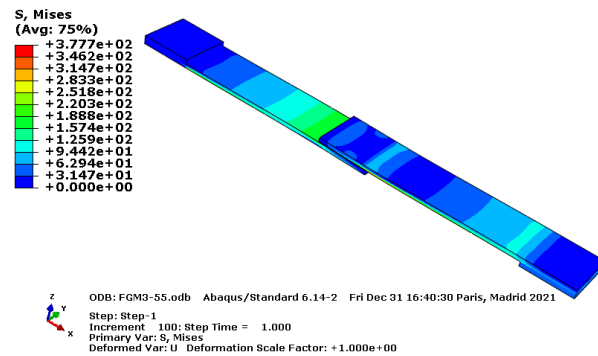
FGM1 ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )



FGM2 ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )



FGM3 ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )



FGM4 ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )

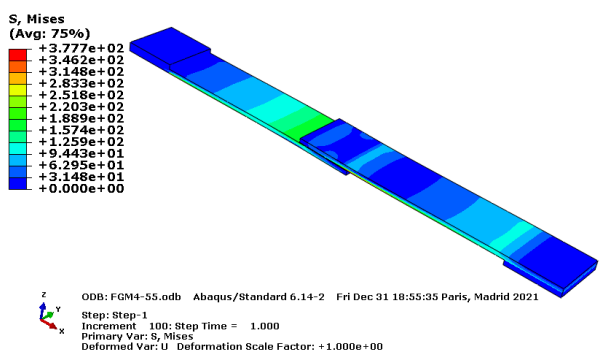


Figure.4.4 : représenté Niveau de contraintes Von mises dans l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$  .

#### 4.4. Niveau de Contraintes de Von mises dans le joint adhésif

La répartition des contraintes de Von mises dans le joint adhésive est montrés dans la figure.4.5. On remarque clairement que les contraintes sont concentrés au niveau des deux bords de l'adhésive et que le cœur de l'adhésive est quasiment inactive. La taille de la zone de forte concentration de contrainte varie selon le type de configuration de l'assemblage, les contraintes les plus élevées sont notés pour le cas d'assemblage métal/métal et composite /composite et les plus faible sont notées pour le cas d'assemblage FGM.

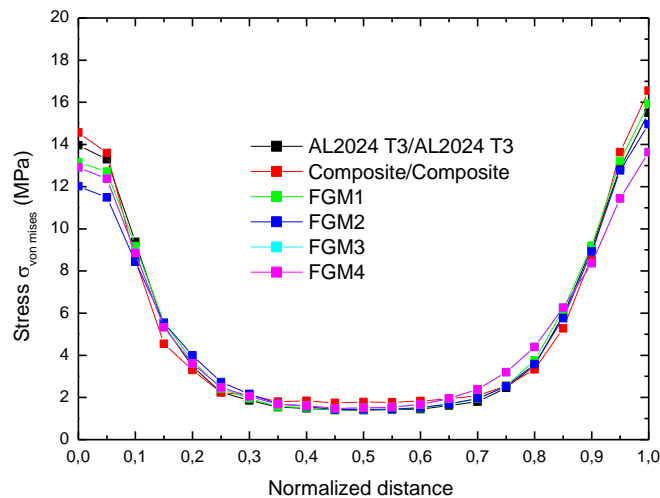


Figure.4.5 : Représenté la variation de la contrainte de von mises dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ .

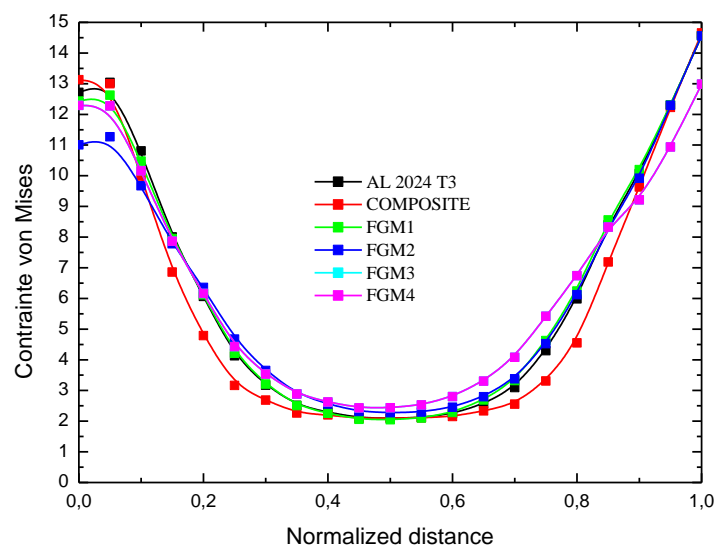
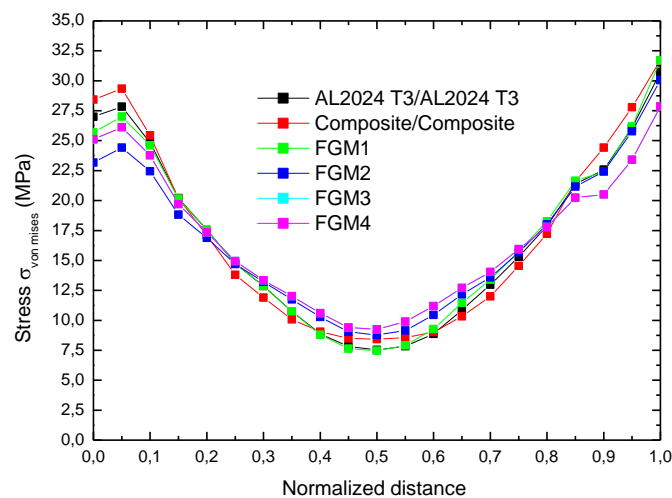


figure.4.6. Représenté la variation de la contrainte de Von mises dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 35 \text{ MPa}$ .

La figure.4.6. représenté la variation de la contrainte de Von mises dans le joint adhésive pour les différentes configurations de l'assemblage collé. On remarque clairement que la distribution de la contrainte de Von mises est pratiquement la même dans le joint d'adhésif et ce quel que soit la configuration de l'assemblage. Les valeurs les plus élevées sont notés au niveau des deux bords de l'adhésive. Le joint d'adhésive est peu sollicité il reste quasiment inactif sauf pour le cas d'assemblage FGM. Les valeurs les plus élevées sont notées pour le cas d'assemblage de plaque de type AL/AL et composite/composite.



**Figure.4.7. Représenté la variation de la contrainte de von mises dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ .**

4.5. Distribution contrainte de Von Mises dans le joint adhésif

Pour  $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$

AL2024 T3/ AL2024 T3 ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )

Composite/Composite ( $\sigma_{\infty} = 15$ )

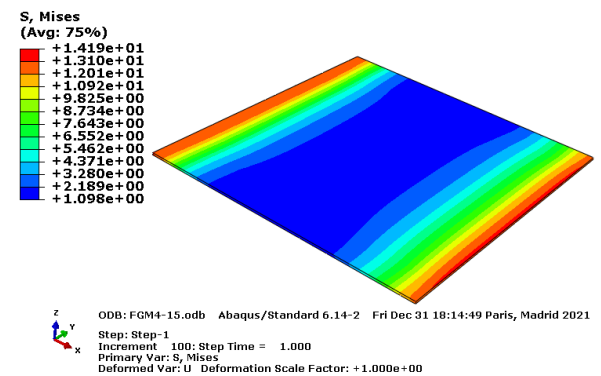
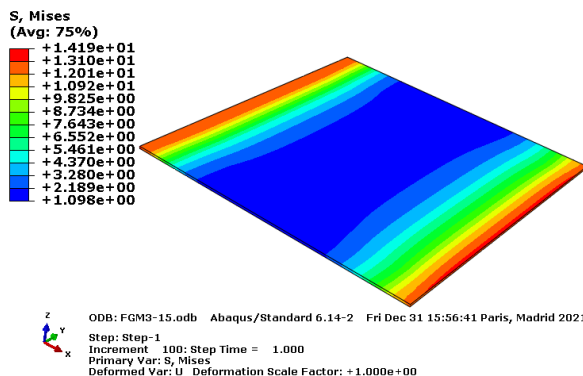
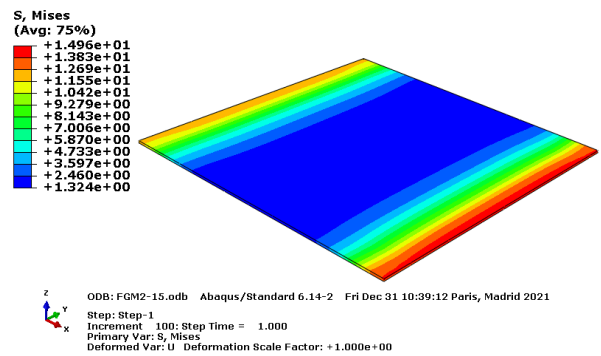
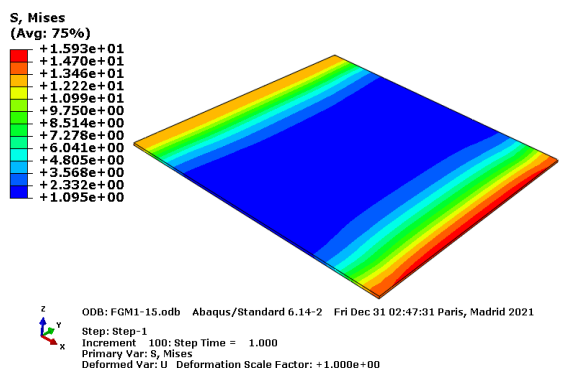
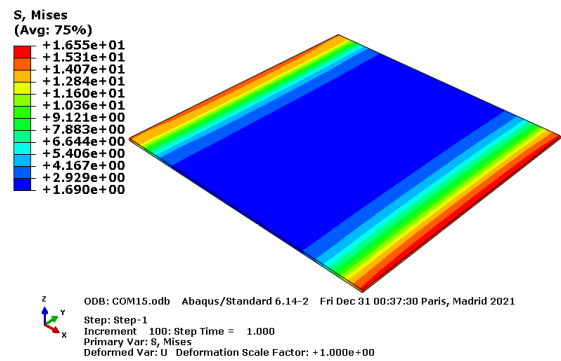
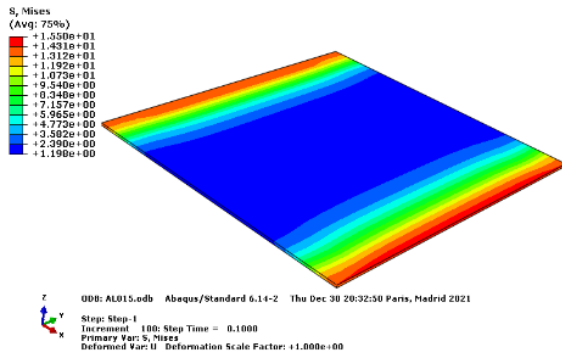


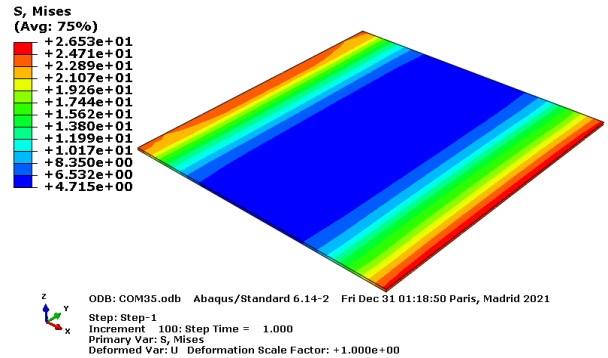
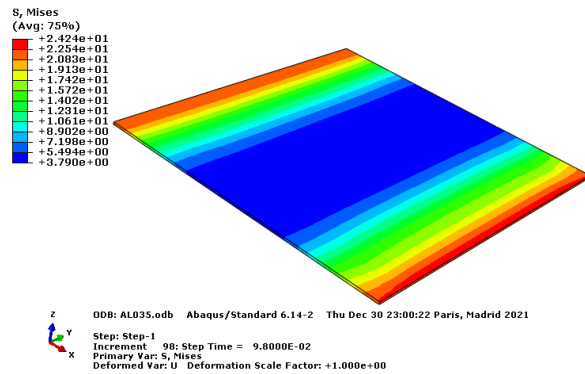
Figure.4.8. Distribution de contraintes de Von mises dans le joint adhésif pour les différentes configurations d'assemblage.



Pour  $\sigma_{\infty} = 35$  MPa

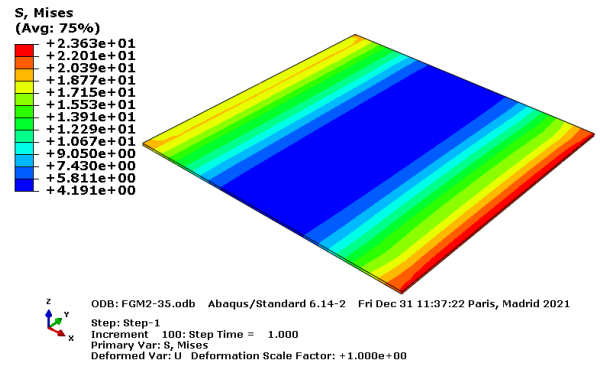
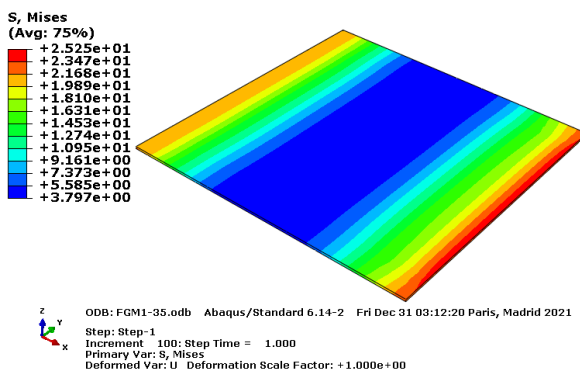
AL2024 T3/ AL2024 T3 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)

Composite/Composite ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)



FGM1 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)

FGM2 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)



FGM3 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)

FGM4 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)

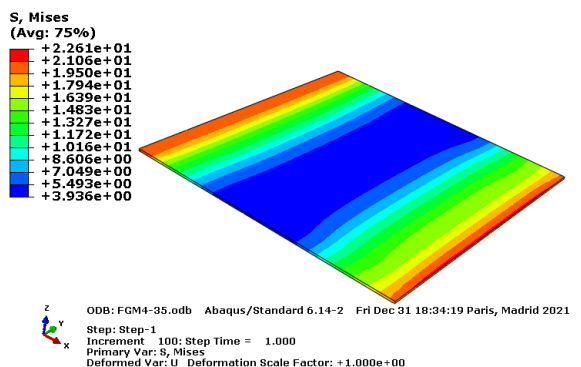
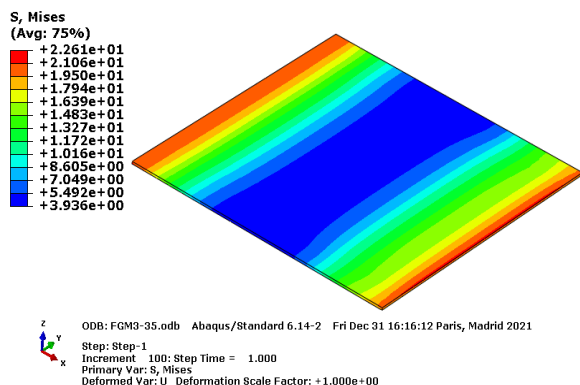
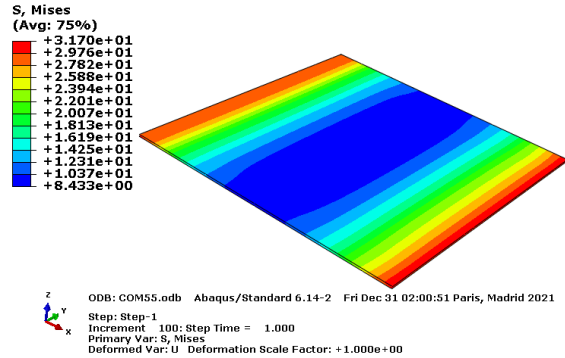
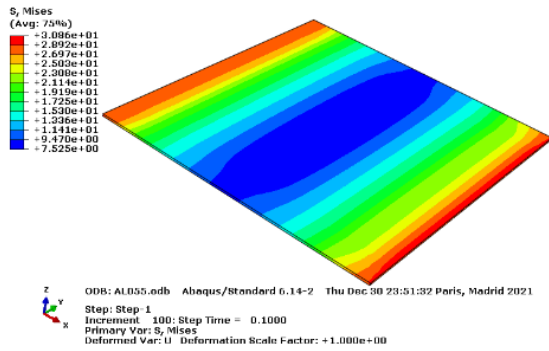


Figure.4.9. Niveau de contraintes de Von mises dans le joint adhésif pour les différentes configurations d'assemblage.

Pour  $\sigma_{\infty} = 55$  MPa

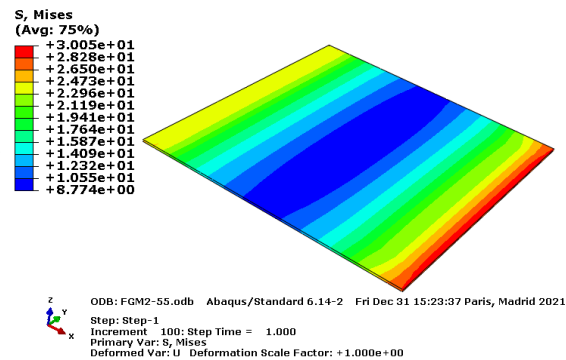
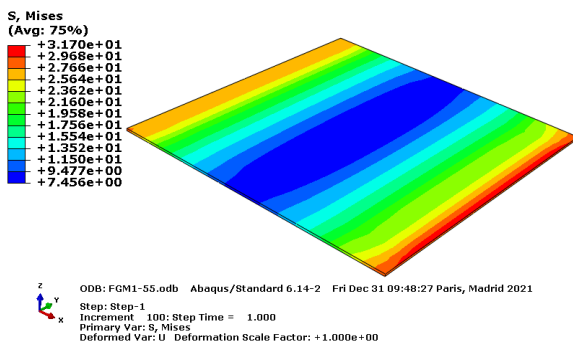
AL2024 T3/ AL2024 T3 ( $\sigma_{\infty} = 55$  MPa)

Composite/Composite ( $\sigma_{\infty} = 55$  MPa)



FGM1 ( $\sigma_{\infty} = 55$  MPa)

FGM2 ( $\sigma_{\infty} = 55$  MPa)



FGM3 ( $\sigma_{\infty} = 55$  MPa)

FGM4 ( $\sigma_{\infty} = 55$  MPa)

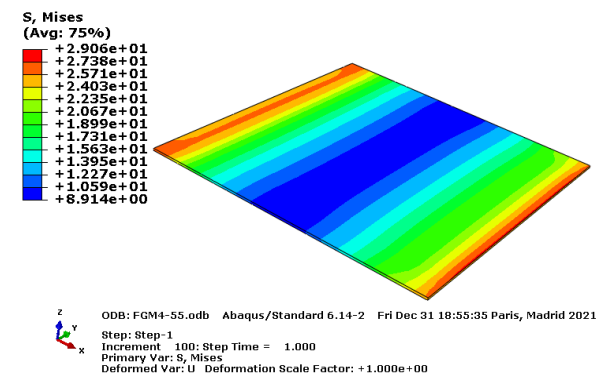
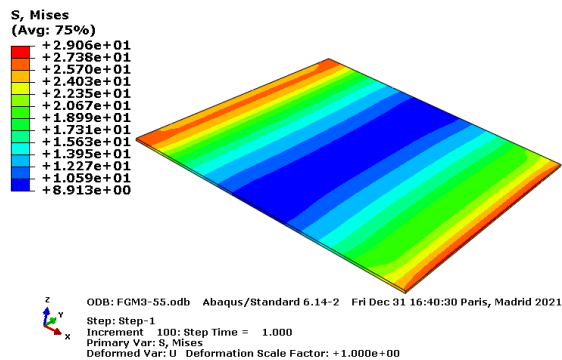


Figure.4.10 : Niveau de contraintes de Von mises dans le joint adhésif pour les différentes configurations d'assemblage.

Pour le cas d'un assemblage (figure c) on remarque qu'un seul bord qui présente une forte concentration de contraintes. La différence dans la répartition et la taille de la

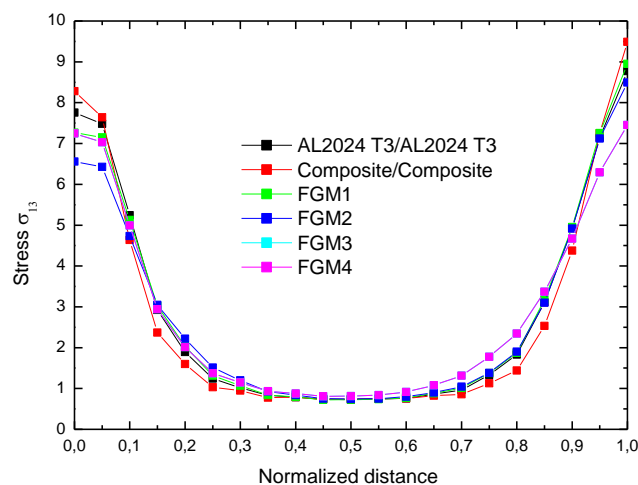
zone de forte concentration de contraintes dépend du contact de la plaque avec le joint adhésif. A cet effet et afin d'avoir une répartition homogène des contraintes il est préférable d'avoir un assemblage ou bien les faces de contact avec l'adhésive (dans le cas d'assemblage FGM) doit être équilibrées c'est-à-dire de même nature.

#### 4.7. Niveau de Contraintes de cisaillement dans le joint adhésif

Le niveau de contrainte de cisaillement dans le joint adhésive est présentés dans la figure 4.11-4.13.

De même que les contraintes de Von mises, les contraintes son concentres au niveau des deux bords du joint de l'adhésive. La valeur de la contrainte de cisaillement varie selon le type d'assemblage.

Pendant pour la variation de la contrainte de cisaillement, la figure.4.12 montré les valeurs les plus élevées sont notées pour le cas d'un assemblage de type FGM. Les contraintes sont différentes d'un bord à l'autre. Le cœur de l'adhésif est sollicité que pour le cas d'un assemblage de type FGM4



**Figure.4.11: Représenté la variation de la contrainte de cisaillement dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ .**

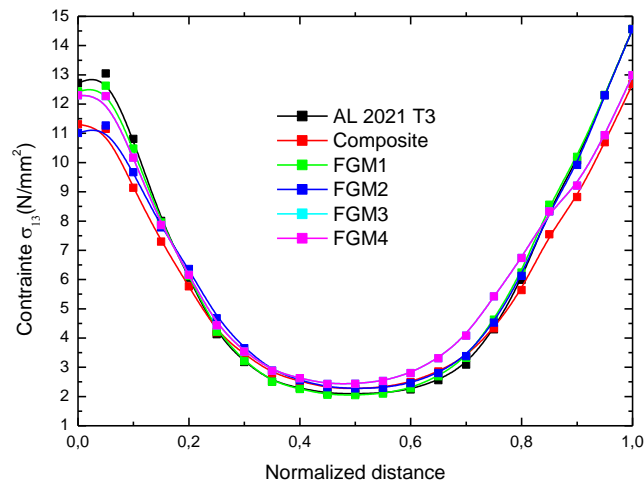


figure.4.12 : Représenté la variation de la contrainte de cisaillement dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 35 \text{ MPa}$ .

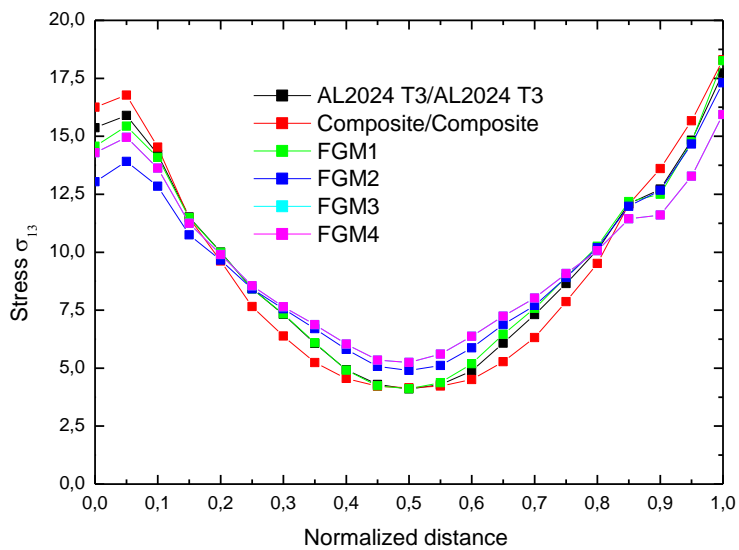
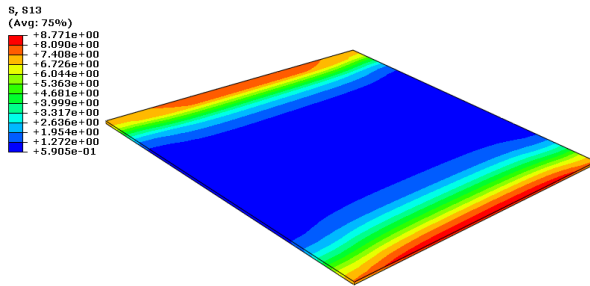


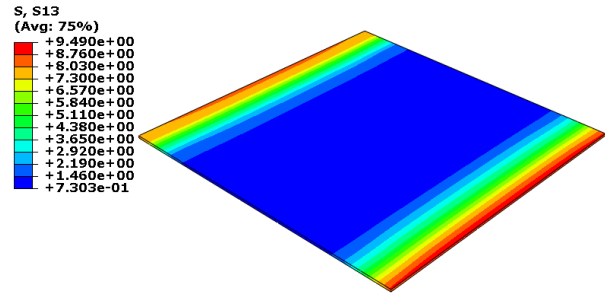
Figure.4.13 : Représenté la variation de la contrainte de cisaillement dans le joint adhésive suivant la longueur de recouvrement pour les différentes configurations de l'assemblage collé pour  $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ .

Pour  $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$

AL2024 T3/ AL2024 T3 ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ ) Composite/Composite ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )



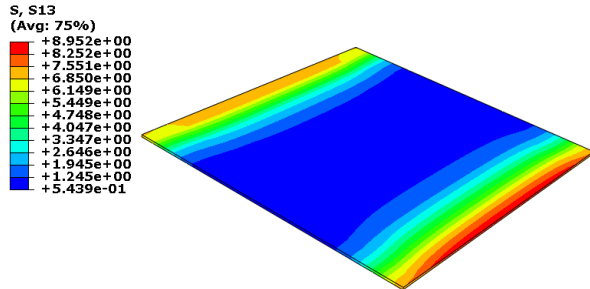
z ODB: AL015.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Thu Dec 30 20:32:50 Paris, Madrid 2021  
 Step: Step-1  
 Increment 100: Step Time = 0.1000  
 Primary Var: S, S13  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



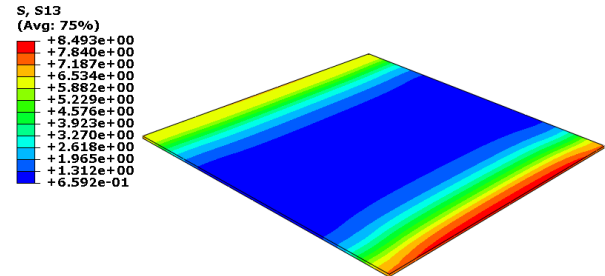
z ODB: COM15.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Fri Dec 31 00:37:30 Paris, Madrid 2021  
 Step: Step-1  
 Increment 100: Step Time = 1.000  
 Primary Var: S, S13  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

FGM1 ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )

FGM2 ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )



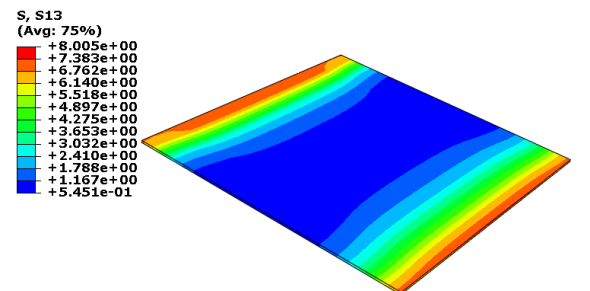
z ODB: FGM1-15.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Fri Dec 31 02:47:31 Paris, Madrid 2021  
 Step: Step-1  
 Increment 100: Step Time = 1.000  
 Primary Var: S, S13  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



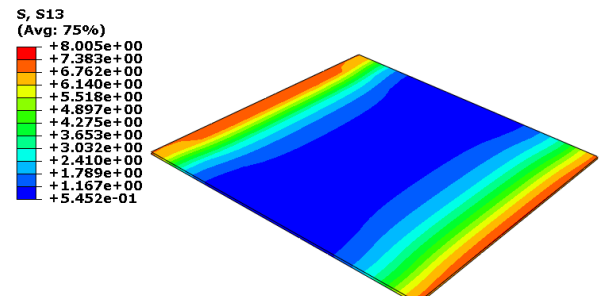
z ODB: FGM2-15.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Fri Dec 31 10:39:12 Paris, Madrid 2021  
 Step: Step-1  
 Increment 100: Step Time = 1.000  
 Primary Var: S, S13  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

FGM3 ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )

FGM4 ( $\sigma_{\infty} = 15 \text{ MPa}$ )



z ODB: FGM3-15.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Fri Dec 31 15:56:41 Paris, Madrid 2021  
 Step: Step-1  
 Increment 100: Step Time = 1.000  
 Primary Var: S, S13  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

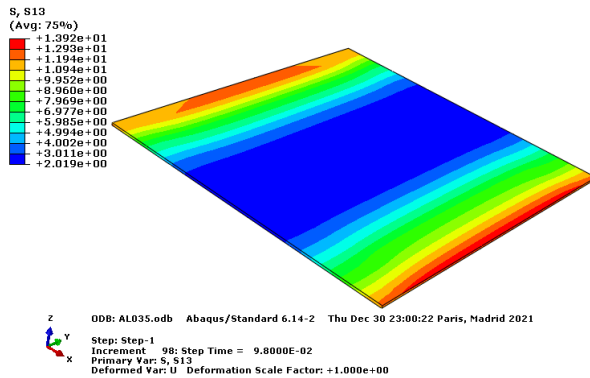


z ODB: FGM4-15.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Fri Dec 31 18:14:49 Paris, Madrid 2021  
 Step: Step-1  
 Increment 100: Step Time = 1.000  
 Primary Var: S, S13  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

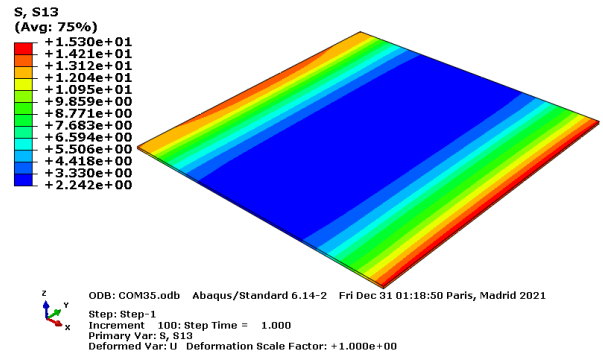
Figure.4.14: Niveau de contraintes de cisailment dans le joint adhésif pour les différentes configurations d'assemblage.

Pour  $\sigma_{\infty} = 35$  MPa

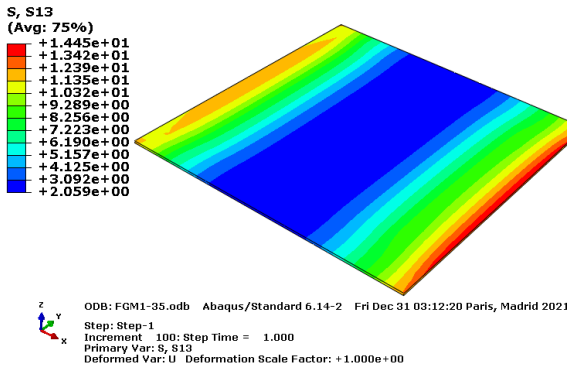
AL2024 T3/ AL2024 T3 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)



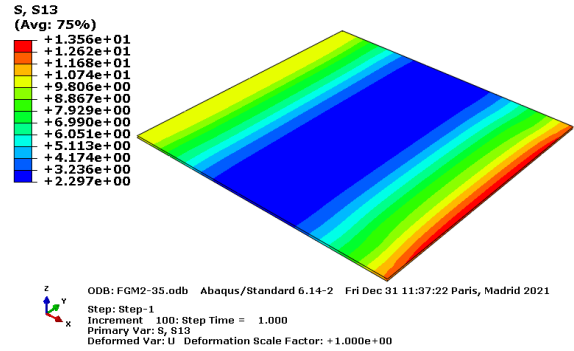
Composite/Composite ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)



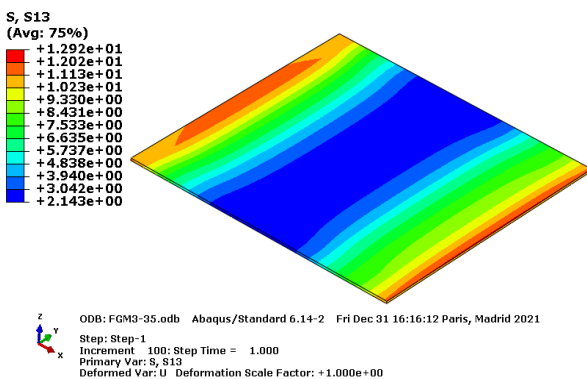
FGM1 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)



FGM2 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)



FGM3 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)



FGM4 ( $\sigma_{\infty} = 35$  MPa)

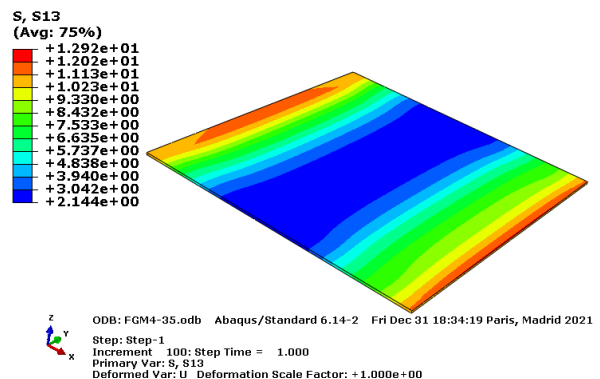
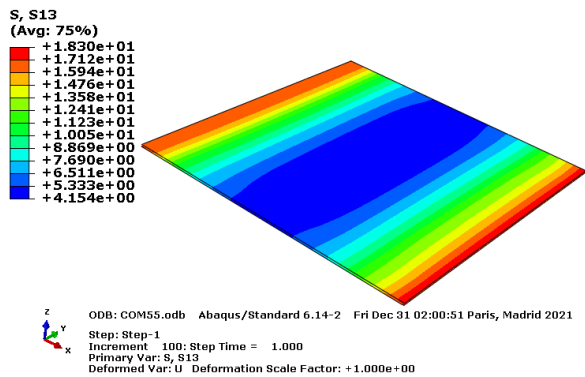
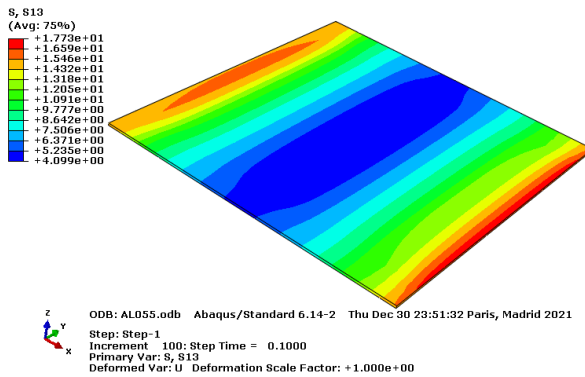


Figure.4.15 : Niveau de contraintes de cisailment dans le joint adhésif pour les différentes configurations d'assemblage.

Pour  $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$

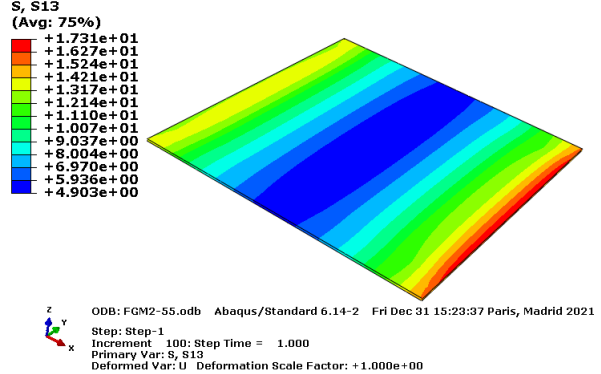
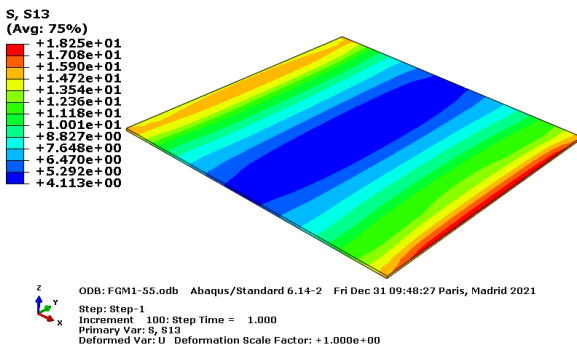
AL2024 T3/ AL2024 T3 ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )

Composite/Composite ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )



FGM1 ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )

FGM2 ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )



FGM3 ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )

FGM4 ( $\sigma_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ )

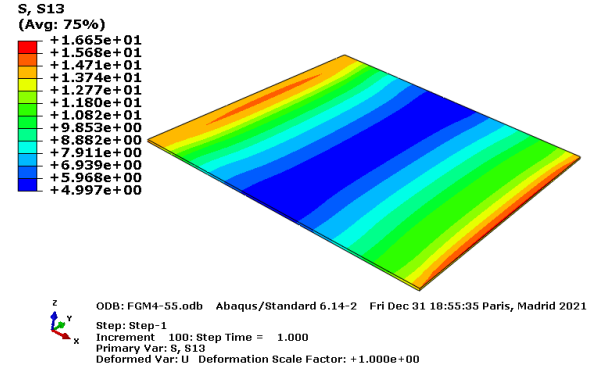
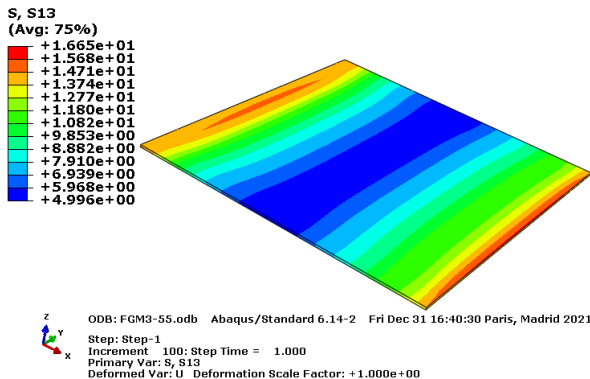


Figure.4.16 : Niveau de contraintes de cisailment dans le joint adhésif pour les différentes configurations d'assemblage.

#### 4.8. Conclusion

Dans cette partie, nous nous sommes attachés à présenter une généralité sur les matériaux à gradient évalué, L'analyse des résultats nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats de l'analyse numérique par éléments finis utilisant le code de calcul ABAQUS ont montré l'efficacité de cette méthode dans la détermination des différentes contraintes dans le joint adhésif.
- Les contraintes de Von Mises sont concentrées dans le joint adhésif au niveau des deux bords libres, par contre, le cœur de l'adhésif reste pratiquement inactif.
- La répartition des contraintes de pelage et cisaillement est symétrique dans le cas où l'assemblage sera soumis à la Traction.
- Le comportement de l'adhésif dans un assemblage collé dépend essentiellement des propriétés mécaniques de la plaque de l'assemblage

La plaque aux faibles propriétés mécaniques transmet moins de contraintes à l'adhésif, cependant, celles aux propriétés mécaniques élevées transmet la quasi-totalité de la charge appliquée à l'adhésif. Dans le cas d'assemblage de matériaux en FGM, La valeur maximale de la contrainte de Von Mises dépend de la face du métal qui est en contact avec la couche d'adhésive. La valeur maximale de la contrainte est notée pour le cas où la couche de céramique se trouve à l'extérieur en contact avec l'adhésif, la valeur la plus faible de la contrainte de Von Mises est pour le cas où l'aluminium est en contact avec l'adhésive FGM/Aluminium. Dans le matériau FGM/métal, la valeur maximale dépend de la position de la couche d'aluminium. Le cas où l'aluminium est à l'extérieur de la plaque FGM et donc en contact avec l'adhésive présente la valeur la plus faible.



# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Dans cette partie, nous nous sommes attachés à présenter une généralité sur les matériaux à gradient évalué, Dans un premier temps. nous avons présenté les notions fondamentale et puis en est passé à décrire les différentes méthodes élaboration et à la fin nous avons terminés par les différentes lois possibles qui servent à décrire la variation des propriétés matérielles du matériau FGM (module de Young, masse volumique et coefficient de poisson) suivant l'épaisseur d'une plaque, ces lois peuvent être de puissances, exponentielles ou même sigmoïde. L'analyse des résultats nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats de l'analyse numérique par éléments finis utilisant le code de calcul ABAQUS ont montré l'efficacité de cette méthode dans la détermination des différentes contraintes dans le joint adhésif.
- Les contraintes de Von Mises sont concentrées dans le joint adhésif au niveau des deux bords libres, par contre, le cœur de l'adhésif reste pratiquement inactif.
- répartition des contraintes de pelage et cisaillement est symétrique dans le cas où l'assemblage sera soumis à la Traction.
- Le comportement de l'adhésif dans un assemblage collé dépend essentiellement des propriétés mécaniques de la plaque de l'assemblage

# Référence

## Reference

---

## Référence

- [01]. O.Volkersen: Die nietkraftverteilung in zugbeanspruchten nietverbindungen mit konstanten laschenquerschnitten. Luftfahrtforschung, 7:15-47, 1938.
- [02]. A.Chukwujekwu Okafor, Navdeep Singhet S.V.Enemuoh, U.E.and Rao : Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels. Composite Structures, 71:258-270, 2005.
- [03]. Ramalho, L.D.C., S´anchez-Arce, I.J., Gonçaves, D.C., et al., 2022. Numerical analysis of the dynamic behaviour of adhesive joints: a review. Int. J. Adhes. Adhes. 118.
- [04]. Thèse, Xavier BUCH dégradation thermique et fluage d'un adhésif structural époxyde. Le 18 décembre 2000.
- [05]. Ricardo Jorge Braga Da Rocha 2016 ,evaluation of different damage initiation and growth criteria in the cohesive zone modelling analysis of single-lap bonded joints. Mechanical Engineering, instituto superior de engenharia do porto p 88
- [06]. V. Satheeshkumar, R. Ganesh Narayanan, Jay S. Gunasekera, Chapter 3 - Sustainable manufacturing: material forming and joining, Sustainable Manufacturing Processes, Academic Press, 2023, Pages 53-112, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99990-8.00007-2>.
- [07]. Pocius AV. Adhesion and adhesives technology: an introduction. 3rd ed. Munich: Hanser; 2012.
- [08]. S. Joannès, “Caractérisation mécanique et outil d’aide au dimensionnement des collages structuraux,” Science et génie des matériaux, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007. [En ligne]. Disponible : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00288527/>
- [09]. G. Kohen, Joint Design, ser. McGraw-Hill handbooks. McGraw-Hill, 1999, ch. 3, p. 896, ISBN 9780071500180.
- [10]. M. Eskandarian, D. Gallant, F. Hamel et al., Assemblage de l’aluminium par adhésifs structuraux, L. P. De l’aluminium, éditeur. Les Presses de l’aluminium, 2012. ISBN 978-2-923168-19-7.
- [11]. Hart-Smith, L. J., Analysis and Design of Advanced Composite Bonded Joints, (National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, USA, 1974).
- [12]. Robert D.Adams et William C.Wake: Structural Adhesive Joints in Engineering. Elsevier Applied Science Publishers, 1984.

## Reference

---

- [13]. G. Habenicht, Applied Adhesive Bonding : A Practical Guide for Flawless Results. Wiley-VCH Verlag gmbh & Co. Kгаа, 2008. ISBN 9783527626458
- [14] Adams, R. D., & Wake, W. C. (1984). Structural Adhesive Joints in Engineering. Doi:10.1007/978-94-009-5616-2
- [15] ASTM Standard D5573-99 (2012), "Standard practice for classifying failure modes in fiber-reinforced-plastic (FRP) joints." West Conshohocken, PA : ASTM International, 2012." Doi:10.1520/D5573-99R12.
- [16] Abdellghfar zaid these de doctorat : vélocimétrie des ondes de rayleigh-sezawa sur assemblages stratifiés, réalisés par collage, en vue de caractériser les interfaces
- [17]
- [18] O. Volkerson, Die Nietkraft Verteilung in Zugbeanspruchtenmit Konstanten Laschenquerschritten, Luftfahrtforschung 15 (1938) 41-47.
- [19] M. Goland, E. Reissner, The stresses in cemented joints, J. Applied Mechanics 11(1944)A17-A27.
- [20] D. K. Shaffer, H. M. Clearfield and J. S. Ahearn, in `Treatise on Adhesives', ed. J. D. Minford, Marcel Dekker, New York, 1991
- [21] J. F. Meyer, in `International Encyclopedia of Composites', ed. S. M. Lee, VCH, New York, 1990, vol. 2, pp. 509±524.
- [22] A. H s, "Adhesive bonding of aircraft structures", Int. J. Adhes. Adhes., 2000, 20, 367-376.
- [23] Adams RD. Adhesive bonding: science, technology and applications. Elsevier; 2005.
- [24]. A.P. Mouritz. Introduction to Aerospace Materials. Woodhead Publishing. 2012. Ch. 13. Polymers for aerospace structures, pp. 268-302
- [25] [5] Benchiha, A et al: "Influence of the presence of defects on the stresses shear distribution in the adhesive layer for the single-lap bonded joint", Struct. Eng. Mech., 53(5), 1017-1030, 2015
- [26] Geldermann, J., Peters, N.-H., Nunge, S., & Rentz, O. (2004). Best available techniques in the sector of adhesives application. doi:10.1016/S0143-7496(03)00103-9
- [27] <httpS://www.ma-bonne-impression.fr/blog/les-differents-types-d-adhesifs-et-leurs-utilisations-un-tour-d-horizon-n66>
- [28] [49] da Silva L, "Ochsner A, Adams RD. Handbook of adhesion technology. Springer Science & Business Media; 2011.
- [50] Knox EM. Marine applications for structural adhesives. University of Glasgow; 1996.
- [29] Jiri George Drobny,4 - Processing Methods Applicable to Thermoplastic Elastomers,

## Reference

---

Editor(s): Jiri George Drobny, In *Plastics Design Library, Handbook of Thermoplastic Elastomers* (Second Edition), William Andrew Publishing, 2014, Pages 33-173, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-22136-8.00004-1>.

[30] F. Delzendehrooy, A. Akhavan-Safar, A.Q. Barbosa, R. Beygi, D. Cardoso, R.J.C. Carbas, E.A.S. Marques, L.F.M. da Silva, A comprehensive review on structural joining techniques in the marine industry, *Composite Structures*, Volume 289, 2022, 115490, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115490>.

[31] Jacques Congnard, *science et technologie du collage*, 1er edition 2003, français

[32] J. HOUZE. *Production d'aluminium*. École des mines d'ALBI CARMAUX. France. (2007)

[33]. Thèse de doctorat, Mohamad Darwiche, *Apprentissage statistique pour l'évaluation et le contrôle non destructifs : application à l'estimation de la durée de vie restante des matériaux par émission acoustique sous fluage*, 04 Juin 2013, l'université du Maine.

[34] Berthelot J.M., *Composite Materials: Mechanical Behaviour and Structural Analysis*. livre, 1998

[35]. Claire-Isabelle Zenone. *Modélisation et caractérisation de l'interaction fluide-structure lors de la mise en oeuvre d'un matériau composite par infusion sous vide*. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai, 2019. Français. ffNNT : 2019MTLD0004ff. fftel03271933f

[36]. Thèse de doctorat, Isabelle Giraud, *élaboration d'ensimage thermoplastiques thermostables : influence sur le comportement mécanique des composites PEEK/fibres de carbone*, L'université de Toulouse, Le 21 juillet 2011

[37]. Thèse de doctorat, Pongtorn PROMBUT, *caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels*, le 27 septembre 2007, université Toulouse III Paul Sabatier.

[38]. Th7se de doctorat, Laarej Merad, *Etude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite RTM*, 31 janvier 2010 à l'université Abou Bakr BLKAID de Tlemcen.

[39]. Jha, DK, Kant, T, Singh, RK. (2013). Free vibration response of functionally graded thick plates with shear and normal deformations effects. *Composite Structures*, 96, 799-823

[40]. Mahmood, M. & Akinlabi, E., (2017). *Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*, Springer

[41] Thèse HOUARI amin, *Endommagement dans les plaques entaillées en FGM*, UNIVERSITE DJILLALI LIABES - SIDI BEL ABBES, 2021

[42] Muller, P., Mognol, P., & Hascoet, J.-Y. (2012). *Functionally Graded Material (FGM) Parts: From Design to the Manufacturing Simulation*. Proceedings of the *ASME 2012 11<sup>th</sup>*

## Reference

---

*Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA2012, July 2-4, Nantes, France, doi: 10.1115/esda2012-82586*

[43].L. Rezgani, K. Madani, M. Mokhtari, X. Feaugas, S. Cohendoz, S. Touzain & S. Mallarino (2017): Hygrothermal ageing effect of **ADEKIT A140** adhesive on the J-integral of a plate repaired by composite patch, *Journal of Adhesion Science and Technology*, DOI: 10.1080/01694243.2017.1415790

[44].Djellab A, Chellil A, Lecheb S, et al. Etude expérimentale et numérique du comportement aux chocs dans les composites sandwich en nid d'abeille. *Actes de l'Institution of Mechanical Engineers, Partie L : Journal of Materials : Design and Applications*. 2024; 238(7):1342-1357. doi :[10.1177/14644207231223638](https://doi.org/10.1177/14644207231223638)

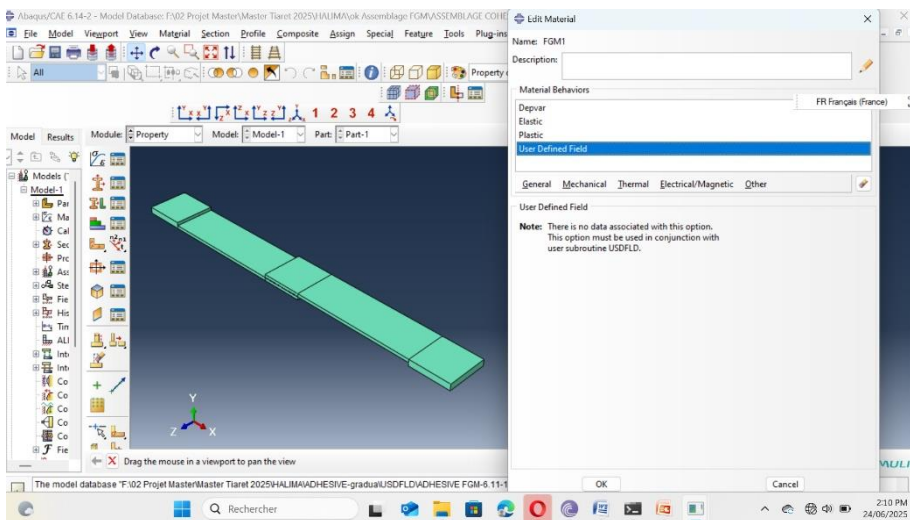
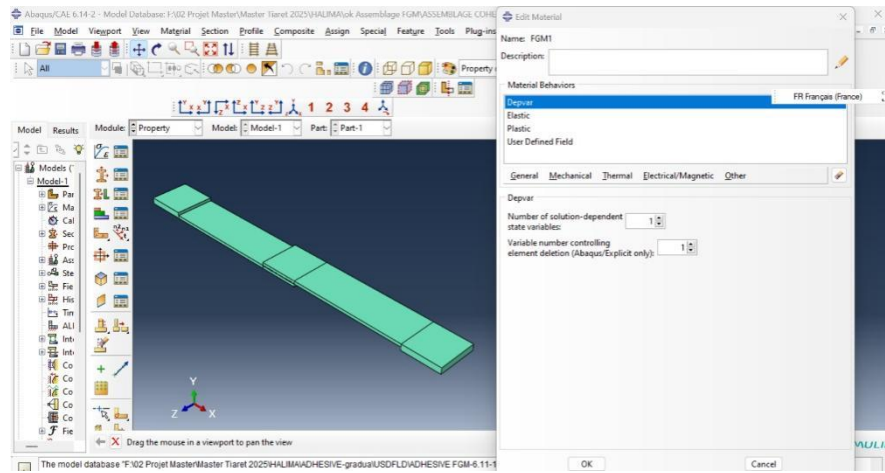
[45].Siguerdjidjene, H., Houari, A., Madani, K., Amroune, S., Mokhtari, M., Mohamad, B., Ahmed, C., Merah, A., Campilho, R.D.S.C., Predicting damage in notched functionally graded materials plates through extended finite element method based on computational simulations, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 70 (2024) 1-23.

[46].Williamson, R. L., Rabin, B. H. and Drake, J. T. (1993). Finite element analysis of thermal residual stresses at graded ceramic-metal interfaces. Part I. Model description and geometrical effects. *Journal of Applied Physics*, 74(2), pp. 1310- 1320. DOI: 10.1063/1.354910

[47].Jin, Paulino., GH, Dodds., Jr, RH.(2003). Cohesive fracture modeling of elastic–plastic crack growth in functionally graded materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 1885-912

[48] Houari, A., Madani, K., El Ajrami, M. et al. Analyse de la nature du substrat sur la résistance d'un joint à recouvrement unique. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 45, 469 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04397-2>

# Reference



```

USDFGM_PATCH.for
G (Global Scope)
SUBROUTINE USDFLD(FIELD,STATEV,PNEWDT,DIRECT,T,CELENT,
1 TIME,DTIME,CMNAME,ORNAME,NFIELD,NSTATV,NOEL,NPT,LAYER,
2 KSPT,KSTEP,KINC,NDI,NSHR,COORD,JMAC,JMATYP,MATLAYO,LACCFLA)
C
C   INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
C   CHARACTER*80 CMNAME,ORNAME
C   CHARACTER*3  FLGRAY(15)
C   DIMENSION FIELD(NFIELD),STATEV(NSTATV),DIRECT(3,3),
3 T(3,3),TIME(2)
C   DIMENSION ARRAY(15),JARRAY(15),JMAC(*),JMATYP(*),COORD(*)
C   ELASTIC USER SUBROUTINE
C   PARAMETER (ONE=1.0D0,TWO=2.0D0,HALF=0.5D0,FOUR=4.3D0)
C   DOUBLE PRECISION
4 V,E
C   DIMENSION INTV(1),REALV(1)
C       E1      =71000.0D0
C       E2      =362000.0D0
C       H       =2.0D0
C       N       =-1.0D0
C       Z       =COORD(3)
C   READ X COORDONE
5
C   CALCULATE YOUNG MODULE
6
C   RETURN
C   END
    
```



## Reference

---

Sous-programme USDFLD