

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 :** Electromécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Maintenance Industrielle

**Thème**

### Analyse numérique du comportement en rupture des assemblages collés

Préparé par :

**M. DARFA Abdelkader**

Soutenu publiquement le : 9 / 11 / 2020, devant le jury composé de :

<b>M.MOULGADA Abdelmadjid</b>	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
<b>M.BENAMAR Badr</b>	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
<b>M.ZAGANE Mohammed El Sallah</b>	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
<b>M.BALTACH Abdelghani</b>	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2019 - 2020

# Remerciements

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux,  
de m'avoir appris  
ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout  
dont je nécessitais pour l'accomplissement de cette  
thèse.

Je tiens à remercier très chaleureusement les  
membres de jury, qui ont accepté la charge de juger  
ce mémoire malgré un très court délai consacré à la  
lecture.

Finalement, je réserve une place singulière à toutes  
les personnes qui ont contribué, d'une façon directe  
ou indirecte à l'achèvement de ce travail et à tous  
ceux et celles qui m'ont aidé et soutenu durant tout  
mon parcours trouvent ici l'expression de mes  
remerciements les plus sincères car le chemin que j'ai  
parcouru depuis le début de mes études est le fruit de

relation avec de nombreuses personnes sans les nommer. C'est pourquoi je tiens à terminer en présentant mes excuses à ceux qui ne se trouvent pas dans cette liste, qui est bien loin d'être exhaustive.

# Dédicace

À mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À mes chers frères et mes sœurs

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

## Abréviations

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Introduction générale 02

### Chapitre I : Recherche bibliographique sur les techniques d'assemblage mécanique

I.1 Introduction	04
I.2 Assemblage mécanique	04
I.2.1 Définition	04
I.2.2 Degré d'assemblage	04
I.2.3 Types d'assemblage	04
1. Assemblage permanent	04
2. Assemblage démontable	05
3. Assemblage direct	05
4. Assemblage indirect	05
I.2.4 Techniques d'assemblage mécanique	06
1. Soudage	06
1.1. Le soudage hétérogène (le Brasage)	06
1.2. Le soudage autogène	07
1.3. Exemples	07
1.3.1. L'Aluminothermie	07
1.3.2. Soudage Oxyacétylénique (combustion gazeuse)	08
1.3.3. Le soudage à l'arc électrique	09
2. Le clinchage	09
3. Le frittage	10
4. Colles et adhésifs	11
4.1. Avantages et inconvénients du collage	11
4.1.1. Avantages	11
4.1.2. Inconvénients	12

### Chapitre II : État de l'art sur les assemblages collés

II.1 Introduction	14
II.2 L'effet de la force appliquée sur le joint à simple recouvrement	14
II.2.1 Conclusion	16

II.3 L'effet de type de maillage	18
II.3.1 Conclusion	22
II.4 Différentes configurations dans la colle	23
<b>Chapitre III : Initiation à la méthode des éléments finis</b>	
III.1. Introduction	25
III.2 Etude éléments finis	25
III.2.1. Définitions de la méthode des éléments finis	25
III.2.2. Etapes de la méthode des éléments finis	25
III.2.3. Caractéristiques d'un élément fini	26
III.2.4. Type des éléments finis	27
III.2.5. Choix des éléments finis	28
III.2.6. Principes de la MEF	29
III.2.7. Domaines d'application de la MEF	29
III.2.8. Utilisation d'un Logiciel élément fini	29
III.3 Logiciel ABAQUS	30
III.3.1 Présentation du code ABAQUS	30
III.3.2 Définition de logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS	31
III.3.3 Caractéristiques de logiciel ABAQUS	31
III.3.4 Les éléments utilisés par ABAQUS	32
III.3.5 Réalisation d'une simulation numérique	32
III.3.6 Les différents fichiers pour la simulation sous ABAQUS	33
III.3.7 Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS	33
III.3.8 Structure d'une analyse sous Abaqus	34
<b>Chapitre IV : Résultats et discussions</b>	
IV.1 Introduction	36
IV.2 Validation du modèle éléments finis en comportement élastique linéaire	36
IV.2.1 Propriétés Mécaniques	37
IV.2.2 Modélisation par Elément finis	37
IV.2.3 Résultats et discussion	38
IV.2.4 Effet de la force appliquée	40
IV.2.5 Effet de la géométrie de la colle	41
IV.2.6 Effet des propriétés mécaniques de la colle	43
Conclusion générale	47

Références bibliographiques

49

Résumé

$\sigma$	Contrainte de cisaillement, MPa
$\sigma_{xy}$	La contrainte de cisaillement,
$\sigma_{yy}$	La contrainte normale, dite de pelage,
$\sigma_{xx}$	Et parfois la contrainte longitudinale,
$\tau$	Contrainte de cisaillement.
<b>G</b>	Module de cisaillement, GPa
<b>E</b>	Module d'Young.
$\sigma_y$	Contrainte de seuil
$\nu$	Coefficient de poisson.
<b>KI</b>	facteur d'intensité des contraintes.
<b>P</b>	Charge de traction, MPA
<b>MEF</b>	méthode éléments finis
<b>1D</b>	Unidimensionnelle.
<b>2D</b>	Bidimensionnelle.
<b>3D</b>	Tridimensionnelle.
<b>a</b>	adhésive
<b>p</b>	patch
<b>S</b>	structure
<b>CPS4R</b>	Élément bilinéaire à 4 nœuds.



<b>Figure I.1</b>	Le brasage	06
<b>Figure I.2</b>	Soudage au chalumeau	07
<b>Figure I.3</b>	L'aluminothermie	08
<b>Figure I.4</b>	Soudage oxyacétylénique	08
<b>Figure I.5</b>	Schéma de fonctionnement (Soudage à l'arc électrique)	09
<b>Figure I.6</b>	Le Clinchage	09
<b>Figure I.7</b>	Description du processus de frettage	10
<b>Figure I.8</b>	Colles et adhésifs	12
<b>Figure II.1</b>	Configuration de joint à recouvrement unique tridimensionnel	14
<b>Figure II.2</b>	Courbe contrainte-déformation (a)-uniaxiale pour l'aluminium 2024-T3 (b)- l'adhésif Hysol® EA9394	15
<b>Figure II.3</b>	Répartition de la contrainte de (a)-pelage de l'adhésif sur la longueur de recouvrement Et (b)- cisaillement de l'adhésif sur la longueur de recouvrement	15
<b>Figure II.4</b>	Modèle géométrique de joint adhésif collé à simple recouvrement	17
<b>Figure II.5</b>	Maillage du joint adhésif collé à simple recouvrement utilisée	17
<b>Figure II.6</b>	Distribution des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement et c)- de pelage dans l'adhésif	18
<b>Figure II.7</b>	Joint à recouvrement simple	19
<b>Figure II.8</b>	Modèle à tour unique analysé (à gauche), maillage dans le logiciel Fortran FE (à droite)	20
<b>Figure II.9</b>	Contrainte dans la section médiane de l'adhésif dans le joint à recouvrement unique: (a) $\sigma_y$ , (b) $\sigma_{xy}$ , (c) $\sigma_x$	22
<b>Figure II.10</b>	Configurations de collage de plaques de composites parallèles [Hart-Smith 2002] : -a- Recouvrement, -b- Joint en bout, -c- Joint en bout avec recouvrement, -d- Joint biseauté, -e- Joint biseauté double, -f- Joint en escalier, et -g- Joint en escalier double	23
<b>Figure II.11</b>	Différents modes de sollicitations mécaniques	23
<b>Figure III.1</b>	Domaine V discrétisé par sous domaine $V_e$	26
<b>Figure III.2</b>	Les types d'éléments finis	28
<b>Figure III.3</b>	Principe d'analyse par la MEF	29
<b>Figure III.4</b>	schéma présente l'utilisation langage de script Python	30
<b>Figure III.5</b>	Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque	32
<b>Figure III.6</b>	Les modules de logiciel ABAQUS	33
<b>Figure IV.1</b>	Modèle géométrique d'un joint à simple recouvrement (les dimensions sont en mm) [Tumino].	37
<b>Figure IV.2</b>	Modèle EF de la plaque fissurée : (a) conditions aux limites ; (b) Modèle et maillage typique de 1/4 de la plaque ; (c) Maillage autour de la zone de contact.	38
<b>Figure IV.3</b>	Répartition des contraintes de Von-Mises dans l'adhésif	39
<b>Figure IV.4</b>	Répartition des contraintes de l'adhésif sur la moitié de la longueur de recouvrement ; a) contraintes normales ; b) contraintes de cisaillement et c) contraintes de pelage	39

## Liste des figures

---

<b>Figure IV.5</b>	Distribution des contraintes de l'adhésif sur la longueur de recouvrement ; a) contraintes normales ; b) contraintes de cisaillement et c) contraintes de pelage	40
<b>Figure IV.6</b>	Distribution des contraintes du joint le long de la longueur de recouvrement pour différentes épaisseurs de l'adhésif ; a) contraintes normales ; b) contraintes de cisaillement et c) contraintes de pelage.	42
<b>Figure IV.7</b>	Distribution des contraintes du joint le long de la longueur de recouvrement normalisée pour différentes longueurs de recouvrement ; a) contraintes normales ; b) contraintes de cisaillement et c) contraintes de pelage	43
<b>Figure IV.8</b>	Distribution des contraintes du joint le long de la longueur de recouvrement normalisée pour différentes longueurs de recouvrement ; a) contraintes normales ; b) contraintes de cisaillement et c) contraintes de pelage.	44

<b>Tableau.II.1</b>	Les dimensions utilisées par [8]	14
<b>Tableau.II.2</b>	Les propriétés mécaniques utilisées par [8]	15
<b>Tableau.II.3</b>	Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 2024-T3 et l'adhésif Adekit A140	18
<b>Tableau.II.4</b>	Les valeurs maximales des contraintes de, Von mises, cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour différentes charges	19
<b>Tableau.II.5</b>	Propriétés mécaniques des matériaux étudiés.	20
<b>Tableau.II.6</b>	Caractéristiques du maillage	20
<b>Tableau.III.1</b>	Les unités dans ABAQUS	34
<b>Tableau.IV.1</b>	Propriétés des matériaux utilisés	37
<b>Tableau.IV.2</b>	Nombre de nœuds et d'éléments de l'assemblage étudié	38
<b>Tableau.IV.3</b>	Propriétés Mécaniques des adhésifs appliquées	44

---

---

# **Introduction générale**

---

---

Les assemblages par collage sont de plus en plus employés dans l'industrie. Ils jouent un rôle important dans de nombreuses applications structurelles, en particulier dans les industries spatiale, aéronautique et automobile. Il remplace souvent les procédés traditionnels d'assemblages tels que le boulonnage, le rivetage, le visage, l'agrafage ou bien même le soudage. Les structures assemblées sont soumises à des charges complexes compte tenu de leur configuration géométrique et de la multiplicité des conditions de charge en service. Pour dimensionner un joint, il faut être en mesure de déterminer l'état de contrainte au sein du joint. Ceci nous amène à étudier l'état de contrainte dans un joint adhésif. L'objectif de notre travail consiste à analyser par la méthode des éléments finis le comportement élastique des contraintes dans la couche de l'adhésif et d'autre part quantifier la longueur optimale de recouvrement en fonction des paramètres géométriques et mécaniques d'un joint à simple recouvrement. Plusieurs paramètres sont pris en considération tels que le chargement, l'épaisseur et les propriétés mécaniques de l'adhésif, la longueur de recouvrement. Pour ce faire, nous avons organisé notre travail comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à une étude bibliographique sur les méthodes d'assemblage mécanique. En effet, nous y avons présenté quelques techniques classiques d'assemblage tel que le boulonnage, le rivetage. Cette partie nous a permis de positionner notre thème et le classer.

Dans le deuxième chapitre, porte sur l'état de l'art sur les assemblages collés. Nous avons cité les différents effets tel que la force appliquée, type de maillage, les propriétés mécaniques de l'adhésive, et l'effet de la géométrie (la dimension de joint colle).

Le troisième chapitre présente l'initiation à la méthode des éléments finis. Nous avons quelques définitions sur la méthode des éléments finis comme (définition, les étapes, caractéristiques, types ....etc.) et présenté aussi logiciel ABAQUS.

Dans le dernier chapitre, nous sommes concentrés sur la simulation numérique du collage. Nous avons étalé en détail les étapes de modélisation via le logiciel Abaqus, commençant par la conception géométrique, passant par les conditions aux limites, le maillage arrivant aux résultats de la simulation. A travers nos résultats, nous avons proposé les paramètres optimaux pour l'assemblage collé. Cette analyse, nous a conduits à comprendre les phénomènes mis en jeu.

On termine ce mémoire en présentant les conclusions du travail.

---

---

## **Chapitre I**

---

# **Recherche bibliographique sur les techniques d'assemblage mécanique**

---

## I.1 Introduction

L'assemblage est un procédé permettant de lier entre elles plusieurs pièces pour former un ensemble. Le choix d'une solution d'assemblage dépend de : Coût ,Durée de vie, Maintenabilité, Encombrement et Esthétique . Les procédés d'assemblages se classent en trois familles : Mécanique , Thermique , Chimique . Les assemblages non thermiques ou thermiques sont appliqués dans quasi toutes les branches de l'industrie. A côté du collage, l'assemblage par déformation ou assemblage mécanique gagne du terrain, surtout pour les matériaux hétérogènes. De nouvelles techniques d'assemblage qui influencent peu ou pas les propriétés du matériau doivent être utilisées. Les techniques d'assemblage mécanique sont très appropriées et ont de plus de nombreux avantages justifiant leur utilisation.

## I.2 Assemblage mécanique

### I.2.1 Définition

Un assemblage mécanique est la liaison de différentes pièces d'un ensemble ou produit. C'est aussi un ensemble de procédés et solutions techniques permettant d'obtenir ces liaisons.

### I.2.2 Degré d'assemblage

On distingue avant tout un assemblage par ses degrés de liaison, c'est-à-dire les mouvements relatifs indépendants interdits ou autorisés entre les pièces assemblées.

### I.2.3 Types d'assemblage

On distingue ensuite différents types d'assemblage, un assemblage peut être permanent ou démontable, direct ou indirect[1].

#### 1. Assemblage permanent

Assemblage non démontable : pour supprimer cette liaison, il est nécessaire de déformer ou de détruire au moins une des pièces formant l'assemblage.

- Soudure
- Clinchage (emboutissage)
- Emmanchement à force
- Certains frettages, certaines colles et adhésifs
- Sertissage...

## 2. Assemblage démontable

La liaison est conçue de manière à être démontée sans détérioration importante des pièces qui peuvent être généralement réutilisées pour recréer un assemblage. L'élément assurant la liaison peut ne pas être réutilisable.

- Vissage (Vis-écrou)
- Boulonnage
- Goujons
- Clavette (transversale/Longitudinale/ tangentielle)
- Arc-boutement, Serre-joints
- Goupille
- Coincement de formes coniques
- Certains frettages
- Certains colles et adhesives.

## 3. Assemblage direct

L'assemblage ne nécessite aucune pièce intermédiaire, la forme des pièces en contact suffit pour la réalisation de celui-ci, parmi ces techniques on trouve :

Le soudage, le frettage, le clinchage, Le sertissage et l'emboîtement élastique.

## 4. Assemblage indirect

Une ou plusieurs pièces intermédiaires sont utilisées.

- Visserie : vis, écrou, boulon, goujon, filetage, taraudage
- Rivet - Clavette - Collage - Goupille
- Embrèvement (avec tenon, mortaise et cheville) – Bague de tolérance
- Anneau élastique -Clou - Agrafage

On peut aussi distinguer le type d'assemblage par domaine d'activité :

- Menuiserie (bois, aluminium,...) - Systèmes de fixation
- Transmission (mécanique).
- Plomberie : Robinetterie, Emboîture... - Charpenterie



## I.2.4 Techniques d'assemblage mécanique

### 1. Soudage

Le soudage est un procédé d'assemblage qui assure la liaison permanente de divers éléments métalliques. Il désigne deux techniques [2] :

- Le soudage hétérogène.
- Le soudage autogène

#### 1.1. Le soudage hétérogène (le Brasage)

Il consiste à introduire entre les éléments à assembler, un métal liquide (qui, après refroidissement, adhère fortement aux deux éléments).

Le soudeur dégraisse et décape les pièces à assembler. Le métal de ces pièces s'appelle « métal de base ».



*FIG.I.1 Le brasage [3].*

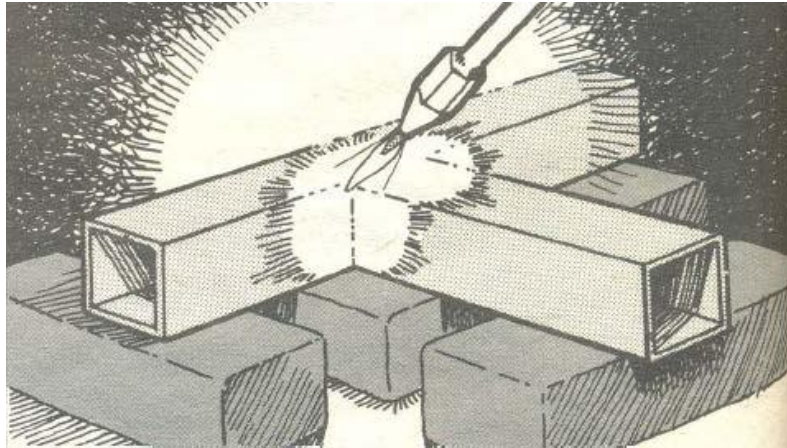
La pièce à souder est mise dans sa position définitive. L'endroit de la soudure est chauffé au chalumeau. De nombreuses sources de chaleur peuvent être utilisées : fers et lampes à souder, chalumeaux, fours, résistances électriques, inductions, bains chauffants, etc.

Au contact des éléments chauffés, le métal d'apport fond et pénètre par capillarité entre les surfaces à assembler, puis diffuse dans le métal de base.

Parfois la flamme d'un chalumeau est nécessaire pour assurer la fusion du métal d'apport. Cette technique s'appelle Soudo-Brasage.

Les alliages d'apport les plus couramment employés sont à base :

d'étain, plomb, cadmium, cuivre, argent. Leurs points de fusion doivent être inférieurs à celui du métal de base. Ces différents alliages sont disponibles sous formes de fils, baguettes-bandes et poudres



*FIG.I.2. Soudage au chalumeau [3].*

### **1.2. Le soudage autogène**

Le soudage autogène consiste à lier deux éléments d'un même métal par fusion locale. Les nombreux procédés de soudage autogène (appelé couramment « soudage ») sont classés en fonction de l'énergie mise en œuvre pour assurer la fusion locale des éléments à assembler.

Les sources d'énergies utilisées sont :

- Energie thermochimique : alluminothermie, combustion gazeuse
- Energie électrique : arc électrique, résistance électrique
- Energie mécanique : friction, pression, ultrasons
- Energie focalisée : bombardement électrique, laser.

### **1.3. Exemples**

#### **1.3.1. L'Aluminothermie**

La réaction chimique de l'aluminium en poudre et de l'oxyde de fer crée la chaleur nécessaire à la fusion locale des pièces à souder.

Ce procédé est très utilisé pour souder les rails de chemin de fer.

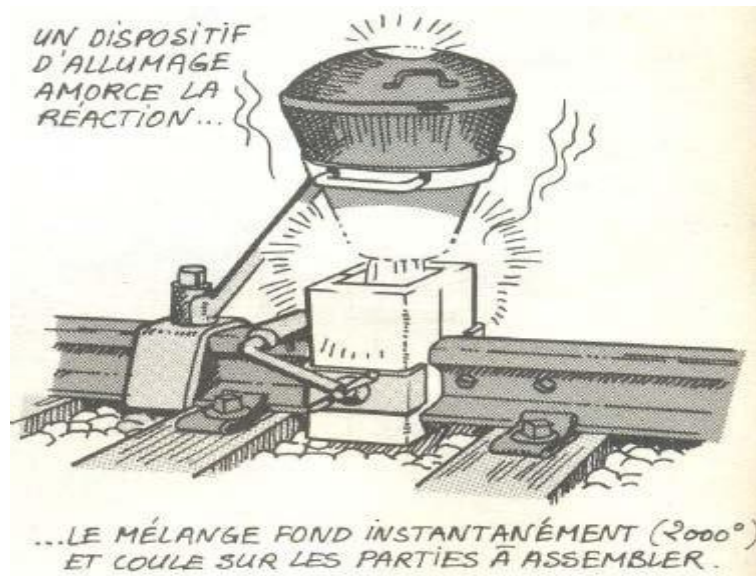


FIG.I.3. L'aluminothermie[3].

### 1.3.2. Soudage Oxyacétylénique (combustion gazeuse)

Une flamme obtenue à partir d'un gaz combustible (en général l'acétylène qui brûle par mélange d'oxygène), fournit la source de chaleur.



FIG.I.4. Soudage oxyacétylénique[3]

## 1.3.3. Le soudage à l'arc électrique

Un générateur d'électricité force les électrons libres à se déplacer dans le même sens à travers un conduit : c'est le courant électrique.

Pour que les électrons circulent, le circuit doit être fermé, si le circuit est ouvert, le courant ne passe pas car l'air n'est pas un conducteur.

L'arc électrique persiste tant que les électrodes restent à bonne distance l'une de l'autre.

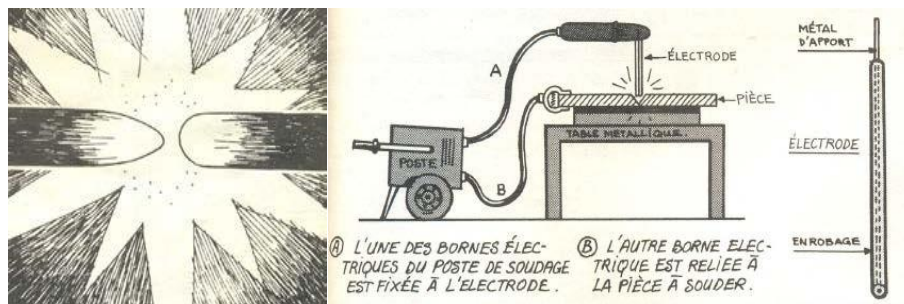


FIG.I.5. Schéma de fonctionnement (Soudage à l'arc électrique) [3]

## 2. Le clinchage

C'est une technique d'assemblage mécanique de tôles métalliques (3) et (4). Le principe de base est de connecter deux tôles métalliques par emboutissage entre un poinçon (1), guidé par une presse (2), et une matrice (5), et éjectées par un doigt (6). Les tôles subissent localement une déformation plastique à froid, formant un point de connexion. Le formage à froid est utilisé comme technique d'assemblage.

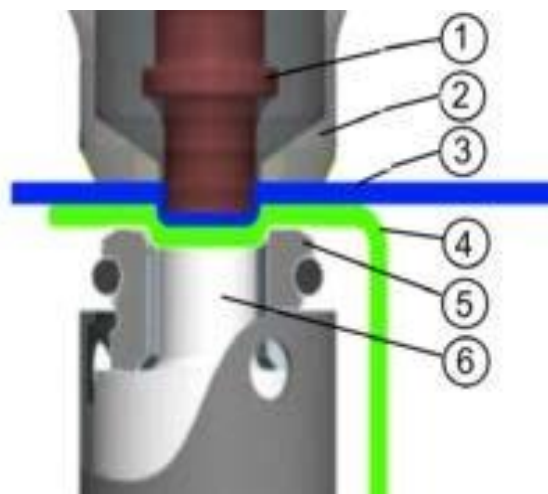


FIG.I.6. Le Clinchage[3]

## 3. Le frittage

C'est l'assemblage de deux pièces grâce à un ajustement serré. La pièce extérieure est appelée « frette », la pièce intérieure est dite « frettée ».

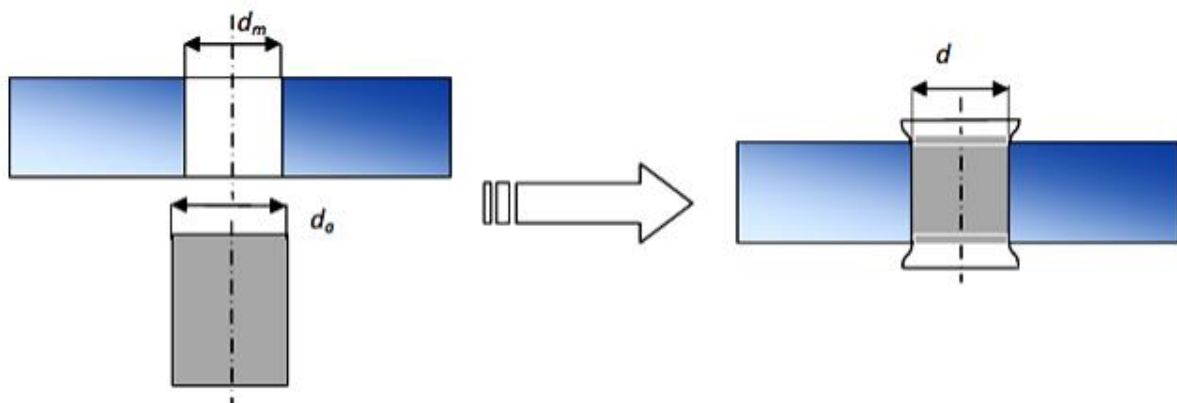
L'assemblage est réalisé avec des tolérances d'usinage qui interdisent son montage à la main ou même à la presse. La solution la plus simple, quand elle est possible sans détérioration du matériau, est de chauffer la frette pour la dilater avant de l'enfiler sur l'élément qu'il faut fretter. On peut à l'inverse refroidir l'élément intérieur à l'azote liquide ou à la glace carbonique pour le contracter et l'engager dans la frette, mais ces solutions sont plus onéreuses. Dans certains cas, par exemple pour des outils de frittage ou de forgeage, on est obligé de pratiquer en même temps la dilatation de la frette et la contraction de l'élément fretté.

Le frittage se pratique le plus souvent sur des pièces de révolution pour lesquelles il est plus facile de maîtriser les tolérances d'usinage et les contraintes engendrées dans les matériaux.

**Utilisation** : La plupart du temps on pratique le frittage pour assurer la cohésion d'un ensemble d'éléments ou pour éviter l'éclatement d'un élément sous pression.

Les cercles qui ceinturent les tonneaux pour assurer l'étanchéité des douelles, les bandages des anciennes roues de chars en bois, sont des frettes.

Les anneaux que l'on voit autour des parties basses des conduites forcées, ou ceux qui ceinturent les outillages de frittage, de filage par chocs, etc., sont également des frettes.



*FIG.I.7. Description du processus de frittage[4].*

## 4. Colles et adhésifs

Une colle est un produit chimique destiné à l'assemblage de deux matériaux. Liquide ou solide, on l'applique à l'état fluide sur le ou les matériaux à assembler sur lesquels elle doit donc d'abord accrocher par divers phénomènes physico-chimiques. Une différence existe entre les termes "adhésion" et "adhérence". En effet, on peut définir l'adhésion comme l'étude des mécanismes qui participent à la formation d'une interface plus ou moins forte et stable entre deux matériaux, alors que l'adhérence est la résistance à rupture de l'assemblage. Les colles et adhésifs se caractérisent donc par deux éléments essentiels l'adhésion et la cohésion finale.

On appelle colles, les colles plutôt traditionnelles telles que les colles à base d'amidon, de dextrines, ou d'origine animale (caséine) et aussi des colles synthétiques classiques telles que les colles vinyliques, à base de caoutchouc ou de latex [6].

### 4.1. Avantages et inconvénients du collage

Grâce à de nombreux avantages, le collage remplace souvent de nombreux procédés traditionnels d'assemblage boulonnage, rivetage, vissage, agrafage, soudage, brasage, sertissage, couture. Si le collage possède de nombreux avantages, il présente quelques inconvénients qu'il faut connaître pour ne pas en exiger plus qu'il ne puisse.

#### 4.1.1. Avantages

- Répartition plus régulière des contraintes ;
- Possibilité d'assembler des matériaux de nature et d'épaisseurs différentes ;
- Peu d'altération des matériaux au niveau du joint pas de température d'assemblage élevée, pas de percement des pièces, absence de corrosion électrochimique ;
- Élasticité des joints collés amortissement des vibrations ;
- Allègement des structures ;
- Amélioration de l'esthétique de l'assemblage ;
- Prix de revient généralement inférieur à un assemblage traditionnel ;

- Opération facilement automatisable permettant des grandes cadences de production.

## 4.1.2. Inconvénients

- Les techniques de collage sont mal connues des industriels, ingénieurs, bureaux d'études

- Conception spécialement adaptée des pièces.

- Bonne préparation des surfaces des métaux (des surfaces planes, propres et traitées.



*FIG.I.8. Colles et adhésifs [5].*

**Chapitre I      Recherche bibliographique sur les techniques d'assemblage  
mécanique**

---



---

## **Chapitre II**

---

# **État de l'art sur les assemblages collés**

---

## II.1 Introduction

La fonction principale d'un joint de colle dans un assemblage est de réaliser une liaison complète entre deux substrats avec lesquels il interagit. L'étude de ce type de liaison est complexe car elle nécessite un dialogue continu entre plusieurs domaines scientifiques. La caractérisation mécanique d'un adhésif peut être réalisée de manière massive ou dans un assemblage. De nombreux essais existent en dynamique. Ils diffèrent principalement par les moyens expérimentaux de sollicitation mis en œuvre et les vitesses de déformation qu'ils permettent d'obtenir. Toutefois, la plupart de ces essais sont dédiés à des études comparatives. Seuls quelques-uns permettent de fournir une identification partielle des propriétés matériaux de l'adhésif étudié. Dans cette partie, un état l'art sur les assemblages collés sera représenté dont le but de présenter l'influence de quelques paramètres sur la qualité de l'assemblage.

## II.2 L'effet de la force appliquée sur le joint à simple recouvrement

Plusieurs travaux ont été effectués dont le but d'étudier l'effet de la force appliquée [8] et [9] sur la répartition des contraintes de cisaillement et de pilage, la configuration du modèle du joint collé à simple recouvrement est représentée dans la figure ci-dessous (figure II.1) [8].

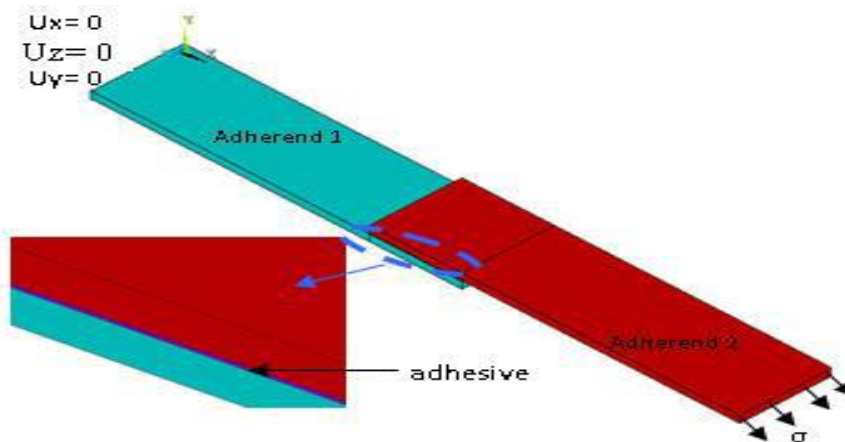


FIG.II.1 Configuration de joint à recouvrement unique tridimensionnel [8].

Les dimensions du modèle et les propriétés mécaniques utilisées sont regroupées dans le tableau (II.1 et II.2) [8].

Tableau.II.1. Les dimensions utilisées [8]

Matériau	Aluminium	Adhésif
Epaisseur mm	2	0,2
La Largeur mm	[75 25]	[25 25]

Tableau.II.2. Les propriétés mécaniques utilisées [8]

Matériau	Aluminium	Adhésif
Module de Young E(GPa)	72000	1200
Coefficient de poisson $\nu$	0.33	0.33

Dans cette étude les constituants du joint ont été modélisés par une loi de comportement elastoplastique. La (figure II.2) représente les courbes contrainte déformation des matériaux utilisés.

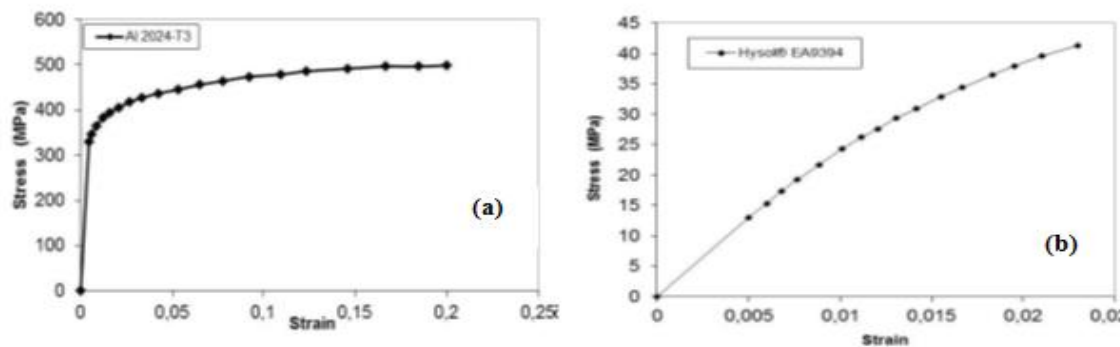


FIG.II.2 Courbe contrainte-déformation (a)-uniaxiale pour l'aluminium 2024-T3 (b)- l'adhésif Hysol® EA9394 [8].

Après la simulation numérique par la méthode des éléments finis avec le code de calcul ANSYS, il a déterminé la répartition des contraintes de cisaillement et de pillage le long de la longueur du joint collé. Les (figures II.3a et II.3b) représentent les résultats (la contrainte de pillage et de cisaillement) trouvés.

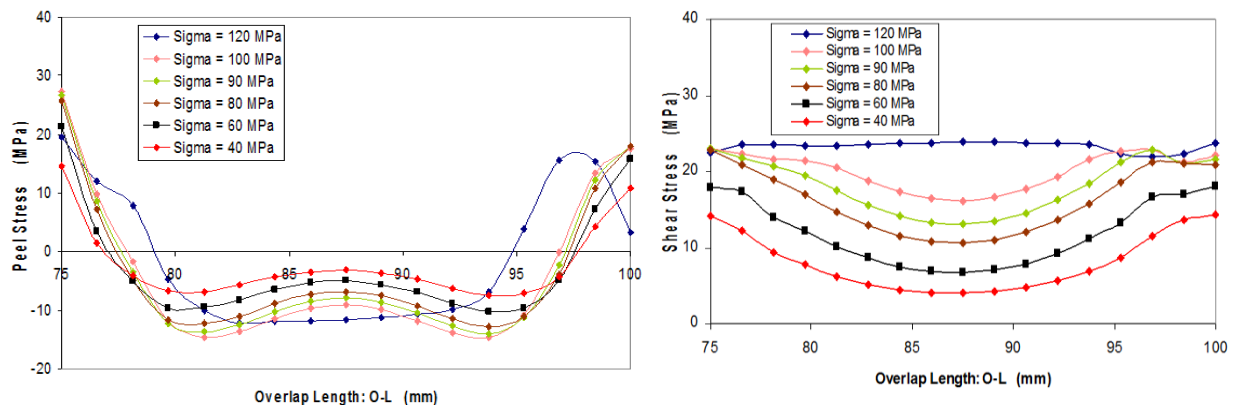


FIG.II.3 Répartition de la contrainte de (a)-pilage de l'adhésif sur la longueur de recouvrement Et (b)- cisaillement de l'adhésif sur la longueur de recouvrement [8].

Ces résultats ont été confirmés par l'analyse des contraintes de pelage et de cisaillement sur la longueur de recouvrement (O-L) dans l'adhésif, le long de l'interface adhésive-adhérente (O-L), ces composantes de contrainte sont hautement non symétriques. Ces figures montrent que le champ de contraintes le long de la ligne de liaison (longueur de recouvrement: O-L) est plus uniforme à l'écart des jonctions (coins). Les contraintes augmentent à travers la région de recouvrement lorsque les extrémités de la ligne de liaison sont approchées. Aux jonctions où existe l'ordre le plus élevé de singularité, les contraintes de pelage et de cisaillement présentent un comportement singulier fort.

### II.2.1 Conclusion

Cette étude a été réalisée afin d'analyser la répartition des contraintes d'adhésif interracial dans un joint à simple recouvrement sous différentes magnitudes de chargement de traction. Les résultats obtenus nous permettent de déduire les conclusions suivantes:

- le niveau de chargement affecte d'une manière significative sur la distribution des contraintes de pelage le long de la longueur de recouvrement.

- l'augmentation du niveau de chargement conduit à une diminution des valeurs de contrainte de cisaillement (Fig. II.3b) au milieu de la zone de recouvrement, mais la contrainte de pelage est plus élevée dans cette position (c'est-à-dire que la distribution de la contrainte de pelage est plus élevée au milieu de la longueur de recouvrement pour une valeur inférieure de chargement).

Dans le même contexte, le travail de [11], montre l'effet de chargement sur la performance d'un joint à simple recouvrement. Le modèle géométrique du joint adhésif collé à simple recouvrement est représenté dans la figure II.4. Dans ce modèle une l'analyse par éléments finis a été effectuée sur deux plaques minces en aluminium 2024-T3 assemblées par l'adhésif époxyde Adekit structural A140. Les dimensions associées sont comme suit, la longueur  $H=120\text{mm}$  des adhérents supérieurs et inférieurs, avec une largeur de  $W=25\text{mm}$ , l'épaisseur des adhérents  $e_t=2\text{mm}$ , l'épaisseur de l'adhésif  $e_a=0.2\text{mm}$ .

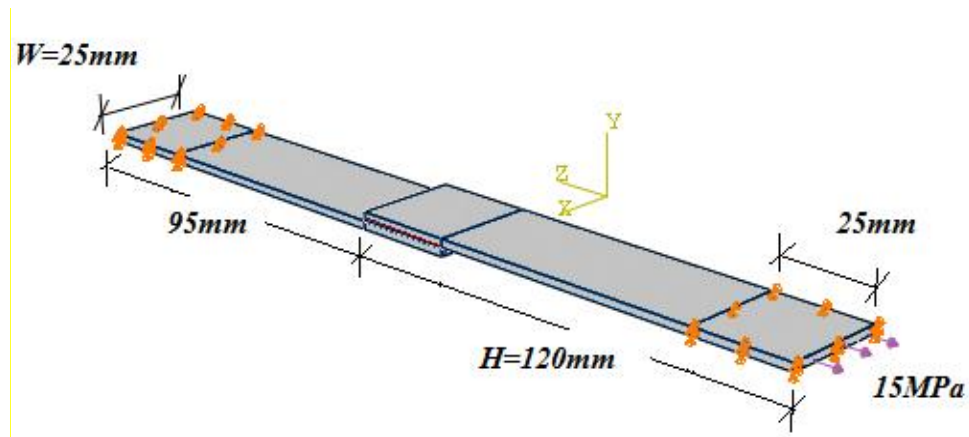


FIG.II.4 Modèle géométrique de joint adhésif collé à simple recouvrement [11].

Le modèle élément finis est représenté par la figure II.5. Cette dernière illustre le maillage utilisé dans cette étude.

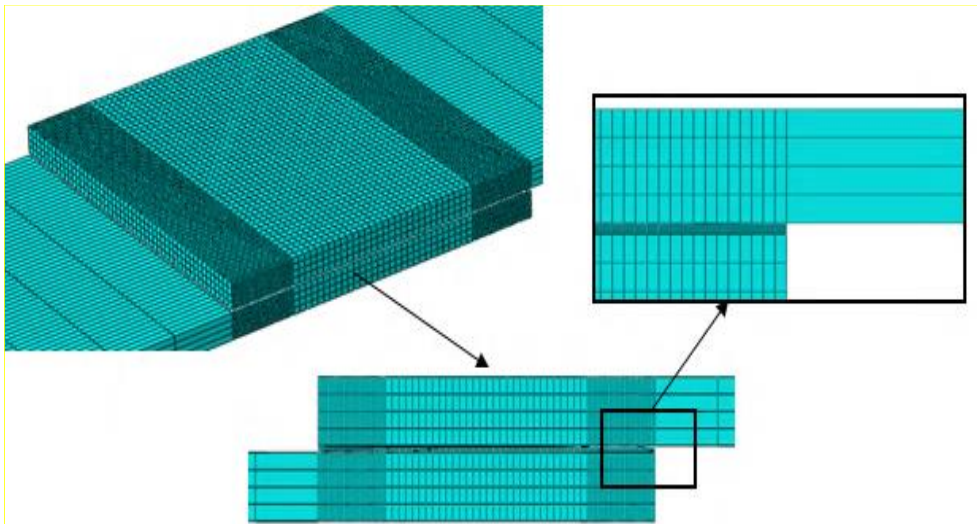


FIG.II.5 Maillage du joint adhésif collé à simple recouvrement utilisée [11].

Les propriétés mécaniques utilisées sont regroupées dans le tableau (II.3) [11].

**Tableau II.3 Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 2024-T3 et l'adhésif Adekit A140.**

Matériau	$\sigma_R$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	E(MPa)	A(%)	Y
Al 2024-T3	452	230	68800	2.4	0.33
Adekit A140	/	/	2692	5	0.3

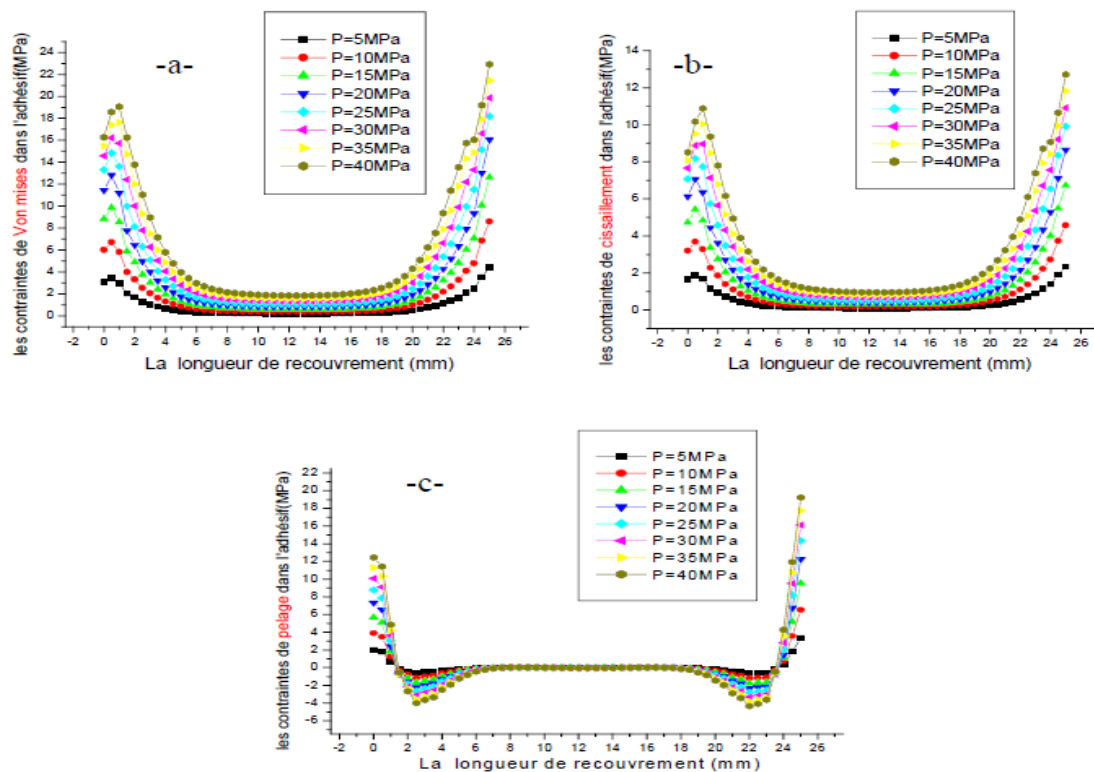
Le module de cisaillement de l'aluminium est égale à:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{68,8}{2(1+0,33)} = 26\text{GPa} \quad (01)$$

Le module de cisaillement de l'adhésif Adekit A140 est égale à:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{2,69}{2(1+0,3)} = 1GPa \quad (02)$$

Afin d'étudier l'effet de la variation de la charge sur la distribution des contraintes dans l'adhésif. On a introduit plusieurs niveaux de charge appliquée normalement à la section transversale du substrat. Les résultats de cette simulation obtenus sont illustres dans la (figure II.6). L'objectif principal est d'éviter des contraintes maximales qui dépassent la limite à la rupture dans la couche d'adhésif et de ramener l'adhésif à travailler dans le domaine plastique qui est bénéfique puisque l'adhésif travaille plus en cisaillement.



**FIG.II.6** Distribution des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement et c)- de pelage dans l'adhésif [11].

On constate d'après la (figure II.6) que la contrainte de Von Mises est toujours très importante aux extrémités de recouvrement et aux coins formés par ces extrémités et les bords libres de la plaque, pour un chargement de 40 MPa on a une contrainte maximale de 22.93MPa qui est une contrainte en dessous de la limite de la rupture.

D'une part, on note une augmentation des contraintes de cisaillement du fait de la forte déformation transversale des substrats (figure II.6), d'autre part, on remarque, que dans ces zones, une contrainte de pelage importante qui se forme à cause de la déformation longitudinale et latérale importante des substrats. On rappelle que pour des grandes charges, les substrats sont très fortement plastifiés et qu'une petite variation de charge provoque une

déformation substantielle qui est transmise à l'adhésif. Les valeurs maximales des contraintes pour différentes charges sont présentes dans le tableau (II.4).

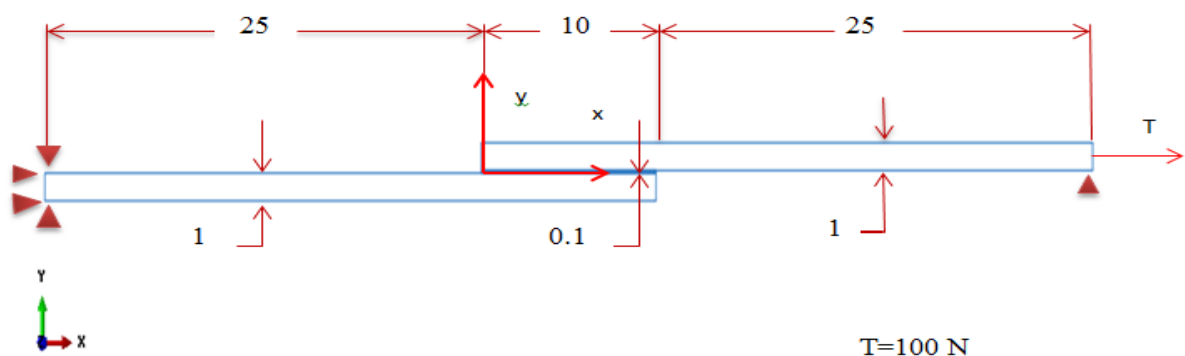
**Tableau II.4 Les valeurs maximales des contraintes de, Von mises, cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour différentes charges [11].**

Les contraintes maximales	P1 = 5MPa	P2 = 10MPa	P3 = 15MPa	P4 = 20MPa	P5 = 25MPa	P6 = 30MPa	P7 = 35MPa	P8 = 40MPa
Von Mises	4.40	8.60	12.64	16.12	18.25	19.86	21.46	22.93
Cisaillement	2.33	4.57	6.72	8.65	9.91	10.90	11.83	12.70
Pelage	3.37	6.55	9.57	12.35	14.45	16.10	17.73	19.22

D'après le tableau (II.4) on remarque que les contraintes maximales augmentent linéairement avec la charge ; c'est une fonction linéaire donc elle est proportionnelle à la charge. En outre toutes les contraintes sont concentrées aux niveaux des bords de l'adhésif alors que le cœur dans la plupart des cas reste inactif.

### II.3 L'effet de type de maillage

Dans ce qui passe nous avons fait un état de l'art sur les constituants d'un joint à simple recouvrement. La répartition des contraintes en fonction de type de maillage a été étudiée par [10]. Une simulation numérique a été réalisée par [10] dans le but de déterminer l'influence de type de maillage au niveau de l'adhésif [10]. Il a pris le modèle représenté ci-dessous :



**FIG.II.7 Joint à recouvrement simple [10].**

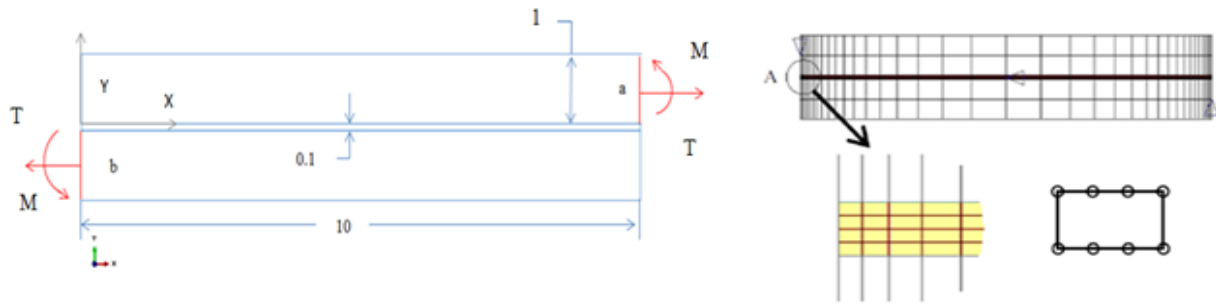


FIG.II.8 Modèle à tour unique analysé (à gauche), maillage dans le logiciel Fortran FE (à droite) [10].

Les propriétés mécaniques des matériaux constituant le joint à simple recouvrement et les caractéristiques du maillage utilisées sont regroupées dans le tableau (II.5 et II.6) successivement [10].

Tableau.II.5 Propriétés mécaniques des matériaux étudiés.

	Adhérents (acier)	Adhésif (époxy)
Young mod. [MPa]	21000	2150
Coefficient de Poisson	0.3	0.34

Tableau.II.6 Caractéristiques du maillage

	Fortran		Ansys Plane82
	ISO8	ANISO8	
Nœuds	953	981	5729
Éléments	288	288	1956

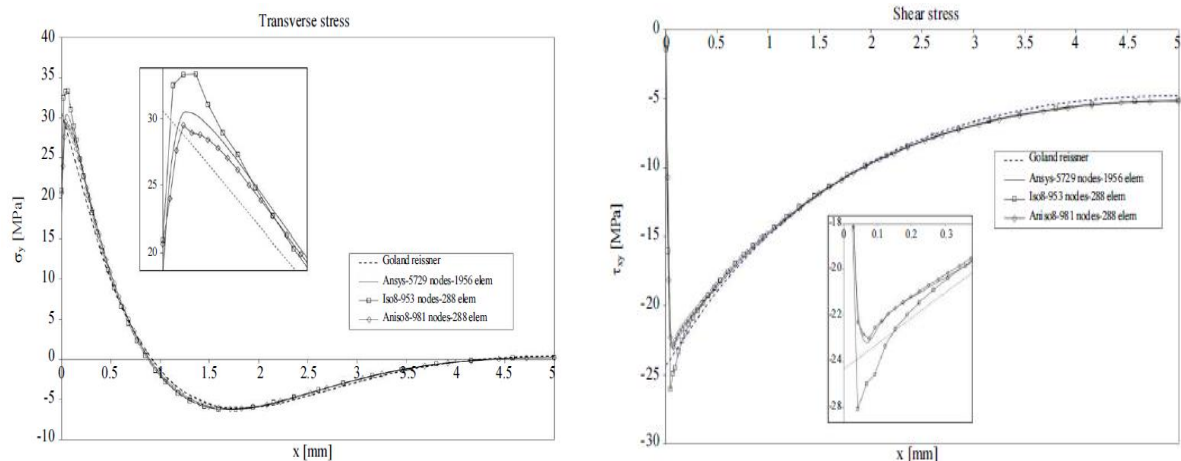
Les résultats obtenus après la simulation numérique sont représentés dans la (figure II.9). On remarque que la (figure II.9) montre les composantes de contrainte dans la section médiane de l'adhésif, obtenue par les différentes méthodes de calcul. On peut voir que:

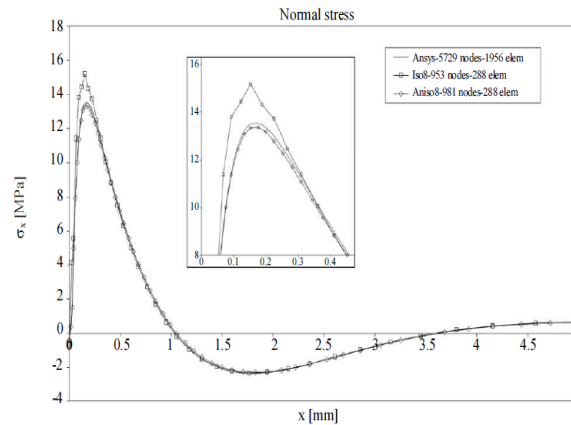
- Près de  $x = 0$  (II.9 a) la courbe relative à  $y$  obtenue par ANSYS est légèrement différent de celui obtenu par l'approche analytique grâce à la simplification hypothèses sur  $x$  introduites par Goland et Reissner; les valeurs calculées au moyen du l'élément ANISO8 reste au milieu entre les deux courbes mentionnées ci-dessus et fournissent une erreur référencée à la valeur



maximale inférieure à celle obtenue par l'élément ISO8 par rapport à ANSYS (3,3% contre 9,9%, respectivement) La contrainte de cisaillement (figure II.9b) obtenue au moyen de ANISO8 sont presque égaux aux résultats obtenus par ANSYS (erreur relative à la valeur minimale close à 0,5% contre 13,6% liés à l'analyse utilisant ISO8); ce comportement est appréciable aussi près du surface libre, où l'élément isotrope montre de plus grandes erreurs; selon formulation analytique (Goland et Reissner, 1944) en  $x = 0$   $\tau_{xy}$  devrait avoir un minimum, tandis que, au moyen de analyses, résultats pratiquement  $\tau_{xy} = 0$ , en raison de la principe de réciprocité, la surface externe étant sans charges

- L'erreur liée à la valeur maximale de  $x$  dans la (figure II.9c) estimable à partir des résultats obtenus par l'élément anisotrope, par rapport à ANSYS, est égale à 1,35%, tandis que celle donnée en utilisant l'élément isotrope est égal à 11,8%. Il apparaît donc clairement que l'anisotrope élément donne de meilleurs résultats que ceux donnés par l'élément isotrope ISO8 avec le même nombre des éléments et très proches de ceux obtenus par ANSYS utilisant des mailles très fines ayant six fois nombre total d'éléments.





**FIG.II.9** Contrainte dans la section médiane de l'adhésif dans le joint à recouvrement unique: (a)  $\sigma_y$ , (b)  $\sigma_{xy}$ , (c)  $\sigma_x$  [10].

### II.3.1 Conclusion

Un élément quadrangulaire plan à huit nœuds sans l'isotropie géométrique a été développé pour réaliser des 2D analyses FE des problèmes avec un stress élevé concentrations caractérisées par des lois très différentes selon deux directions orthogonales. L'objectif est de réduire le nombre total d'éléments et le calcul temps, obtenant la même précision dans les résultats qu'avec éléments isotropes.

Les analyses de référence sont effectuées dans certains cas de concentration de stress, pour comparer les résultats donnés par modèles maillés avec le même nombre d'isotropes et éléments anisotropes. Les résultats montrent que, pour atteindre la même précision, un plus grand nombre d'éléments isotropes est en effet nécessaire par rapport aux anisotropes ayant le même d.o.f. par élément.

De plus, l'élément anisotrope a également le avantage qui nécessite un point d'intégration de moins que élément isotrope pour effectuer le calcul exact de la matrice de rigidité; cela signifie qu'une itération moins de les routines de calcul sont nécessaires pour chaque élément; soit une réduction du temps de calcul d'environ 10% avec par rapport à une analyse équivalente utilisant des isotropes éléments est accessible.

Les avantages, en termes d'économie de ressources, de ce genre d'élément devient encore plus évident dans les cas d'analyses itératives (optimisation ou problèmes non linéaires), où la solution est obtenue par plusieurs

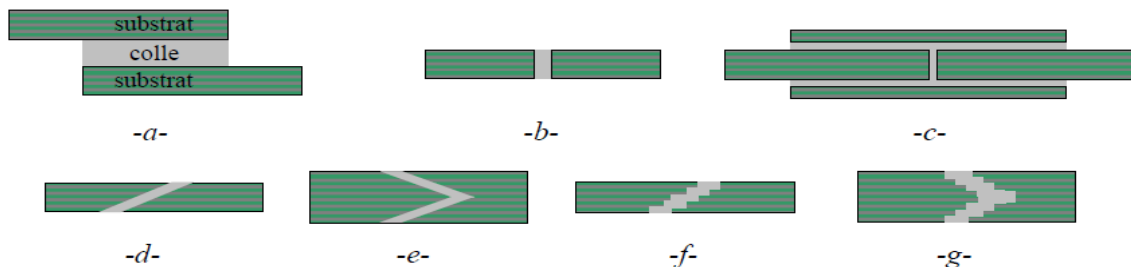
On trouve que le module anisotropes est le meilleur module pour modéliser pour l'assemblage collé.

## II.4 Différentes configurations dans la colle

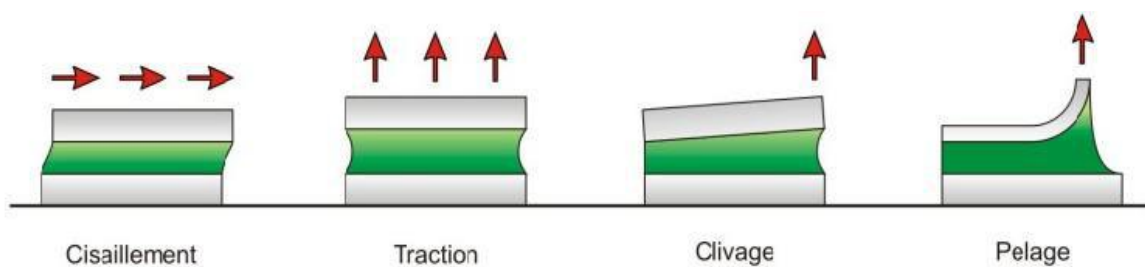
Cette technique d'assemblage consiste à solidariser par attraction moléculaire deux parties distinctes (substrats) avec un adhésif interposé. Plusieurs configurations de solidarisation sont envisagées, suivant la géométrie des adhérents, l'espace alloué, mais aussi suivant la force de la jonction, directement proportionnelle à la surface du collage.

La (figure II.10) passe en revue les configurations géométriques de collage de plaques.

La technique généralement mise en pratique est le recouvrement : rapide, sans traitement mécanique lourd et avec une surface de contact modulable par chevauchement.



**FIG.II.10 Configurations de collage de plaques de composites parallèles [Hart-Smith 2002] : -a- Recouvrement, -b- Joint en bout, -c- Joint en bout avec recouvrement, -d- Joint biseauté, -e- Joint biseauté double, -f- Joint en escalier, et -g- Joint en escalier double [12].**



**FIG.II.11 Différents modes de sollicitations mécaniques [12].**

---

## **Chapitre III**

---

# **Initiation à la méthode des éléments finis**

---

### III.1. Introduction

Les codes éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés lors de la conception et à l'analyse des produits industriels. Les outils d'aide à la modélisation devenant de plus en plus perfectionnés, l'utilisation de la méthode des éléments finis s'est largement développée et peut sembler de moins en moins une affaire de spécialistes. Il ne faut pas perdre de vue que l'analyse des résultats nécessite une bonne compréhension des différentes étapes mathématiques utilisées lors de l'approximation, pour pouvoir estimer l'erreur du modèle numérique par rapport à la solution exacte du problème mathématique. Sans oublier que le modèle numérique ne peut fournir que de résultats relatifs aux informations contenues dans le modèle mathématique qui découle des hypothèses de modélisation. Du point de vue pédagogique, ils sont suffisamment complexes pour mettre en avant les difficultés de mise en œuvre de la méthode. L'idée fondamentale de cette méthode est de discrétiser le problème en décomposant le domaine matériel à étudier en éléments de forme géométrique simple.

### III.2 Etude éléments finis

#### III.2.1. Définitions de la méthode des éléments finis

C'est une procédure numérique pour analyser les structures et les milieux continus. Habituellement le problème adressé est compliqué à résoudre d'une manière satisfaisante par des méthodes analytiques classiques [13].

#### III.2.2. Etapes de la méthode des éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, qui sont détaillées par la suite, sont les suivantes [14]:

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines.
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine.
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème.
- Assemblage des matrices élémentaires.
- Prise en compte des conditions aux limites.
- Résolution du système d'équations.

### III.2.3. Caractéristiques d'un élément fini

#### ➤ Les nœuds géométriques

Nous choisissons un ensemble de  $n$  points, sur le domaine  $V$ , qui servira à définir la géométrie des éléments. Ces points, appelés les nœuds géométriques, Elle coïncider éventuellement avec les nœuds d'interpolation. Puis nous remplaçons le domaine  $V$  par un ensemble de domaines  $V_e$  de formes relativement simples. (Voir figure III.1)

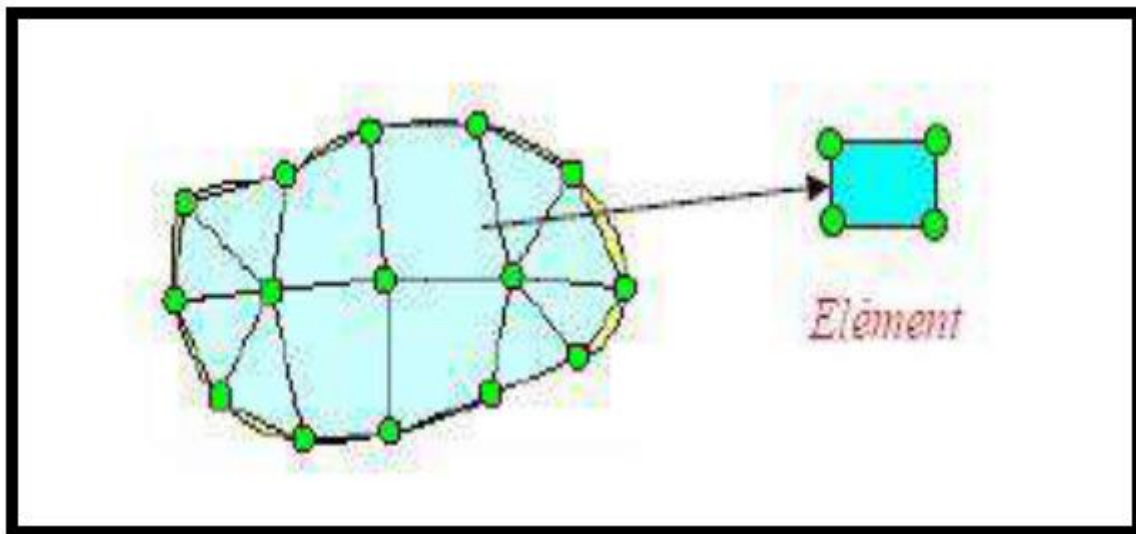


FIG.III.1. Domaine  $V$  discrétisé par sous domaine  $V_e$  [15].

#### ➤ Attributs d'un élément fini

Éléments finis permet d'isoler un de ces éléments pour l'étudier et établir les caractéristique

L'identification d'un élément fini comprend les points suivants :

1. **Géométrie** : un élément fini peut être un segment de droite ou de courbe, triangulaire ou quadrilatère (plan ou courbe), tétraèdre, prismes ou hexaèdre (brique). Les frontières entre les éléments peuvent être respectivement des points, des segments de droite ou de courbe, des faces planes ou courbes.
2. **Matériau** : le matériau de l'élément est défini par une loi de comportement (loi de Hooke isotrope...etc.).

3. **Nœuds** : les nœuds définissent la géométrie et assurent la connectivité des éléments les uns aux autres, ils occupent les sommets, les milieux des arêtes et faces, selon le type de l'élément et la théorie adaptée.
4. **Degrés de liberté** : la fonction d'approximation (ex : le champ de déplacements) est exprimée en fonction des valeurs particulières qu'elles prennent aux nœuds, valeurs qui deviennent les inconnues nodales. L'union, par leurs degrés de nodaux communs des différents éléments adjacents, permet de reconstituer la solution complète (assemblage) tout en veillant à respecter certaines règles, dites critères de convergence.
5. **Forces nodales** : à travers les nœuds transitent des forces associées aux degrés de liberté. Elles sont dues aux charges appliquées à l'élément (poids propre, charge uniforme, température....etc.).

Ces paramètres d'identification permettent de construire les deux caractéristiques clés d'un élément fini qui sont sa matrice de rigidité et son vecteur force.

#### III.2.4. Type des éléments finis

La sélection de l'élément sera fonction du type de problème à résoudre, généralement. Ils sont groupés en quatre classes [16]:

1. les déplacements et les déformations planes.
2. la flexion des plaques.
3. les coques.
4. l'analyse des solides (3D).

Nous distinguons trois familles correspondantes à des différents type d'éléments finis à une, deux, trois dimension :

- Les éléments unidimensionnels (1D) : barres, poutres rectilignes ou courbes utilisées de façon individuelle ou associées à des plaques pour modéliser les raidisseurs dans un voile.
- Les éléments bidimensionnels (2D) : élasticité plane (déformation ont contraint) on plaque en flexion, coques courbes, de forme triangulaire ou quadrangulaire.
- Les éléments tridimensionnels (3D) : éléments de volume ou coques épaisses

- Les éléments axisymétriques : qui constituent une classe bien particulière : toutes à section triangulaire ou quadrangulaire, coques conique ou méridienne courbe,

(Éléments de volume ou coques épaisses).

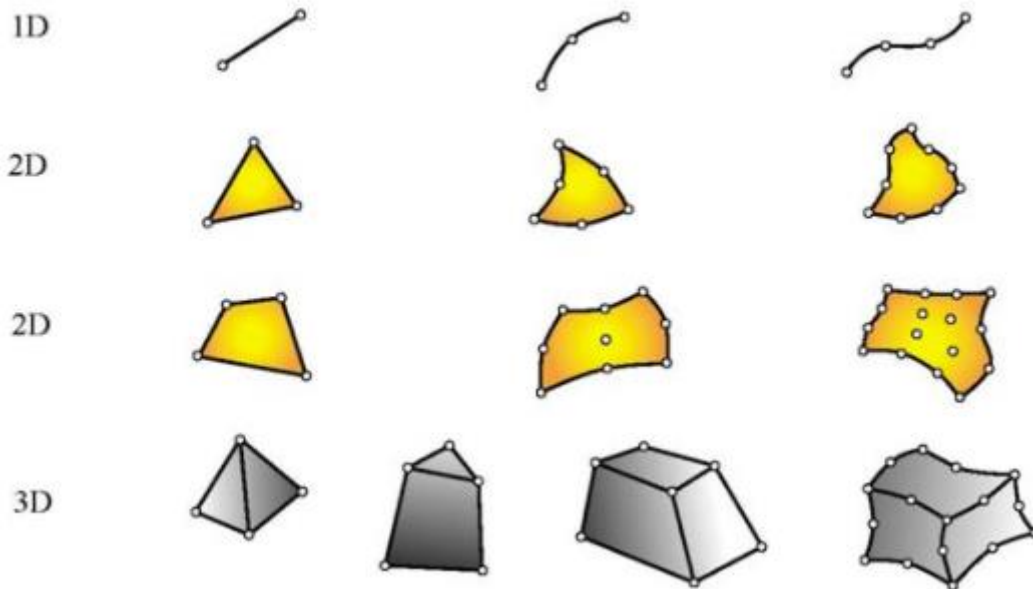


FIG.III.2. Les types d'éléments finis [14].

### III.2.5. Choix des éléments finis

Les éléments doivent s'adapter à la nature du problème à traiter, c'est-à-dire respecter les hypothèses et se conformer aux caractéristiques de la modélisation. Certains programmes offrent un choix très vaste, d'autres très limité. Il convient donc de passer en revue les particularités essentielles des éléments disponibles :

- Modèle (déplacement, équilibre, mixte, ...)
- Convergence (critères et taux)
- Degré (des divers champs)
- Nœuds, et inconnues aux divers nœuds
- Compatibilité des éléments les uns avec les autres
- Performances et limitations.



### III.2.6. Principes de la MEF

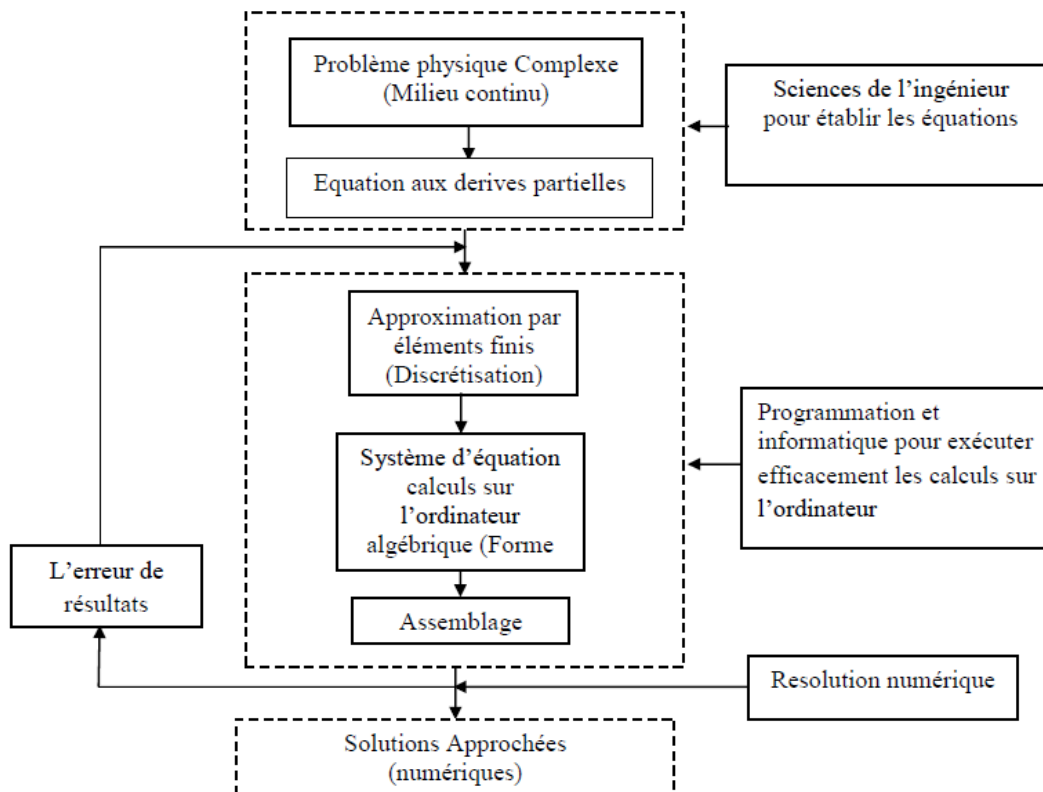


FIG.III.3. Principe d'analyse par la MEF [14].

### III.2.7. Domaines d'application de la MEF

- ✓ Modélisation des structures.
- ✓ Analyse linéaire (statique et dynamique).
- ✓ Analyse non linéaire (grands déplacements et rotations, grandes déformations, contact et frottement, flambage, ...).
- ✓ mise en forme des matériaux thermique (en régime permanent et transitoire,...).
- ✓ mécanique des fluides.
- ✓ Electromagnétisme.
- ✓ dynamique rapide (choc, impact, crash).
- ✓ optimisation des structures.

### III.2.8. Utilisation d'un Logiciel élément fini

Un programme général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes

complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d'exemple quelques noms de logiciels : NASTRAN, ANSYS, ADINA, ABAQUS, CASTEM 2000, CESAR, FORTRAN, etc. ...

Les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses [14]:

- ❖ Analyse linéaire ou non d'un système physique continu.
- ❖ Analyse statique ou dynamique.
- ❖ Prise en compte de lois de comportement complexes.
- ❖ Prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, électromagnétiques, de plasticité, d'écoulement, etc. ...) pouvant être couplés.
- ❖ Problèmes d'optimisation.
- ❖ Ils ne cessent de se développer !

L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimum, suivie d'applications pratiques sur des problèmes simples.

### III.3 Logiciel ABAQUS

#### III.3.1 Présentation du code ABAQUS

ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il est avant tout un logiciel de modélisation de problèmes très variés en mécanique. Simuler la réponse physique des structures soumises à des chargements, des températures, des impacts ou autres conditions extérieures, Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants des problèmes linéaires et problèmes non linéaires [17].

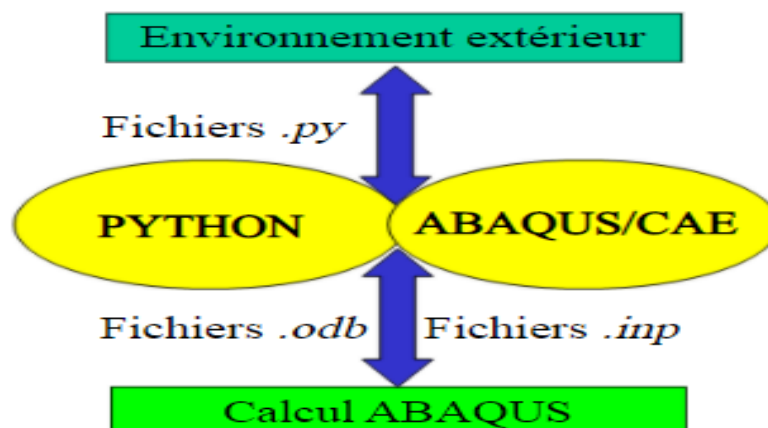


FIG.III.4 Schéma présente l'utilisation langage de script Python [21].

### III.3.2 Définition de logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS

L'ABAQUS est un code de calcul utilisant la méthode des éléments finis (MEF). Selon la méthode de résolution, ABAQUS compose de trois produits :

- ABAQUS/Standard : résolution par un algorithme statique implicite.
- ABAQUS/Explicit : résolution par un algorithme dynamique explicite.
- ABAQUS/CAE : constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solvers.

### III.3.3 Caractéristiques de logiciel ABAQUS

Description succincte des possibilités d'ABAQUS.

- ✓ Analyses.
- ✓ Éléments.
- ✓ Linéarités.

➤ **Type d'analyse**

Domaines physiques :

- Mécanique.
- Thermique.
- Electrique (Pièze et thermique).
- Problèmes couplés.

➤ **Problèmes**

- Statique et dynamique.
- Linéaires et non linéaires.
- Dynamique des corps rigides.

### III.3.4 Les éléments utilisés par ABAQUS

On distingue différentes grandes classes d'éléments [18]:

- Les éléments unidimensionnels (1D) : barre; poutre, rectiligne ou courbe
- Les éléments bidimensionnels (2D) : élasticité plane (contrainte ou déformation plane), plaques en flexion, coques courbes de forme triangulaire ou rectangulaire.
- les éléments tridimensionnels (3D) : de forme tétraédrique, hexaédrique...etc.
- les éléments axisymétriques : (pour les pièces présentant une symétrie de révolution au niveau de la géométrie et du chargement).
- les autres éléments : ressorts, amortisseurs, rigides.

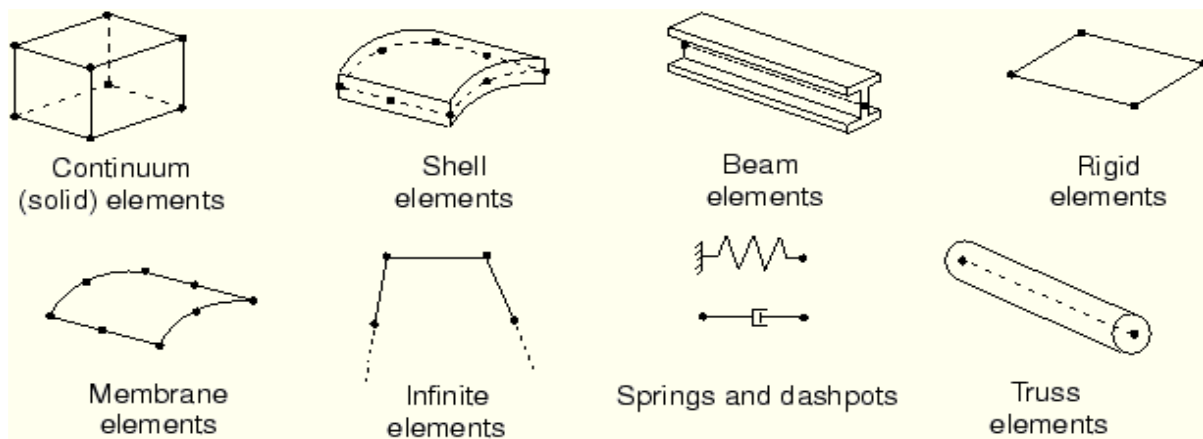


FIG.III.5. Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'ABAQUS [22].

### III.3.5 Réalisation d'une simulation numérique

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les

Modules [19]:

- Part      • Property      • Assembly      • Step      • Interaction      • Load      • Mesh
- Job (pour lancer le calcul)

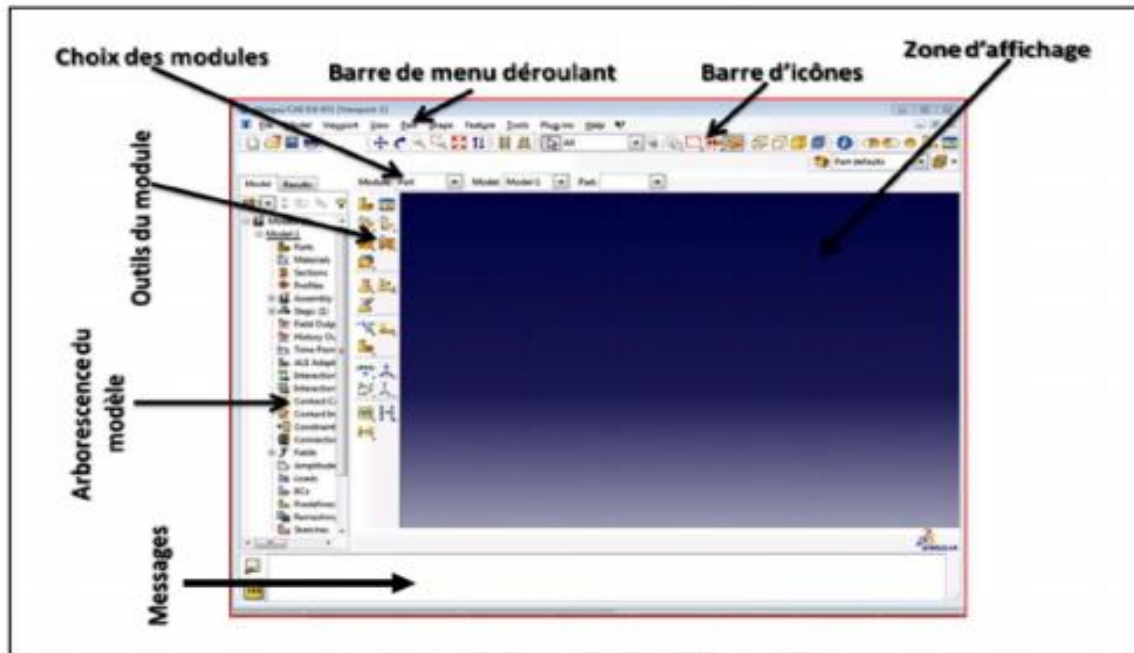


FIG.III.6. Les modules de logiciel ABAQUS [23].

### III.3.6 Les différents fichiers pour la simulation sous ABAQUS

#### 1. Fichier d'entrée (Input file) :

**Extension .inp** : contient des mots clés décrivant la géométrie, les matériaux, les conditions limites et les chargements de la structure étudiée.

- Avec un éditeur (fichier texte) ou programme en connaissant les divers mots clés de commande ABAQUS.
- Avec l'interface graphique ABAQUS/CAE.

#### 2. Fichier de résultats (output file) :

**Extension .odb** : Contient les contours et courbes de résultats.

### III.3.7 Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS

Avant de commencer à définir un modèle, vous devez choisir le système d'unités que vous utiliserez. ABAQUS n'a pas de système intégré d'unités. Toutes les données d'entrée doivent être spécifiées dans des unités cohérentes dans les résultats qui suivent le système d'unité et base sur SI (mm).

Tableau III.1. Les unités dans ABAQUS [24].

Quantité	SI	SI (mm)	SI	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Longueur	M	Mm	M	Ft	In
Force	N	N	kN	Lbf	Lbf
Masse	Kg	tonne ( $10^3$ kg)	tonne	Slug	lbf s <sup>2</sup> /in
Temps	S	S	S	S	s
Contrainte	Pa (N/m <sup>2</sup> )	Mpa (N/mm <sup>2</sup> )	kpa	Lbf/ft <sup>2</sup>	psi (lbf/in <sup>2</sup> )
Energie	J	mJ ( $10^{-3}$ )	kj	ft lbf	in lbf
Masse volumique	Kg/m <sup>3</sup>	tonne/mm <sup>2</sup>	tonne/m <sup>3</sup>	Slug/ft <sup>3</sup>	lbf s <sup>2</sup> /in <sup>4</sup>

### III.3.8 Structure d'une analyse sous Abaqus

Description de la structure d'ABAQUS:

- Structure et fonctionnement du logiciel
- Syntaxe du fichier d'entrée
- Fichiers produits par ABAQUS

#### 1. Le fichier d'entrée

Méthodes pour générer un fichier d'entrée (.inp):

- À la main (fichier texte)
- Avec ABAQUS/CAE
- Avec un logiciel annexe (I-DEAS, NASTRAN,...)

#### 2. Modularité

La modularité d'ABAQUS:

- Génération automatique de modèle
- L'analyse multi-étapes
- Utilisation de Python et de CAE

Automatisation et modularisation des modèles

- Utiliser les commandes \*INCLUDE et \*INPUT
- Utiliser Python et la commande \*PARAMETER
- Utiliser Python en conjonction avec CAE

---

## **Chapitre IV**

---

# **Résultats et discussions**

---

---

## IV.1 Introduction

L'analyse par éléments finis (FEA) est un outil important pour concevoir des joints mécaniques pratiques, tels que les assemblages collés. En fonction des dimensions de la structure, un modèle bidimensionnel a été généré à l'aide du logiciel commercial Abaqus 6.14 afin de déterminer les contraintes de cisaillement, normales et de pelage à l'interface.

Le non colinéarité des charges appliquées provoque une concentration des contraintes aux bords du joint adhésif qui reste toujours l'inconvénient majeur dans le sens de résistance et durée de vie des joints. La résolution de ce problème est basée sur l'une de ces deux méthodes ; changement des propriétés mécaniques des éléments constituant l'assemblage et modification de la géométrie de l'assemblage ; ce qui est le contexte d'une partie de notre travail. Dans ce chapitre, nous nous intéressons en premier lieu à la validation de notre modèle élément finis avec les modèles numériques et analytiques de la littérature.

Le deuxième objectif de ce travail, est d'essayer d'optimiser les paramètres géométriques et mécaniques de l'adhésif et la force supportée par le joint à simple recouvrement qui lui permet d'acquérir une résistance accrue en amoindrissant les valeurs des contraintes notamment de pelage, de cisaillement et normales. Un comportement élastique et a été entrepris pour tous les cas étudiés.

## IV.2 Validation du modèle éléments finis en comportement élastique linéaire

Tout d'abord, il est important de valider notre modèle élément finis. Notre étude permet de comparer les valeurs des contraintes obtenues par la méthode des éléments finis avec celles déterminées numériquement par [10] et analytiquement par [26]. Pour ce faire, considérons deux plaques minces de même nature de 1mm d'épaisseur et de longueur 35 mm assemblées par une colle d'époxy de longueur 10mm et d'épaisseur 0.1 mm, la plaque supérieur sollicitée à une force de traction comme elle est indiquée dans la figure ci-dessous figure (IV.1).



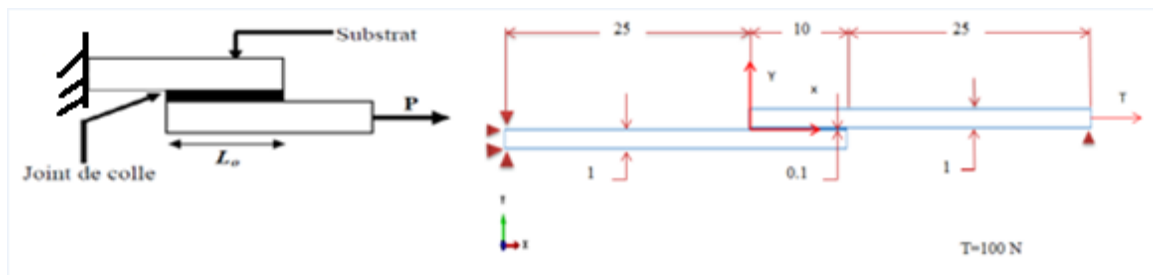


FIG.IV.1 Modèle géométrique d'un joint à simple recouvrement (les dimensions sont en mm)

[10].

### IV.2.1 Propriétés Mécaniques

Une analyse par la méthode des éléments finis bidimensionnels est présentée pour déterminer la distribution des contraintes dans le joint adhésif pour un assemblage type Acier/Acier.]. Ces substrats collés à l'aide de l'adhésif Epoxy. Les propriétés mécaniques des plaques et de l'adhésif sont regroupées dans le tableau IV.1. La plaque supérieure a été soumise à une force de traction dans la direction horizontale suivant l'axe "X-X" avec une amplitude  $T = 100 \text{ N}$ .

Les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans cette étude sont comme suit [10] :

Tableau IV.1 Propriétés des matériaux utilisés [10].

Matériau	Module de Young $E(\text{GPa})$	Coefficient de poisson $\nu$
Acier	210	0.3
Epoxy	2.15	0.34

### IV.2.2 Modélisation par Élément finis

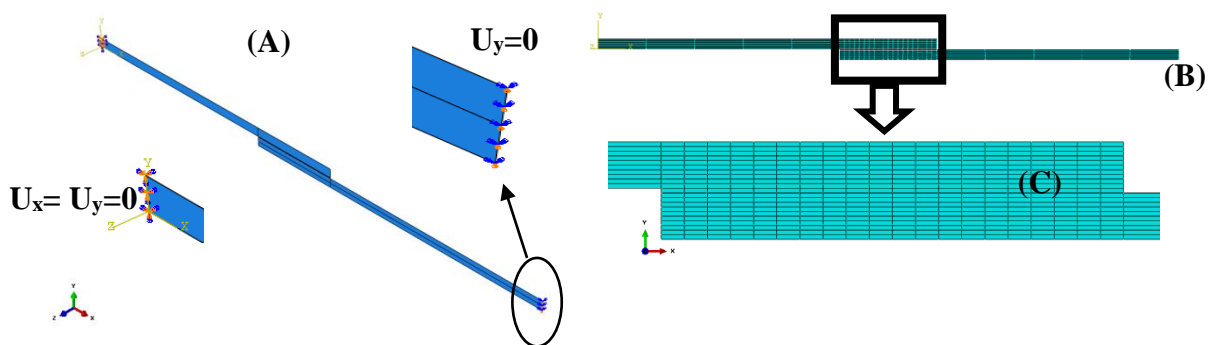
Un modèle par éléments finis bidimensionnel (2D) a été réalisé dans cette analyse. Pour cela, le code des éléments finis commercial Abaqus 6.14 a été utilisé pour modéliser l'assemblage collé.

Dans la figure (IV.2) nous avons représenté le maillage et les conditions aux limites du modèle étudié.

La plaque a été discrétisée par des éléments de type Quadratiques linéaires à 4 nœuds (CPS4R) figure (IV.2b). Alors, un maillage raffiné est utilisé au voisinage de zone de calcul (la zone de contact entre la colle et les deux plaques), pour obtenir des résultats précis et améliorer la représentation de champs de contraintes figure (IV.2c). Le nombre de nœuds et d'éléments est répertorié dans le tableau (IV.2).

**Tableau. IV.2** Nombre de nœuds et d'éléments de l'assemblage étudié (mm)

Taille de l'élément	Nombre d'éléments	Nombre de nœuds	Type d'éléments
0,1~5	520	614	Quadratiques linéaires à 4 nœuds (CPS4R)



**FIG.IV.2** Modèle EF de la plaque : (a) conditions aux limites ; (b) Modèle et maillage typique de 1/4 de la plaque ; (c) Maillage autour de la zone de contact.

### IV.2.3 Résultats et discussion

Dans cette partie, les contraintes de pelage, de cisaillement et normales ont été analysées le long de la zone de recouvrement dans l'adhésif par la méthode des éléments finis (2D-FEM). La figure (IV.3) présente la distribution des contraintes de von-Mises au niveau de l'adhésif uniquement. Les gradients de contraintes les plus élevés sont situés au voisinage des extrémités libres de la couche adhésive. On remarque dans ce cas que la contrainte maximale est fortement concentrée à l'interface entre l'adhésif et le substrat aux extrémités libres du joint à recouvrement simple. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait, une bonne adhérence au milieu de la zone de recouvrement et le risque de décollement (croissance de fissures) se situe dans le bord libre de l'assemblage collé. Ce comportement est en accord avec les observations expérimentales.

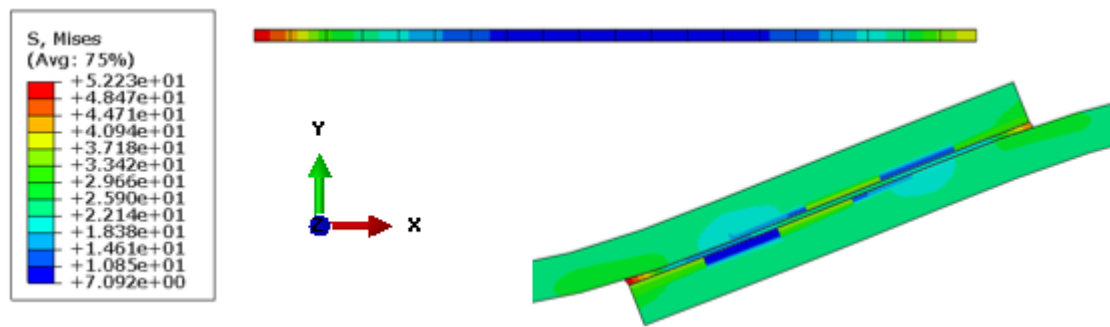


FIG.IV.3 Répartition des contraintes de Von-Mises dans l'adhésif.

Les résultats obtenus numériquement sont représentés dans la figure (IV.4). Cette dernière présente une comparaison entre la variation des contraintes de pelage, de cisaillement et normales le long de la moitié de la longueur de recouvrement dans la colle obtenus par la présente simulation numérique et celles obtenus analytiquement par [26] et numériquement par [10].

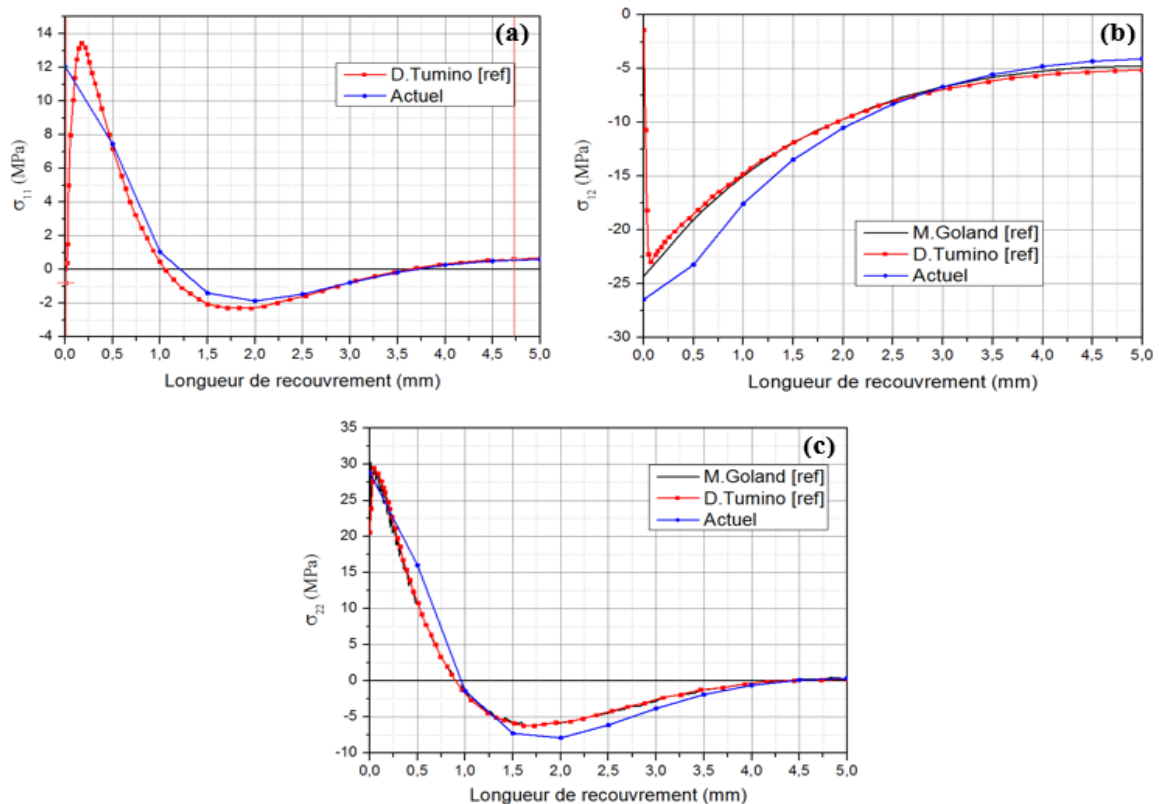
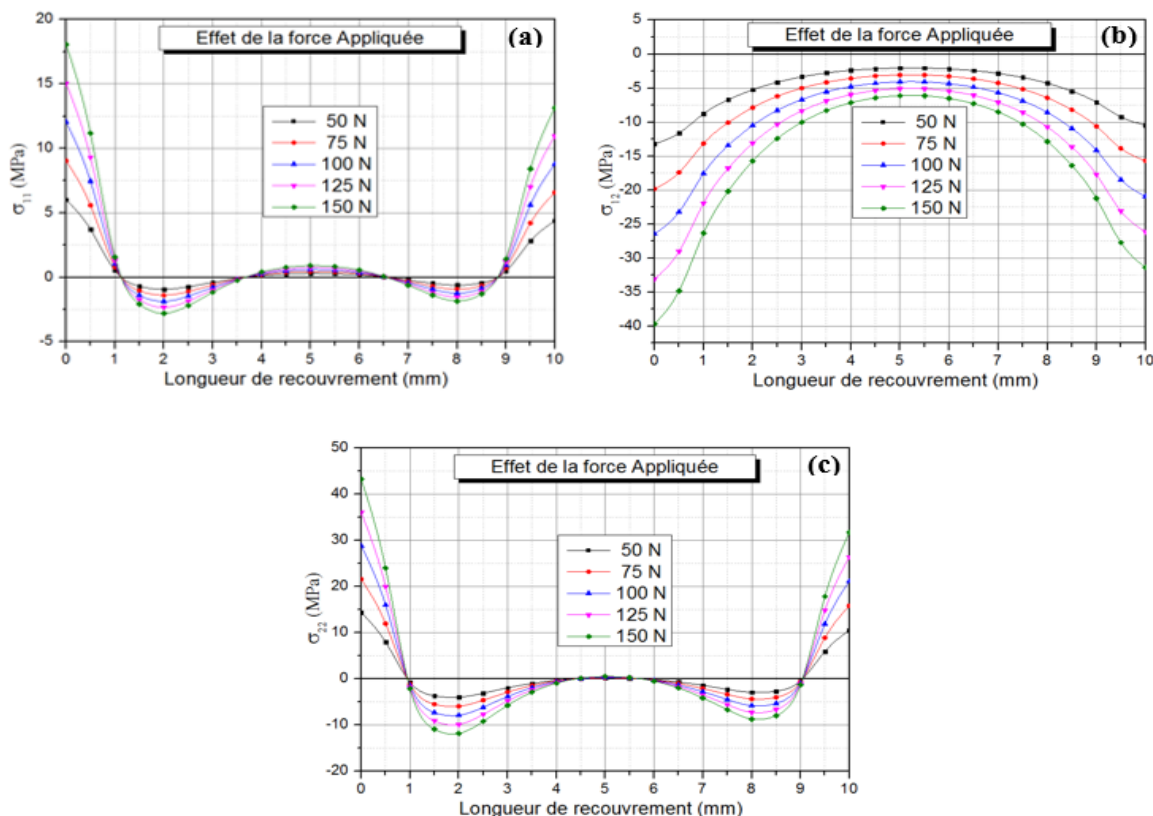


FIG.IV.4 Répartition des contraintes de l'adhésif sur la moitié de la longueur de recouvrement ; a) contraintes normales ; b) contraintes de cisaillement et c) contraintes de pelage.

On voit que les présents résultats concordent avec les résultats numériques et analytiques comparés et que les contraintes normales, de pelage et de cisaillement figure (IV.4a ; 4b et 4c) augmentent à travers la région de recouvrement lorsque les extrémités de la ligne de liaison sont approchées. Aux jonctions où existe l'ordre le plus élevé de singularité, les contraintes de pelage et de cisaillement présentent un comportement singulier fort. Ces contraintes (contraintes de pelage et de cisaillement) atteignent une valeur maximale à une courte distance de l'extrémité du joint à recouvrement simple.

#### IV.2.4 Effet de la force appliquée

Dans cette section, nous avons étudié l'influence de l'amplitude de chargement sur la répartition des contraintes de pelage, de cisaillement et normales le long de la longueur de recouvrement. Nous avons utilisé la même configuration avec différentes valeurs de la force de traction appliquée. D'après la simulation numérique, on a tracé les contraintes obtenues en fonction de la longueur de recouvrement pour les différents modèles dans la figure (IV.5).



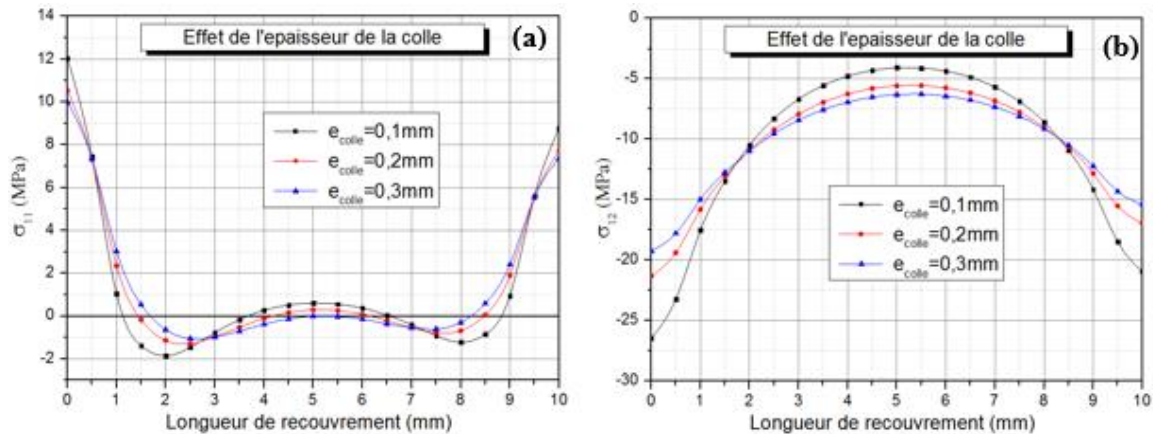
**FIG.IV.5** Distribution des contraintes de l'adhésif sur la longueur de recouvrement ; a) contraintes normales ; b) contraintes de cisaillement et c) contraintes de pelage.

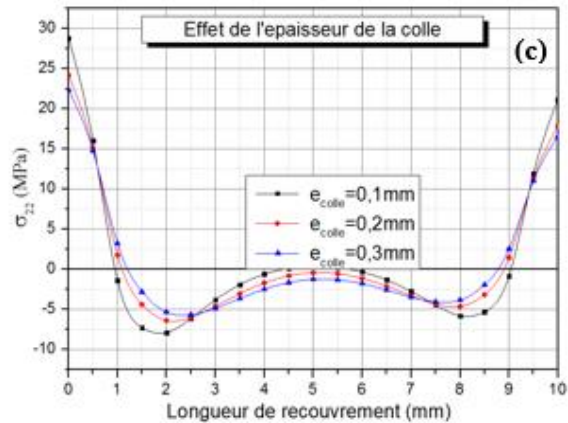
Une première observation à partir de la lecture de la figure (IV.5) est que la distribution des contraintes est symétrique par rapport au centre du joint d'adhésif suivant la longueur de recouvrement. Les valeurs des contraintes sont maximales aux extrémités du joint et peuvent atteindre des valeurs très importantes cas de contraintes de pelage et de cisaillement. Tandis que, elles deviennent presque nul dans la zone autour du centre du joint. Un comportement similaire a été observé pour tous les cas de chargement. On peut dire aussi que l'augmentation de la force appliquée affecte d'une manière significative sur la distribution des contraintes.

### IV.2.5 Effet de la géométrie de la colle

#### 1. Effet de l'épaisseur de la colle

Afin d'étudier l'effet de la variation de l'épaisseur de l'adhésif, On a réalisé trois configuration du joints a simple recouvrement. Un adhésif d'épaisseur 0.1, 0.2 et 0.3 a été modélisée dont le but de déterminer les contraintes dues au changement de l'épaisseur de la colle. Les résultats de cette simulation obtenus sont illustrés dans la figure (IV.6).





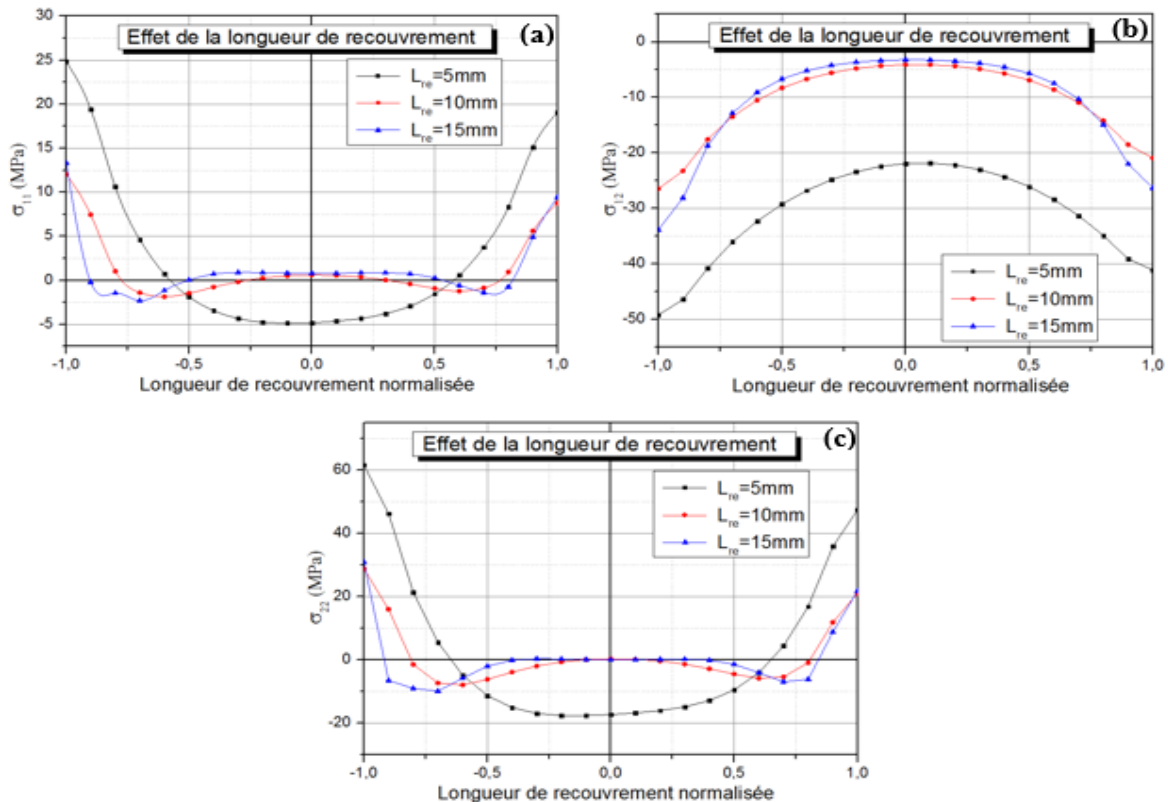
**FIG.IV.6** Distribution des contraintes du joint le long de la longueur de recouvrement pour différentes épaisseurs de l'adhésif ; a) contraintes normales ; b) contraintes de cisaillement et c) contraintes de pelage.

On remarque clairement que la distribution des contraintes est presque identique quel que soit la valeur de l'épaisseur de la colle, toujours on a des contraintes maximales au niveau des deux bords de l'adhésif. La résistance du joint colle augmente avec l'épaisseur de l'adhésif. On peut dire qu'il y a un développement des contraintes d'arrachement aux extrémités du joint, croissant avec l'épaisseur de l'adhésif.

## 2. Effet de la longueur de recouvrement

Pour déterminer l'effet de la longueur de recouvrement sur la répartition des contraintes de pelage, normales et de cisaillement pour un joint à simple recouvrement sous sollicitation de tension, les longueurs de recouvrement 5, 10 et 15mm ont été étudiés sous une force normale de traction  $T = 100\text{ N}$ .

Pour une meilleure explication. Nous présentons les répartitions des contraintes obtenues numériquement, le long de la longueur de recouvrement normalisée dans la Figure (IV.7). Dans cette dernière, pour une longueur de recouvrement normalisée, on assemble les courbes pour tous les cas de longueur de recouvrement. Ensuite, toutes les contraintes obtenues sont comparées.



**FIG.IV.7** Distribution des contraintes du joint le long de la longueur de recouvrement normalisée pour différentes longueurs de recouvrement ; a) contraintes normales ; b) contraintes de cisaillement et c) contraintes de pelage.

L'analyse des figures (IV.7 a ; b et c), permettent de constater que la valeur maximale des contraintes toujours située aux bords du joint. Cette dernière figure montre que la longueur de recouvrement influe significativement sur les valeurs des contraintes de pelage, de cisaillement et normales. En effet, les valeurs de ces contraintes sont plus élevées dans un joint à recouvrement simple avec une petite longueur de recouvrement ( $L_{rec} = 5\text{ mm}$ ) par rapport à une longueur de recouvrement très grande ( $L_{rec} = 15\text{ mm}$ ). Par la comparaison entre les différentes contraintes, la longueur de recouvrement optimale ( $L_{rec} = 10\text{ mm}$ ) est la longueur de la colle qui permet de supporter un effort maximal pour une surface collée minimale.

#### IV.2.6 Effet des propriétés mécaniques de la colle

Pour déterminer l'effet des propriétés mécaniques de la colle sur la distribution des contraintes le long de la longueur de l'adhésif pour un joint à simple recouvrement ; trois types de colle de différentes propriétés mécanique ont été examinés.

Le tableau(IV.3) regroupe les propriétés mécaniques des adhésifs utilisés [25].

Tableau.IV.3 Propriétés Mécaniques des adhésifs appliquées [25].

Matériau	Module de Young $E$ (GPa)	Coefficient de poisson $\nu$
Loctile hysol EA95	2.48	0.37
Cytel FM73	1.43	0.35
AF163-2K	1.10	0.34
Epoxy	2.15	0.34

La distribution des contraintes dans l'adhésif pour le joint à simple recouvrement modélisé avec la méthode d'élément fini bidimensionnel sont montrées dans la figure (IV.8).

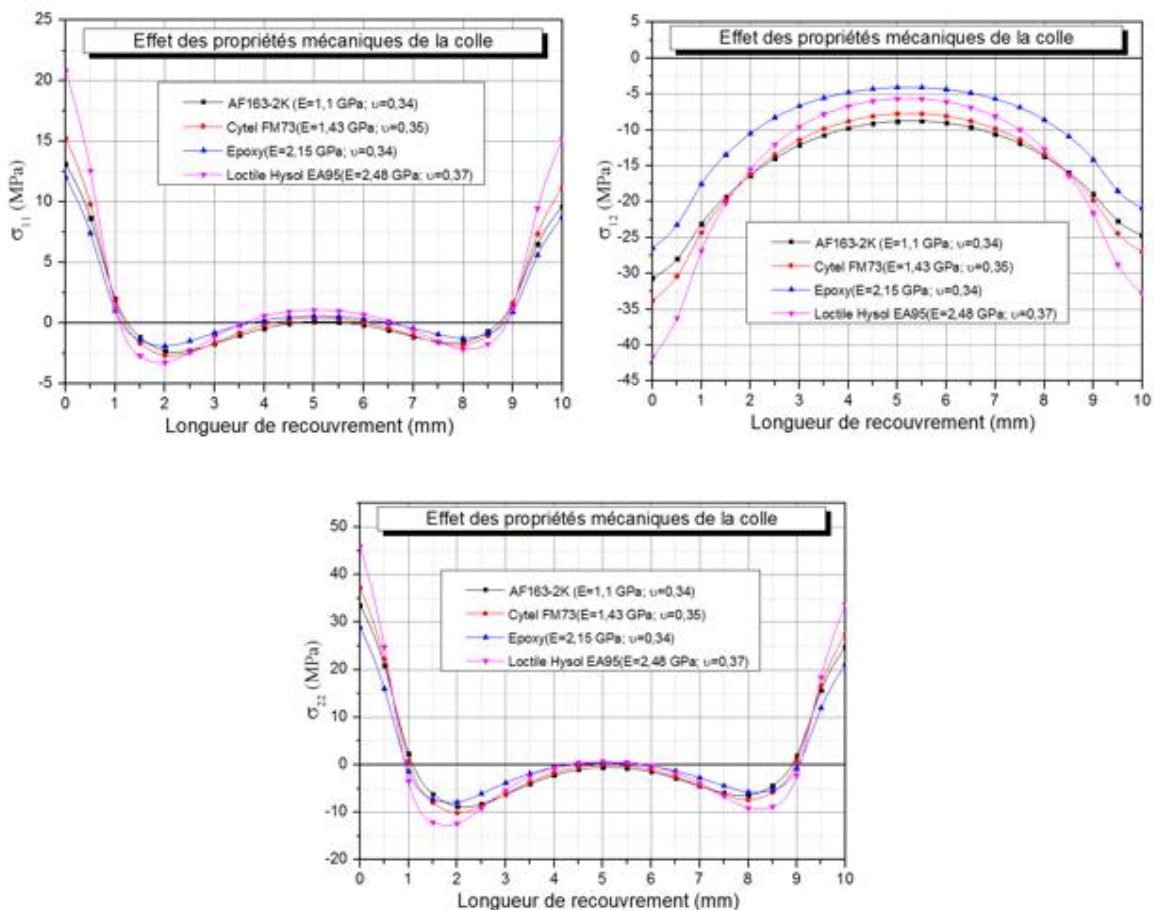


FIG.IV.8 Distribution des contraintes du joint le long de la longueur de recouvrement normalisée pour différentes longueurs de recouvrement ; a) contraintes normales ; b) contraintes de cisaillement et c) contraintes de pelage.



On peut observer que, la distribution des contraintes suit les mêmes évolutions, une concentration forte aux deux extrémités communes dans les bords libre du recouvrement. Cependant, les valeurs des contraintes normales sont négligeables relativement aux autres contraintes. Les répartitions des contraintes normales, de cisaillement et de pelage dans l'adhésif sont symétriques. Une forte concentration des contraintes a été remarquée au niveau du bord libre du recouvrement pour le cas d'un adhésif **Loctile hysol EA95** et faible concentration pour le cas d'**AF163 - 2 K** et **Cytel FM73**. Tandis que pour le cas de l'**époxy**, on remarque que la concentration des contraintes est très faible. Après cette analyse, on peut dire que, la résistance mécanique de tels assemblages est limitée par les propriétés de l'adhésif lui-même, et, admettons-le, la durée de vie de ces assemblages n'est jamais connue avec précision.

---

---

# **Conclusion générale**

---

---

Dans ce travail, le comportement mécanique d'un assemblage collé a été étudié par une analyse numérique de la répartition des contraintes normales, de cisaillement et de pelage. Plusieurs paramètres ont été mis en évidence à savoir l'effet de la force appliquée, les propriétés mécaniques et géométriques de l'adhésif.

Les principaux résultats de ce mémoire concernent :

- La réalisation d'un modèle numérique par élément finis pour simuler les joints à simple recouvrement soumis à une force de traction statique, nous permet d'établir la confiance dans les résultats des assemblages collés.
- Il existe une bonne corrélation entre les résultats les résultats obtenues numériquement par la méthode des éléments finis et ceux obtenues analytiquement.
- L'augmentation du niveau de chargement conduit à une augmentation des valeurs des contraintes normales, de cisaillement et de pelage.
- L'épaisseur de l'adhésif affecte d'une manière significative sur la distribution des contraintes. En effet, un adhésif épais conduit à une faible distribution des contraintes.
- La longueur de recouvrement optimale est la longueur de la colle qui permet de supporter un effort maximal pour une surface collée minimale.
- La résistance mécanique de tels assemblages collés est limitée par les propriétés mécaniques de l'adhésif lui-même.
- Pour tous les cas étudiés, les contraintes normales sont négligeables relativement aux autres contraintes.
- Les valeurs des contraintes sont maximales aux extrémités du joint.

---

---

# **Références Bibliographiques**

---

---

- [1] Etude du comportement des fils tréfilés à l'E.N.CAB Biskra, (2001).  
Mémoire d'ingénieur en construction mécanique. Université de Biskra.  
Réalisé par A. Labeled & F. El-Am, Encadré par Pr. Z. Boumerzoug.
- [2] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Assemblage mécanique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Assemblage_mécanique)
- [3] Cours de Technologie de base, 2ème année TCST, (1998). Dr. Brahim Nine, Univ. Biskra.
- [4] [http://dlibrary.univ\\_boumerdes.dz:8080/bitstream/123456789/1654/1/Kheloufi%2C%20Lakhdar.pdf](http://dlibrary.univ_boumerdes.dz:8080/bitstream/123456789/1654/1/Kheloufi%2C%20Lakhdar.pdf)
- [5] [BOU, 12] BOUTOUTAOU Hamdi. Etude d'un emmanchement fretté compte tenu de l'effet combiné des défauts de forme et d'état de surface, Thèse de doctorat de l'école nationale Algérienne polytechnique en cotutelle avec l'université de Bourgogne, France, soutenue le 24 janvier 2012.
- [6] [https://foad.ensicaen.fr/pluginfile.php/25831/mod\\_resource/content/1/Assemblages%20et%20tribo%20-%20collage%20et%20adh%C3%A9rence.pdf](https://foad.ensicaen.fr/pluginfile.php/25831/mod_resource/content/1/Assemblages%20et%20tribo%20-%20collage%20et%20adh%C3%A9rence.pdf)
- [7] <http://fst.univ-biskra.dz/images/stories/Technologie%20de%20Base%202%20ST.pdf>
- [8] A. Benhamena « Three-dimensional finite element analysis of fracture behaviour of adhesively bonded single lap-joints » Articl. Laboratory LPQ3M BP 305, University of Mascara, Algeria. ISSN 1392-1207. MECHANIKA. 2016 Volume 22(5): 371-375
- [9] ACHOUR Toufik « Renforcement des pales éoliennes par le collage d'un patch composite à double recouvrement » Article. Sciences de la technologie, Université des Frères Mentouri-constantine 1. October 30-31, 2016. « »
- [10] Davide Tumino « Mathematical Formulation and Numerical Implementation of a Finite Element with Anisotropic Geometry » Università degli Studi di Enna Kore, Facoltà di Ingegneria e Architettura, Enna, Italy. 13-03-2020
- [11] BENCHIHA Aicha « Simulation numérique de l'effet de la présence des défauts de collage sur le comportement des assemblages collés sous chargement en traction » THESE de Doctorat Génie Mécanique, Université DJILLALI LIABES SIDI BEL-ABBES, 2015
- [12] Élise GAY « Comportement de composites sous choc induit par laser : Développement de l'essai d'adhérence par choc des assemblages de composites collés » l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité « Sciences des Métiers de l'Ingénieur » 13 décembre 2011
- [13] ROBERT D. COOK, DAVID S. Malkus and Michael E. plesha, « Concepts and

- Applications of finite element analyses ». University of Wisconsin-Madison, John Wiley & Sons 1988.
- [14] « La Méthode Des Eléments Finis Cours 1 Notions Introductives ».
- [15] Yves Debard « Modélisation Numérique et Réalité Virtuelle », mémoire Master Université du Maine.
- [16] BATOZ J.L. ET DHATT G, « Modélisation des structures par éléments finis. Poutres et Plaques ». Vol. 2 : élastiques, Eds Hermès, Paris, 1990.
- [17] PATRICK ROZICHI. « Formation ABAQUS » Université de Nantes, France, 2007.
- [18] M. SARTOR, « Eléments finis » Notes de cours, Chapitre 01
- [19] MEFTEH KAMEL, « Cours : Introduction général au logiciel Abaqus » université de Biskra, 2013.
- [20] ABAQUS, ABAQUS Theory Manual, ABAQUS/CAE user's manual, vol. I Exemple. Problems Manual, version 6.10.
- [21] M. ABBAS, « Introduction au logiciel ABAQUS », 2012.
- [22] MICKAEL ABBAS. Principe et fonctionnement ABAQUS .université de technologie de Compiègne .2011.
- [23] ABAQUS. Formation sur le code de calcul ABAQUS – module Explicit, élève ingénieur ; université de Nantes. 2007.
- [24] Abaqus. Une brève introduction. ABAQUS/CAE 6.9.
- [25] Ricci F., Franco F., Montefusco N. (2011). “Bonded composite patch repairs on cracked aluminum plates: theory, modelling and experiments”. In book: Advances in Composites Materials - Ecodesign and Analysis, IntechOpen.
- [26] M. Goland, and E. Reissner, The stress in cemented joints. Journal of Applied Mechanics, 11, A17–A27, 1944.