

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

L mhrsdqd c d k Dmrdlf null dms Rt o qhlt q ds c d k Qdbyg dqbq d Rbldmslept d

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : Assemblages soudés et matériaux (ASM)

Par : HAYANI Kawther

Sujet

Etude du comportement mécanique de traction de la soudure à froid

Soutenu publiquement, le 09/ 06/ 2024, devant le jury composé de :

M. ACHOUÏ Mohammed	MCB	Université de Tlemcen	Président
M. BENSAÏD Ismail	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
M. MANGOUCHE Ahmed	MAA	Université de Tlemcen	Encadrant
M. BENHAMEL Abdelhamid	MAA	ESSA Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

Je remercie mon **Dieu** de m'avoir donné la force et la patience de mener à terme ce travail.

Je remercie également mes **Parents** et mon amie **FENDI Nour Elhouda**

Je tiens à remercier vivement **M. MANGOUCI Ahmed** pour m'avoir encadré tout au long de mon travail, ainsi qu'à **M. BENHAMEL Abdelhamid**.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers **M. ACHOUI Mohammed** pour avoir présidé le jury d'examen, ainsi qu'à **M. BENSAID Ismail** pour avoir pris le temps d'évaluer mon travail. Je ne saurais oublier de remercier l'ensemble du personnel enseignant du département de génie mécanique de la faculté de technologie.

Résumé

L'objectif de ce mémoire consiste à faire une étude expérimentale de l'essai de traction du collage par adhésifs des éprouvettes, sachant que cette soudure est largement utilisée dans le domaine de maintenance et de réparation. Il s'agit également de rechercher la résistance à la rupture de traction des éprouvettes soudées à froid afin de déterminer l'état et la qualité de cette soudure.

On a choisi cinq types de matériaux et deux types d'adhésif. Chaque éprouvette est constituée de même type de matière collée entre elles avec un type d'adhésif puis passée à l'essai de traction.

Une simulation des éprouvettes avec Abaqus est faite pour comparer les résultats trouvés.

Mots-clés : assemblage par adhésif, comportement mécanique, essai de traction.

Abstract

The objective of this thesis is to study the mechanical behaviour of adhesive bonding through tensile tests, knowing that this type of bonding is widely used in maintenance and repair fields. The aim is to determine the tensile fracture strength of the adhesive bonded specimens in order to assess the condition and quality of this bonding.

Five types of materials and two types of adhesive were selected. Each test piece shall consist of the same type of material glued together with a type of adhesive and then tested for tensile strength.

A simulation of the specimens is made with ABAQUS in order to compare the results obtained.

Keywords: adhesive bonding, mechanical behaviour, tensile test.

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة السلوك الميكانيكي للترابط اللاصق من خلال اختبارات الشد، مع العلم أن هذا النوع من الترابط يستخدم على نطاق واسع في مجالات الصيانة والإصلاح. الهدف هو تحديد قوة كسر الشد للعينات المرتبطة اللاصقة من أجل تقييم حالة ونوعية هذا الترابط.

تم اختيار خمسة أنواع من المواد ونوعين من المواد اللاصقة. ويجب أن تتكون كل قطعة اختبار من نفس النوع من المواد الملتصقة بنوع من المواد اللاصقة ثم يتم اختبارها لمعرفة قوة الشد.

تمت محاكاة العينات باستخدام ABAQUS لمقارنة النتائج التي تم الحصول عليها.

الكلمات الرئيسية: الترابط اللاصق، السلوك الميكانيكي، اختبار الشد.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1 Etapes métallurgiques du soudage de liaison par diffusion	3
Figure I. 2 Equipement d'un appareil de soudage par diffusion	3
Figure I. 3 Etapes fondamentales du processus de soudage par friction.	4
Figure I. 4 Schéma du soudage par friction malaxage.	5
Figure I. 5 Vue microscopique du joint de soudure par friction	5
Figure I. 6 schéma de soudage par explosion	6
Figure I. 7 Modele de zone de liaison des métaux soudés par explosion	7
Figure I. 8 Processus de soudage par impulsion magnétique	9
Figure I. 9 Soudage d'un tube en aluminium à un tube en cuivre par impulsion mécanique	9
Figure I. 10 Principe de soudage par ultrason	11
Figure I. 11 Micrographie de joint de soudure d'une tôle d'aluminium	11
Figure I. 12 Mécanismes d'adhésion	14
Figure I. 13 Diagramme schématique d'opération d'assemblage par adhésif	22
Figure I. 14 Types d'outils utilisés pour appliquer des adhésifs.	23
Figure I. 15 Schéma de contrôle non destructif par ultrasons par transmission	25
Figure I. 16 Schéma de contrôle non destructif par ultrasons à écho pulse.	25
Figure I. 17 Organigramme d'un système de contrôle de la qualité pour le assemblage par adhésif	27

Chapitre II

Figure II. 1 Diagramme de traction conventionnelle	34
Figure II. 2 Critère de Von Mises dans l'espace des contraintes principales	36
Figure II. 3 Critère de Tresca dans l'espace des contraintes principales	36
Figure II. 4 Représentation graphique des Critères de Tresca et de Von Mises dans le plan des contraintes principales	37
Figure II. 5 Types des joints pour l'assemblage pour adhésif	38
Figure II. 6 Joints pour matériaux flexibles	39
Figure II. 7 Types de contraintes dans les joints adhésifs	39
Figure II. 8 Force de traction sur le joint à recouvrement montrant	40
Figure II. 9 Modes de rupture des joints adhésifs	41
Figure II. 10 Charge de rupture expérimentale et contrainte des joints à recouvrement d'alliage phénolique/aluminium en fonction de la longueur de chevauchement L_a	42
Figure II. 11 Résistances typiques des joints à recouvrement sous charges d'un essai de cisaillement en utilisant divers adhésifs structurels en fonction de la température d'essai	43

Chapitre III

figure III. 1 Adhésifs utilisés	45
Figure III. 2 Eprouvates d'essai	46
Figure III. 3 Eprouvates assemblées par acrylique modifié	47
Figure III. 4 Eprouvates assemblées par epoxy	47
Figure III. 5 Machine de traction	48
Figure III. 6 Eprouvate placée dans la machine	48
Figure III. 7 Rupture cohésive des éprouvates assemblées par acrylique modifié	48
Figure III. 8 Rupture cohésive des éprouvates assemblées par acrylique modifié	49
Figure III. 9 Valeurs des forces de rupture des éprouvates en PE assemblées par époxy	49
Figure III. 10 Valeurs des forces de rupture des éprouvates en PE assemblées par acrylique modifié	50
Figure III. 11 Valeurs des forces de rupture des éprouvates en PVC assemblées par époxy	50
Figure III. 12 Valeurs des forces de rupture des éprouvates en PVC assemblées par acrylique modifié	52
Figure III. 13 Valeurs des forces de rupture des éprouvates en acier inox assemblées par époxy	53
Figure III. 14 Valeurs des forces de rupture des éprouvates en acier inox assemblées par acrylique modifié	54
Figure III. 15 Valeurs des forces de rupture des éprouvates en aluminium assemblées par époxy	55
Figure III. 16 Valeurs des forces de rupture des éprouvates en aluminium assemblées par acrylique modifié	56
Figure III. 17 Valeurs des forces de rupture des éprouvates en acier galvanisé assemblées par époxy	57
Figure III. 18 Valeurs des forces de rupture des éprouvates en acier galvanisé assemblées par acrylique modifié	58

Chapitre IV

Figure IV. 1 Dessin des éprouvates à recouvrement	56
Figure IV. 2 Dessin des éprouvates bout à bout	56
Figure IV. 3 Propriétés des matériaux	56
Figure IV. 4 Propriétés des matériaux	57
Figure IV. 5 Création des sections	57
Figure IV. 6 Création de step	58
Figure IV. 7 Création des charges et forces	59
Figure IV. 8 Module du maillage	59
Figure IV. 9 Module job	60
Figure IV. 10 Simulation de joint adhésif de la pièce en PE.	61

Figure IV. 11	Simulation de joint adhésif de la pièce en PE	62
Figure IV. 12	Simulation de joint adhésif de la pièce PVC.	63
Figure IV. 13	Simulation de joint adhésif de la pièce en PVC.	64
Figure IV. 14	Simulation de joint adhésif de la pièce en aluminium.	65
Figure IV. 15	Simulation de joint adhésif de de la pièce en aluminium.	65
Figure IV. 16	Simulation de joint adhésif de la pièce en acier galvanise.	66
Figure IV. 17	Simulation de joint adhésif de la pièce en acier galvanise.	66
Figure IV. 18	Simulation de joint adhésif de la pièce en acier inox.	67
Figure IV. 19	Simulation de joint adhésif de la pièce en acier inox.	67

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1 Types des adhésifs structurelles	15
Tableau I. 2 Propriétés des cinq adhésifs structurelles les plus utilisées	16
Tableau I. 3 Avantages des cinq adhésifs structurels les plus utilisées	16
Tableau I. 4 Limites des cinq adhésifs structurels les plus utilisées	17
Tableau I. 5 Domaines d'application des adhésifs	29

Chapitre III

Tableau III. 1 Dimensions des éprouvettes	46
Tableau III. 2 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblées par époxy.	49
Tableau III. 3 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblées par acrylique modifié	50
Tableau III. 4 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PVC assemblées par époxy.	50
Tableau III. 5 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PVC assemblées par acrylique modifié	51
Tableau III. 6 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier inox assemblées par époxy.	52
Tableau III. 7 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier inox assemblées par acrylique modifié	53
Tableau III. 8 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en aluminium assemblées par époxy.	54
Tableau III. 9 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en aluminium assemblées par acrylique modifié	55
Tableau III. 10 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier galvanisé assemblées par époxy.	56
Tableau III. 11 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier galvanisé assemblées par acrylique modifié	57

Chapitre IV

Tableau IV. 1 Caractéristiques physiques des matériaux	55
Tableau IV. 2 Caractéristiques physiques des adhésifs	55
Tableau IV. 3 Comparaison entre les résultats de simulation et les résultats pratiques.	68

Liste des symboles

σ : Contrainte normale.

ϵ : Déformation longitudinale.

L_0 : Longueur utile initiale de l'éprouvette.

L : Longueur de l'éprouvette pendant l'essai de traction.

K : Allongement.

F : Force de traction appliqué sur l'éprouvette.

S_0 : Section initiale de l'éprouvette.

S : Section de l'éprouvette dans la zone utile pendant l'essai.

R_e : Limite d'élasticité.

Z : Coefficient de striction.

$\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$: Contraintes principales.

Liste des abréviations

ISO : International Organization for standardization (Organisation Internationale de Normalisation)

ISO 9001: Internationally recognized Standard for Quality Managemet System- QMS (Systèmes de Management de la Qualité)

ASTM International: American Society for Testing and Materials

TWI: The Welding Institute, Cambridge-United Kingdom

ZAT : Zone Affecté Thermiquement.

CVCA : Chauffage, Ventilation et Conditionnement d’Air

UV : Ultra-Violet

PVC : Polychlorure de Vinyle

PE : Poly-Éthylène

Sommaire

Remerciements	I
Résumé	II
Abstract	III
ملخص	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VIII
Liste des symboles	IX
Liste des abréviations	X
Sommaire	XI
Introduction générale.....	1
Généralités sur le soudage à froid	2
Introduction	2
I. Généralités sur le soudage à l'état solide.....	2
1. Soudage par diffusion.....	2
2. Soudage par friction	4
3. Soudage par friction malaxage	4
4. Soudage par explosion	6
5. Soudage par impulsion magnétique	8
6. Soudage par ultrasons.....	10
II. Assemblage par adhésif.....	12
1. Définition	12
2. Histoire sur le soudage par adhésif	12
3. Théories d'adhésion	13
3.1. Théorie mécanique.....	13
3.2. Théorie d'électrostatique	13
3.3. Théorie de diffusion.....	13

3.4.	Théorie d'adsorption	13
3.5.	Théorie de la liaison chimique	13
3.6.	Théorie de la couche limite faible.....	14
4.	Types et classification des adhésifs.....	14
4.1.	Classification par type.....	14
4.2.	Classification par forme physique	19
4.3.	Classification par composition chimique.....	19
5.	Composition des adhésifs.....	20
6.	Processus D'application	22
6.1.	Prétraitement et préparation de surface.....	22
6.2.	Traitement de surface.....	22
6.3.	Méthode d'application	22
7.	Contrôle de qualité	23
7.1.	Contrôles non destructifs	23
7.2.	Contrôles destructifs	26
8.	Domaines d'application.....	27
8.1.	Industrie aéronautique.....	27
8.2.	Transports routiers et ferroviaires	28
8.3.	Industrie navale	28
8.4.	Électronique	28
8.5.	Réparation par patch composite.....	28
9.	Avantages	29
10.	Inconvénients.....	30
	Conclusion.....	31
	Chapitre II	32
	Introduction	33
1.	Rappel sur le comportement mécanique des matériaux.....	33

1.1. Courbe de traction	33
1.2. Contrainte vraie	35
1.3. Critères de plasticité	35
2. Conception des joints	37
2.1. Différents types de contraintes dans les joints adhésifs	39
2.2. L'analyse de rupture des joints adhésifs	41
3. Contraintes dans les joints adhésifs	41
3.1. Effet de géométrie et les propriétés de l'adhésif.....	41
3.2. Contraintes internes.....	43
Conclusion.....	45
Chapitre III	46
Introduction	45
1. Préparation des éprouvettes	45
2. Essai de traction	47
3. Résultats de l'essai de traction.....	49
3.1 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE.....	49
3.2 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PVC.....	50
3.3. Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier inox.....	52
3.4. Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en aluminium	54
3.5. Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier galvanisé.....	56
5. Interprétation des résultats	58
Conclusion.....	59
Chapitre IV	60
Introduction	54
1. Description de logiciel	54
2. Méthode de travail	55
2.1. Dessin des pièces.....	56

2.2.	Propriété des matériaux	56
2.3.	Création des sections	57
2.4.	Assemblage	57
2.5.	Création de step	58
2.6.	Création des charges et forces	58
2.7.	Module du maillage.....	59
2.8.	Module Job	60
3.	Résultats de simulation	61
3.1.	Résultats simulation de PE	61
3.2.	Résultats simulation de PVC.....	63
3.3.	Résultats simulation de l'aluminium.....	65
3.4.	Résultats simulation de l'acier galvanisé	66
3.5.	Résultats simulation de l'Acier inoxydable	67
4.	Interprétation des résultats	68
	Conclusion.....	69
	Conclusion générale	70
	Références	71

Introduction générale

L'assemblage est un processus qui consiste à assembler des pièces individuelles pour fabriquer un composant ou un assemblage plus grand et plus complexe. Il existe différentes méthodes d'assemblage, telles que le soudage, la fixation mécanique et la soudure à froid, qui sont utilisées pour créer des joints temporaires ou permanents. Lors de l'utilisation de fixation mécanique et de soudure à froid, il n'y a généralement pas de réactions chimiques qui se produisent. Cela en fait un bon choix pour joindre différents matériaux les uns des autres, ainsi que pour joindre des composés de matrice de polymère qui ne peuvent pas gérer des températures élevées.

Ce travail consiste à élaborer une étude du comportement mécanique de l'assemblage par adhésif par essais de traction. Afin d'atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

- **Premier chapitre** : résume des généralités sur divers procédés de soudage à l'état solide, suivie d'une exploration à l'assemblage par adhésif, y compris son contexte historique, les mécanismes et les théories d'adhésion, ainsi que les classifications et les types avec les compositions chimiques des adhésifs, les méthodes de contrôles et qualité et une vue d'ensemble sur leurs domaines d'applications ainsi que de leurs avantages et inconvénients.
- **Deuxième chapitre** : présente le comportement mécanique des joints adhésif, couvrant des aspects tels que la conception des joints et la répartition des contraintes.
- **Troisième chapitre** : décrit la partie expérimentale qui comporte les essais de traction des éprouvettes.
- **Quatrième chapitre** : représente la simulation par ABAQUS.

Bg` o hsqd

Généralités sur le soudage à froid

Introduction

L'assemblage par adhésif est un procédé à l'état solide capable d'assembler délicatement deux pièces sans avoir besoin de la chaleur intense d'un chalumeau. Il évite les problèmes que l'on peut rencontrer lorsqu'on essaie de fusionner deux métaux aux points de fusion différents, qui peuvent parfois conduire à des soudures fragiles ou fissurées. Au lieu de cela, il crée une liaison solide et durable en utilisant simplement des liaisons atomiques formées par des électrons libres

I. Généralités sur le soudage à l'état solide

1. Soudage par diffusion

Le soudage par diffusion se distingue parmi les différentes techniques d'assemblage à l'état solide car il réalise le soudage sans l'utilisation d'une interface liquide ou du processus de fusion et de ré-solidification [3]. Plus spécifiquement, ce type de soudage implique la coalescence de deux matériaux dans des conditions spécifiques :

- Le soudage se produit à une température inférieure à la température de fusion T_f des matériaux à assembler (généralement $> 0.5 T_f$).
- La coalescence des surfaces en contact se produit sous des charges qui ne provoquent pas une déformation significative [3].

1.1. Principe et mécanisme

Ce procédé implique une séquence métallurgique en trois étapes :

- **La phase I** : implique la croissance de la zone de contact par la déformation localisée de surface, rugosité de surface, limite d'élasticité, écrouissage, température et pression sont des facteurs influençant cette phase (voir Figure. I.1.a).
- **La phase II** : implique la réduction et l'élimination des espaces (voir Figure. I.1.b).
- **La phase III** : consiste à déplacer les bordures de l'inter-grain et tous les vides restants sont submergés car ils n'ont plus de contact avec ces bordures (voir Figure. I.1.c).

La figure I.1 illustre les étapes métallurgiques du processus de soudage par diffusion [3].

- (a) le contact initial : limité à quelques inégalités (température ambiante).
- (b) Première étape : déformation de surface par flux plastique et fluage.
- (c) deuxième étape : diffusion grain-frontière des atomes vers les vides
- (d) troisième étape : diffusion volumique des atomes vers les vides.

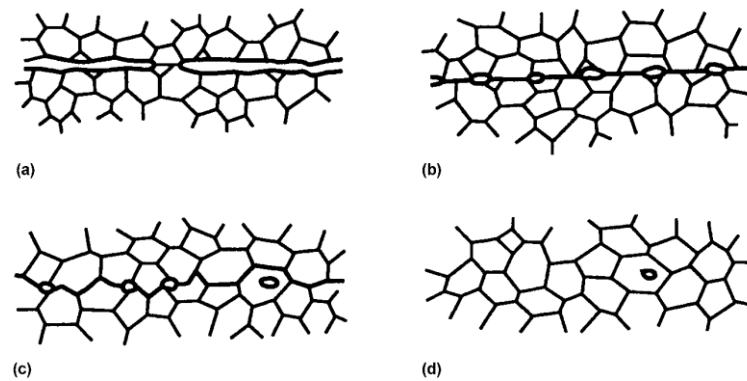


Figure I. 1 Étapes métallurgiques du soudage de liaison par diffusion [3].
 (a) le contact initial : limité à quelques inégalités (température ambiante).
 (b) Première étape : déformation de surface par flux plastique et fluage.
 (c) deuxième étape : diffusion grain-frontière des atomes vers les vides
 (d) troisième étape : diffusion volumique des atomes vers les vides.

La figure I.2 illustre un exemple d'un appareil de soudage par diffusion.

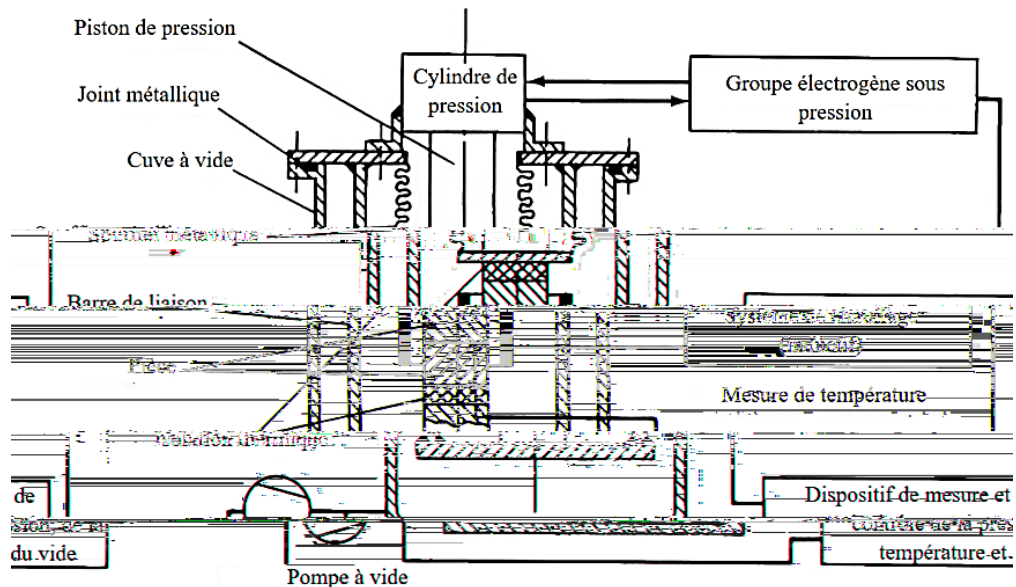


Figure I. 2 Équipement d'un appareil de soudage par diffusion [3]

1.2. Avantages et inconvénients :

Les avantages de ce procédé consistent à :

- Permet l'assemblage de matériaux qui ne peuvent pas être soudés par fusion.
- Possibilité d'assembler différentes formes de surfaces.
- Procédé automatisé.

Il peut également avoir quelques inconvénients, comme :

- Les coûts élevés des équipements
- Exige la propreté et la précision des surfaces
- Nécessite beaucoup de temps,

2. Soudage par friction

Le soudage par friction est un procédé qui convertit l'énergie mécanique en énergie thermique aux interfaces des pièces. La figure I.3 illustre les étapes fondamentales du processus de soudage par friction, il s'agit de maintenir une pièce non rotative en contact avec une pièce rotative sous pression jusqu'à ce que l'interface atteigne la température de fusion. La vitesse de rotation, la pression axiale et le temps de soudage sont des paramètres contrôlant la chaleur et la pression à la soudure pour former la soudure. Ces paramètres sont nécessaires et permettant la diffusion atomique et formant une liaison métallurgique.

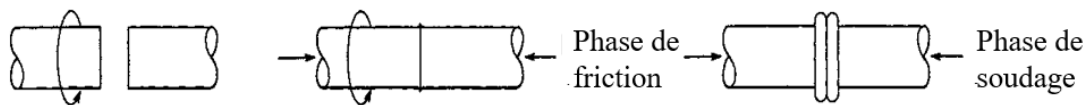


Figure I. 3 Étapes fondamentales du processus de soudage par friction [3].

Il existe deux méthodes principales, le soudage par contrôle direct et le soudage par inertie. La première méthode implique un moteur fonctionnant à vitesse constante pour alimenter la soudure. La deuxième méthode, utilise l'énergie stockée dans un volant d'inertie pour alimenter la soudure. Le facteur de vitesse de frottement est ce qui fait la différence entre ces deux types, dans le cas soudage par inertie, la vitesse diminue continuellement pendant l'étape de frottement, tandis que la vitesse reste constante dans le cas de soudage par contrôle direct. Le soudage par friction peut être utilisé pour assembler des métaux de propriétés thermiques et mécaniques variables, et également pour les alliages ferreux et non ferreux.

3. Soudage par friction malaxage

Un nouveau procédé de soudage a été développé appelé soudage par friction malaxage. Ce procédé utilise un outil de forme conique en acier trempé. La conception de l'outil joue un rôle important dans l'influence des charges du processus, du flux de matériau, de la température de la zone de processus et de la qualité de la soudure. Le processus nécessite des pièces rigides avec des bords arrondis et une plaque de support pour résister aux forces descendantes.

3.1. Principe de soudage

L'outil pénètre dans le plan de joint et tourne et mélange intimement les matériaux lors d'une opération qui s'apparente au forgeage ou à l'extrusion, créant une colonne cylindrique de métal autour de pion, ce qui entraîne une liaison microstructurale à grain très fin. Cet outil

contient un épaulement de plus grand diamètre au-dessus de pion, qui contrôle la profondeur de pion et crée un chauffage par frottement supplémentaire sur la surface supérieure de la pièce. La figure I.4 illustre le schéma du soudage par friction malaxage [3].

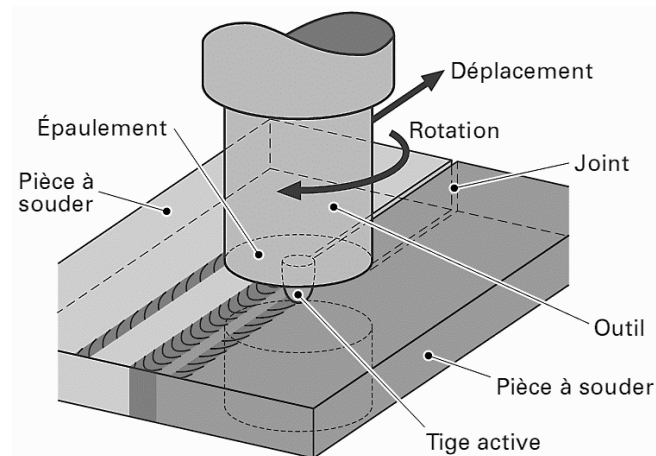


Figure I. 4 Schéma du soudage par friction malaxage [4].

La figure I.5 montre vue microscopique du joint de soudure par friction.

Ce procédé a été utilisé dans diverses applications industrielles, y compris les réservoirs de carburant des navettes spatiales (Boeing Delta II), les coques de navires et les trains à grande vitesse.

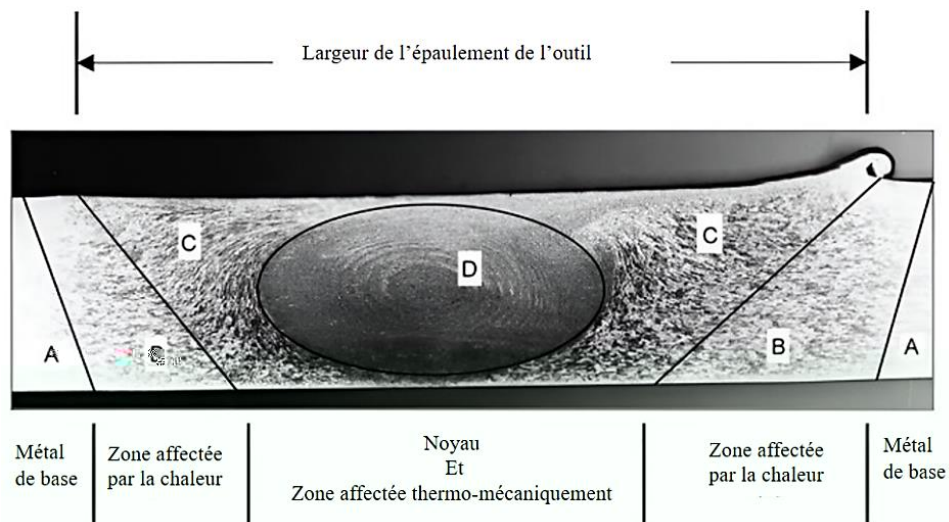


Figure I. 5 Vue microscopique du joint de soudure par friction [3].

3.2. Avantage :

- La capacité de souder bout à bout, à recouvrement et par angle.
- La capacité de souder des alliages qui sont difficiles à souder par fusion.

- La capacité de joindre des alliages dissemblables.
- L'élimination des fissures dans la ZAT (zone affectée thermiquement).
- Manque de porosité de soudure.
- Aucune utilisation des métaux d'apports.

4. Soudage par explosion

Le soudage par explosion est une méthode d'assemblage des métaux sans les fondre, en utilisant une force explosive pour créer une forte liaison entre deux composants. Ce processus implique l'utilisation d'une couche explosive pour créer un jet puissant qui élimine toutes les impuretés entravant le processus de liaison. La liaison résultante entre les métaux a une interface ondulée distinctive, mettant en évidence le flux de plastification qui se produit pendant le soudage [3]. La figure I.6 illustre un schéma de soudage par explosion.

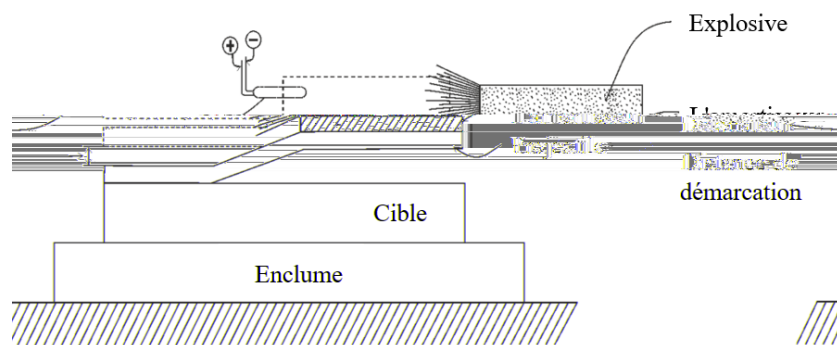


Figure I. 6 Schéma de soudage par explosion [3].

4.1. Explosifs et détonation

Les explosifs utilisés dans ce procédé sont contrôlés par des facteurs tels que :

- La composition des explosives,
- Densité d'écoulement,
- Épaisseur de la couche,
- Teneur en humidité,

Les performances de détonation doivent être adaptées aux combinaisons de métaux ou d'alliages à souder, en tenant compte de la densité, l'épaisseur et de la vitesse sonique du composant supérieur et du composant de base (inférieure). Le processus de détonation commence au détonateur et progresse dans l'explosif à une vitesse connue sous le nom de vitesse de détonation [4].

4.2. Caractéristiques de soudage

La morphologie des soudures par explosion, a un impact significatif sur la qualité et la résistance de la liaison, ce qui les rend appropriées pour assembler des matériaux dissemblables en raison de leur manque de la zone affecté thermiquement. La figure I.7 illustre la morphologie des soudures par explosion qui varie de plat à turbulent ondulé, en fonction du taux de détonation et de l'énergie. Les interfaces plates, obtenues avec des taux de détonation plus lents, produisent des liaisons plus lisses, mais ne sont pas couramment utilisées en production en raison de limitations pratiques. Les propriétés mécaniques de l'interface de soudage par explosion déterminent la résistance et la durabilité des matériaux soudés. Les essais de résistance au cisaillement mesurent la résistance à l'interface, généralement supérieure à celle des métaux de base. La résistance à la traction par épaisseur est importante [4].

4.3. Domaines d'application

Largement utilisé dans la production de grandes plaques plaquées dans :

- Récipients sous pression,
- Echangeurs de chaleur,
- Procédés électrochimiques.
- Construction navale
- Raccords de tuyauterie cryogéniques,
- Aérospatiale et aéronautique,
- Emballage électronique.

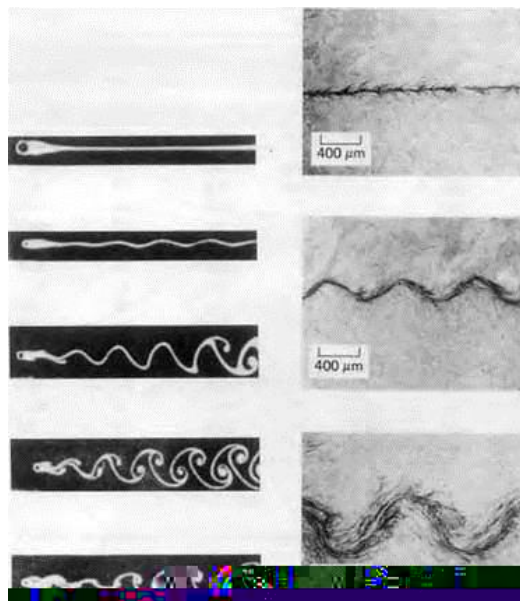


Figure I. 7 Modèles de zone de liaison des métaux soudée par explosion [4].

4.4. Avantages

- Assembler des métaux du même type, ainsi qu'à toute combinaison de métaux, mais exige que les composants aient une ductilité et une résistance aux chocs suffisantes pour une déformation rapide.
- N'augmente pas la température des métaux.
- Préservant leurs microstructures et leurs propriétés mécaniques.
- C'est un moyen d'assembler les métaux tout en maintenant leur intégrité et leur résistance à la corrosion.

5. Soudage par impulsion magnétique

C'est une technique de soudage à l'état solide qui ressemble au soudage explosif. Ce procédé innovant implique la collision oblique à grande vitesse de deux pièces, résultant en une configuration de soudage à recouvrement. En alignant les pièces en parallèle, la pression d'impact optimale et les paramètres de soudage sont atteints. La méthode exploite la force répulsive générée par les champs magnétiques opposés dans les conducteurs adjacents, qui est déchargée à travers une bobine pour propulser les pièces vers un état de soudage à froid [5].

5.1. Principe de soudage

La formation d'impulsions magnétiques est un processus sans contact avec un petit espace entre la bobine et la pièce de travail, entraîné par un circuit primaire. Il crée un fort champ magnétique transitoire près de la bobine, provoquant une répulsion électromagnétique. Cette force peut déformer la pièce et l'accélérer à des vitesses élevées. Les matériaux à haute conductivité sont idéaux pour la formation d'impulsions magnétiques, tandis que les matériaux à faible conductivité nécessitent une fréquence de sonnerie élevée. Le formage électromagnétique du métal convertit l'énergie électrique, en énergie mécanique, ce qui le rend adapté à l'assemblage de divers composants. Cependant, la durée de vie de la bobine est un facteur limitant en raison de la déformation. La figure I.8 montre un schéma de processus de soudage par impulsion magnétique [5].

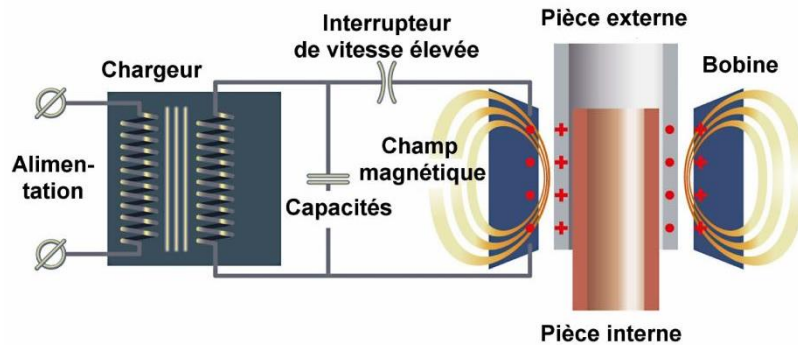


Figure I. 8 Processus de soudage par impulsion magnétique [5].

5.2. Domaines d'application

- Utilisé pour les structures tubulaires, les applications sous-marines, les boîtes en aluminium et les tubes en métal dissemblable (voire figure I.9).
- Les composants automobiles et aéronautiques.
- Utilisé dans les projets nucléaires pour joindre des tubes de réacteur en cuivre à des bouchons en céramique [4].

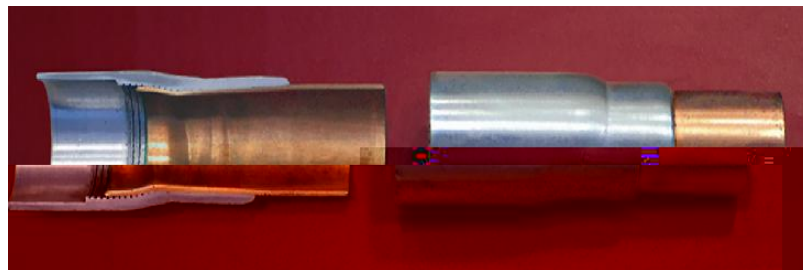


Figure I. 9 Soudage d'un tube en aluminium à un tube en cuivre par impulsion mécanique [5].

5.3. Avantages et inconvénients :

Les avantages de ce procédé consiste à :

- Processus économique, écologique et de haute qualité.
- Permet l'assemblage de divers matériaux, et peut joindre des matériaux métalliques et non métalliques.
- Élimine la corrosion et les microfissures.

Il peut également avoir quelques inconvénients, comme :

- Utile uniquement pour les matériaux à haute conductivité
- Limites dans l'épaisseur des tôles et les matériaux sensibles à la chaleur.
- Problèmes liés aux connexions électriques et à la conception des grandes bobines.
- Procédé coûteux, seulement adapté pour la production de masse.

6. Soudage par ultrasons

Le soudage par ultrasons est une méthode pour assembler des métaux avec des joints par recouvrement, utilisons des vibrations à haute fréquence pour perturber les atomes métalliques à l'interface de la soudure, créant un joint mécanique.

L'énergie ultrasonique est produite par un transducteur, qui convertit les vibrations électriques à haute fréquence en vibrations mécaniques fonctionnant à 20 KHz, au-delà de la plage d'audition humaine, mais 40 KHz et plus, limite la capacité de puissance en raison de guides d'ondes plus petits et de conception de guide d'ondes résonnante. Cette méthode peut être utilisée pour le soudage par points et le soudage en continu, avec la durée de l'impulsion ultrasonore basée sur l'épaisseur et la dureté du matériau [3,4].

- Ce processus ne nécessite pas une source de chaleur, ce qui signifie qu'il n'y a pas de fusion.
- Il n'y a pas besoin de pré-soudure, de nettoyage après soudure et de traitement thermique.
- Aucune utilisation pour les flux ou les métaux de remplissage.

6.1. Appareil de soudage à ultrasons

L'appareil le constitue de :

- Générateur de signaux à haute fréquence,
- Transducteur (magnéto-scripteur) fixé sur un cône d'amplification de vibrations (la sonotrode) sur lequel est fixé l'outil de soudage,
- Enclume réglable,
- Réglages de pression et de temps de soudage.

6.2. Principe de soudage

Les pièces sont positionnées entre une enclume (une pièce massive) et un index métallique animé par des vibrations ultrasonores (20 à 100 KHz). Les ultrasons sont générés par les phénomènes de piézoélectricité. Le courant qui alimente le générateur ultrasonique est un courant à haute fréquence dont les vibrations déclenchent le phénomène de magnétostriction. L'énergie vibratoire de la sonotrode provoque l'expansion locale des réseaux cristallins dans la zone des deux pièces à joindre, conduisant à une interpénétration moléculaire des deux éléments. L'énergie est déterminée par l'épaisseur minimale requise pour l'assemblage et la composition du métal [4]. La figure I.10 montre le principe de soudage par ultrason.



Figure I. 10 Principe de soudage par ultrason

La figure I.11 illustre la micrographie de joint de soudure d'une tôle d'aluminium.

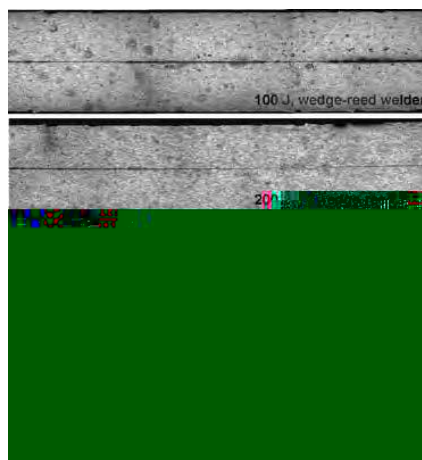


Figure I. 11 Micrographie de joint de soudure d'une tôle d'aluminium [4]

6.3. Domaines cibles :

- Industrie du câble,
- Disjoncteurs et moteurs.
- Tôle de batterie et de condensateur.
- Panneaux photovoltaïques, radiateurs solaires passifs.
- Tuyauterie CVCA (chauffage, ventilation et conditionnement d'air)

6.4. Avantages et inconvénients :

Les avantages de ce procédé sont :

- Méthode efficace et énergétique.
- Peut joindre des matériaux différents comme le cuivre à l'aluminium.
- Fournit des joints de conductivité solide, thermique et électrique.
- Aucun matériau d'apport.
- Aucune méthode de nettoyage spéciale requise.

Il peut également avoir quelques inconvénients, comme :

- Nécessite le chevauchement des joints, et non le soudage bout à bout.
- Limité aux matériaux non ferreux.
- La géométrie doit être simple
- Limité à des combinaisons de matériaux spécifiques.
- Profondeur de soudure limitée.
- Les bruits aigus peuvent être audibles.

II. Assemblage par adhésif

1. Définition

L'assemblage par adhésifs, est un procédé industriel largement utilisé dans lequel un matériau polymère (l'adhésif) est utilisé pour joindre deux composants (les adhérents). Ce procédé implique divers types d'adhésifs, est la substance qui remplit initialement l'espace entre les matériaux à assembler, y adhère et se solidifie. Les matériaux à assembler sont appelés substrats, après l'assemblage, le terme généralement utilisé est adhérent. La fonction principale des adhésifs est de joindre, et créer des liens solides et durables entre différents matériaux, ils le font en transmettant les contraintes d'un élément à l'autre de manière à ce que les contraintes soient réparties de manière uniforme [3, 6, 7,8].

2. Histoire sur le soudage par adhésif

Il y a plus de 35000 ans, l'adhésif était déjà présent et ses origines provenaient du bitume et du goudron de bouleau. Les premières civilisations comme les Babyloniens, les Égyptiens et les Aztèques, utilisant divers matériaux pour créer des substances collantes et encore les développer pour la construction et la menuiserie.

Vers 1750, la Grande-Bretagne a inventé le premier adhésif dérivé du poisson. La révolution industrielle a vu le développement d'adhésifs à partir de sources naturelles comme le caoutchouc, les os d'animaux et l'amidon, conduisant à la création du premier polymère plastique dérivé du bois.

Les premiers progrès réels dans la recherche de véritables d'adhésifs structurels à la fin du dix-neuvième siècle, lorsque le processus de polymérisation a été breveté. en 1900, les premiers adhésifs à base de polymères synthétiques ont été introduits et se sont rapidement répandus. L'application d'adhésifs a connu une avancée significative pendant la Seconde Guerre mondiale, avec nouveaux matériaux formulés et l'utilisés dans l'industrie aéronautique pour soutenir la production rapide d'avions et d'équipements militaires [7].

3. Théorie de l'adhésion

De nombreuses théories ont été étudiées pour comprendre le mécanisme du collage, mais aucune théorie ne pourrait expliquer l'adhésion en général.

3.1. Théorie mécanique

L'adhérence se produit lorsque les adhésifs pénètrent les irrégularités de surface, formant des liaisons plus fortes entre les adhérents. L'enclenchement mécanique contribue à cette résistance de liaison, il peut se produire une adhérence améliorée, une formation de surface propre et de contact plus élevé [8].

3.2. Théorie électrostatique

L'adhérence se produit en raison des effets électrostatiques entre un adhésif et adhérent ce qui conduit au transfert d'électron dû aux structures électroniques de bande. Ce mécanisme, soutenu par les décharges électriques observées lorsque les adhésifs sont décollés, est une explication possible pour assemblage par adhésif par des polymères métalliques [8].

3.3. Théorie de diffusion

L'adhérence est développée par inter diffusion de molécules entre l'adhésif et l'adhérent, en particulier dans les polymères avec des molécules à longue chaîne. La force de liaison est agrandie lorsque les paramètres de solubilité correspondent, la force de liaison augmentant fortement à des températures élevées à cause d'une inter-diffusion augmentant [8].

3.4. Théorie de mouillage

Le mouillage est le processus d'établissement d'un contact continu entre les adhésifs et les substrats. Un bon mouillage entraîne une tension de surface inférieure à celle du substrat, nécessitant un traitement de surface des plastiques pour augmenter l'énergie de surface et la polarité [8].

3.5. Théorie de la liaison chimique

La liaison chimique est la formation de fortes liaisons d'adhérence, impliquant des liaisons hydrogène, covalentes et ioniques. Ces liaisons sont plus fortes que les forces de dispersion attrayantes et peuvent se produire dans les adhésifs les revêtements thermosensibles. Les liaisons covalentes nécessitent des groupes chimiques réactifs

réciroques, tandis que les groupes fonctionnels réactifs comme les groupes hydroxyle ou carboxyle ont tendance à adhérer plus fermement aux substrats de groupes similaires [8].

3.6. Théorie de la couche limite faible

La théorie de Bikerman suggère que la rupture de la liaison aux interfaces est causée par une rupture cohésive ou une faible couche limite, provenant de l'adhésif, de l'adhérence ou de l'environnement. Les exemples incluent le polyéthylène et les oxydes métalliques, qui peuvent être renforcés avec des traitements de surface [8].

La figure I.12 montre les mécanismes d'adhésion.

- a) L'enclenchement mécanique ;
- b) L'inter diffusion de chaînes ;
- c) L'interaction électrique ;
- d) L'interaction chimique.

Le tableau I.1 montre les types des adhésifs structuraux avec ces descriptions

Tableau I. 1 Types des adhésifs structuraux [3].

Adhésifs	Description
Anaérobie	Adhésif à base d'acrylique thermodurcissable à composant unique. Durcit par un mécanisme de radicaux libres à température ambiante.
Acrylique modifié	Adhésif thermodurcissable à deux composants composés de résine à base d'acrylique et d'initiateur/durcisseur. Durcit à température ambiante après mélange.
Cyanoacrylate	Adhésif à base d'acrylique thermodurcissable à composant unique qui durcit à température ambiante sur les surfaces alcalines.
Époxy	Comprend une variété d'adhésifs largement utilisés formulés à partir de résines époxy, d'agents de durcissement et de remplisseurs/modificateurs qui durcissent lors du mélange.
Silicone	Adhésif liquide thermodurcissable à un ou deux composants à base de polymères de silicium. Durcit par vulcanisation à température ambiante en solide caoutchouteux.
Uréthane	Adhésif thermodurcissable à un ou deux composants à base de polymères d'uréthane.
Composés phénoliques	Y compris les liants pour panneaux de particules et les alliages de métallisation, en raison de leur réactivité. Ils constituent un choix de premier plan sur le marché des adhésifs pour bois et peuvent résister à des températures comprises entre 149 et 260 °c pendant de longues périodes.

Le tableau I.2 montre Les propriétés des cinq adhésifs structuraux les plus utilisées.

Tableau I. 2 Propriétés des cinq adhésifs structurelles les plus utilisées [3].

Propriétés	Époxy	Poly-uréthane	Acrylique modifié	Cyano-acrylate	Anaérobie
Résistance aux chocs	Faible	Excellent	Bon	Faible	Équitable
Résistance à la traction (MPa)	15,4	15,4	25,9	18,9	17,5
Résistance au décollement (N/m)	<525	14 000	5250	<525	1750
Séchage ou mélange à chaud requis	Oui	Oui	Non	Non	Non
Résistance aux solvants	Excellent	Bon	Bon	Bon	Excellent
Résistance à l'humidité	Excellent	Équitable	Bon	Faible	Bon
Inflammabilité	Faible	Faible	Élevé	Faible	Faible

Le tableau I.3 montre les avantages des cinq adhésifs structuraux les plus utilisées.

Tableau I. 3 Avantages des cinq adhésifs structurels les plus utilisés [3].

Époxy	Polyuréthane	Acrylique Modifié	Cyanoacrylate	Anaérobie
Résistance élevée aux solvants, Résistance aux hautes températures, Disponible à un coût relativement faible.	Utilise un ou deux composants, Durcissement à températures ambiantes, Une bonne flexibilité même par temps froid.	Excellente flexibilité, Bonne résistance au cisaillement, Durcit à température ambiante, Capable de coller des surfaces sales (huileuses), Pas besoin de mélange.	Mono composant, Durcissement rapide à température ambiante, Résistance élevée à la traction, Excellente adhérence aux surfaces métalliques.	Résistance élevée aux solvants, Durcissement rapide à température ambiante, Pas besoin de mélange Résistance aux hautes températures, Nature non toxique.

Le tableau I.4 montre les limitations des cinq adhésifs structuraux les plus utilisées.

Tableau I. 4 Limitations des cinq adhésifs structuraux les plus utilisés [3].

Époxy	Polyuréthane	Acrylique modifié	Cyanoacrylate	Anaérobie
- Réaction exothermique, - Exigent des proportions précises et un mélange complet, - Les formulations à un composant nécessitent un stockage réfrigéré.	Sensible à l'humidité, Faible résistance aux températures élevées, Besoin d'équipement spécialisé de mélange et de distribution.	Faible résistance aux températures élevées, Dangereux, Inflammable, Forte odeur, Courte période d'application, Nécessité d'un équipement de distribution.	Prix élevé, Longévité insuffisante sur certaines surfaces, Tolérance limitée aux solvants, Faible résistance aux températures élevées.	Ne convient pas aux surfaces poreuses, Ne durcit pas lorsqu'il est exposé à l'air sous forme de couche humide, Capacité limitée de guérir dans des espaces étroits.

4.1.2. Adhésifs non structuraux

Les adhésifs non structurels, également appelés "adhésifs de maintien", sont utilisés pour sécuriser les matériaux légers en place sans avoir besoin de supporter de lourdes charges. Les adhésifs structuraux.

4.1.2.1. Adhésifs thermo fusibles

C'est une formulation solide faite de polymères thermoplastiques, qui durcissent lorsqu'ils sont chauffés au-dessus du point de fusion. Comprend les principales familles chimiques :

- Acétate d'éthylène,
- Polyéthylène,
- Acétate de polyvinyle,
- Polycarbonate poutine,
- Thermoplastiques,
- Polyamides (nylon),
- Polystyrènes.

Ils sont disponibles sous différentes formes et nécessitent un équipement de distribution spécial. Les conditions d'application, y compris la quantité d'adhésifs et la pression appliquée, affectent également les caractéristiques d'utilisation finale [3]. Cependant, leurs négatifs sont :

- Une ténacité limitée,
- Faible résistance à la chaleur, et au fluage.

4.1.2.2. Adhésifs sensibles à la pression :

Les adhésifs sensibles à la pression maintiennent les objets ensemble sous pression à température ambiante, contrairement aux adhésifs de contact qui ne nécessitent aucune pression. Ils exigent :

- Matériaux visqueux avec écoulement,
- Dissipation d'énergie,
- Comportement élastique partiel,
- Stockage d'énergie de rupture de liaison.

Formé à partir de divers polymères de poids moléculaire élevé tels que [3] :

- Caoutchouc naturel/ récupéré,
- Caoutchouc styrène-butadiène,
- Caoutchouc butadiène-acrylonitrile,
- Élastomères thermoplastiques,
- Polyacrylates,
- Silicones.

4.1.2.3. Adhésifs sensibles à l'eau :

Fabriqués à partir de matériaux qui peuvent être dissous ou dispersés dans l'eau, semblables à ceux utilisés dans les adhésifs à base de solvants organiques. Ces adhésifs peuvent être naturels, synthétiques ou traité. Les nouveaux adhésifs synthétiques développés après 1960 sont principalement à base d'acryliques, qui ont un bon équilibre entre les propriétés de décollement et de cisaillement. Les adhésifs à base d'eau peuvent être modifiés avec divers additifs, ce qui améliore les propriétés et augmente la résistance aux conditions extrêmes, mais ils ne conviennent pas aux surfaces hydrophobes, aux substrats en retrait et aux métaux corrosifs [3]. Ayant des avantages consiste à :

- Amélioration de la stabilité thermique,
- Résistance à la traction améliorée,

- Résistance à l'huile et à la graisse, aux rayons UV (ultraviolet) et aux solvants.

4.2. Classification par forme physique :

Les adhésifs peuvent être classés par leur forme. L'état physique de l'adhésif détermine généralement comment il doit être appliqué [8].

4.2.1. Liquide

Ces adhésifs sont facilement appliqués au moyen d'épandeurs mécaniques tels que des rouleaux, par pulvérisation ou par brossage [8].

4.2.2. Colles et pâtes

Les adhésifs en pâte ont des viscosités élevées pour permettre une application sur des surfaces verticales avec peu de tendance à s'affaisser ou à s'égoutter. Ces adhésifs peuvent servir de remplisseurs d'espace et de scellant [8].

4.2.3. Bande et film

Ces adhésifs fournissent une ligne de liaison avec une épaisseur uniforme et offrent les avantages d'aucun besoin de dosage et de facilité de distribution. Les films adhésifs sont disponibles sous forme de feuilles adhésives pures, ou avec un renfort de film ou de papier [8].

4.2.4. Poudre

Il n'est généralement pas possible d'appliquer des adhésifs sous forme solide. Ces matériaux doivent être chauffés ou dissous dans un solvant pour être convertis en forme liquide, pour permettre leur application sur les surfaces [8].

4.3. Classification par composition chimique

4.3.1. Adhésifs thermodurcissables

Ce sont des matériaux qui ne peuvent pas être chauffés ou fondus après le durcissement initial. Ils sont disponibles en tant que liquides, pâtes et solides sans solvant et sont disponibles en systèmes à une ou deux parties. Les systèmes en une partie nécessitent un durcissement à haute température et ont une durée de conservation limitée. Ce type résistant à la chaleur et aux solvants et présentent peu de déformation élastique sous charge. Ils peuvent résister à des températures de 93 à 260 °C et ont une résistance au décollement équitable. L'application principale concerne les joints soumis à des contraintes [8].

4.3.2. Adhésifs thermoplastiques

Les adhésifs thermoplastiques sont des systèmes à composant unique qui durcissent lors du refroidissement ou de l'évaporation des solvants. Les articles ménagers courants comme les colles de bois sont des émulsions thermoplastiques. Ils sont utilisés dans les joints et les conceptions soumis à des contraintes avec des bouchons, des chevauchements, et ne sont pas généralement utilisés pour des applications structurales, et ne sont pas recommandés pour une utilisation supérieure à 66 °C [8].

4.3.3. Adhésifs élastomères

Les adhésifs élastomères sont des matériaux fabriqués à partir de polymères synthétiques ou naturels avec une ténacité et un allongement supérieur. Ils peuvent être fournis sous diverses formes, telles que les solvants, les ciments au latex, les bandes sensibles à la pression. Ils sont utilisés pour la flexibilité et la résistance au décollement, et conviennent aux joints non sollicités sur des matériaux légers. Ils sont souvent modifiés avec des résines synthétiques pour coller le caoutchouc, le tissu, le papier et le cuir [8].

4.3.4. Alliages adhésifs

Les alliages adhésifs sont composés de résines de groupes thermodurcissables, thermoplastiques ou élastomères, la résine thermodurcissable étant plastifiée pour la résistance et thermoplastique pour la flexibilité. Disponibles sous forme de solutions ou de films à base de solvants, ces adhésifs sont solides sur de larges plages de température et conviennent aux applications structurales [8].

5. Composition des adhésifs

5.1. Base adhésif

C'est le composant primaire et à la fonction de former la liaison. Le liant est généralement le composant à partir duquel le nom de l'adhésif est dérivé. Par exemple, un adhésif époxy peut avoir de nombreux composants, mais le composant principal est le liant, c'est-à-dire la résine époxy [8].

5.2. Durcisseur (pour les adhésifs thermodurcissables)

Il s'agit d'une substance ajoutée à un adhésif pour favoriser la réaction de durcissement en participant par catalyse ou réticulation. Les systèmes adhésifs en deux parties ont généralement une partie qui est la base et une deuxième partie qui est le durcisseur. Lors du mélange, une réaction chimique se produit qui provoque la solidification de l'adhésif. Une

petite quantité de catalyseur est parfois incorporée dans une formulation adhésive pour accélérer la réaction entre la base et le durcisseur [8].

5.3. Solvants

Des solvants sont parfois nécessaires pour réduire la viscosité de l'adhésif afin d'améliorer sa capacité de propagation. Les solvants utilisés avec les résines synthétiques et les élastomères sont généralement de nature organique. Souvent, un mélange de solvants est nécessaire pour obtenir les caractéristiques de procès souhaitées telles que l'évaporation et l'élimination contrôlées des solvants [8].

5.4. Diluants

Ce sont des ingrédients liquides ajoutés à un adhésif pour réduire la concentration du composant liant. Les diluants sont ajoutés principalement pour réduire la viscosité et modifier les conditions de traitement de certains adhésifs. Les diluants réactifs ne s'évaporent pas, comme les solvants. Ils réagissent avec le liant pendant le cycle de durcissement et sont incorporés dans l'adhésif durci [8].

5.5. Charges

Les charges sont des matériaux relativement neutres ajoutés à l'adhésif dans le but d'améliorer les caractéristiques de travail et de résistance, telles que :

- Dilatation thermique
- Conductivité électrique et thermique
- Rétrécissement
- Résistance à la chaleur.

5.6. Renforts

Ce sont généralement des matériaux minces de type toile tels que des membranes en plastique, du tissu et du papier flotté utilisés pour soutenir l'installation d'adhésif. Le rôle du type toile consiste à agir en tant que support, support de sortie, bande ou film. Autres ajouts [8].

5.7. Autres additifs

En plus des ingrédients de base, l'adhésif peut contenir un certain nombre d'autres additifs, chacun visant à obtenir une certaine propriété, notamment :

- Plastifiants,

- Activateurs,
- Inhibiteurs,
- Condensat,
- Antioxydants,
- Tensioactifs.

6. Opérations de soudage :

La figure I.13 montre le schéma d'une opération générale de soudage à froid.



Figure I. 13 Diagramme schématique d'opération d'assemblage par adhésif [8].

6.1. Prétraitement et préparation de surface :

- Papier de verre ou brosses métalliques, et dégraissage pour éliminer les contaminants.
- Polissage à la vapeur pour les matériaux plus minces.
- Utilisez du détergent pour éliminer les résidus.
- Rincer à l'eau pour un nettoyage approfondi.

6.2. Traitement de surface

Le processus de traitement de surface augmente les dépenses globales d'adhésion. Des amorces d'adhérence sont utilisées pour améliorer l'adhérence et protéger les surfaces. Il est essentiel d'appliquer l'adhésif rapidement après le traitement, de le protéger et de d'éviter de toucher la surface fraîchement préparée pour éviter de laisser des empreintes digitales [6].

6.3. Méthodes de soudage :

Les étapes de base du processus sont [3] :

- Se procurer et entreposer l'adhésif.
- Nettoyer les pièces pour favoriser une bonne adhérence.
- Mélanger et/ou préparer l'adhésif et l'appliquer.
- Accoupler les pièces et l'adhésif pour former l'assemblage.
- Appliquer une force pour durcir ou fixer l'adhésif.

7.1.1. Échos ultrasoniques

Les échos ultrasoniques sont considérés comme l'un des détecteurs de vide essentiellement dans les méthodes d'essai non destructives pour les joints adhésifs et les méthodes d'essai les plus utilisées. Si un vide contient de l'air ou un milieu de faible densité, il a une faible impédance acoustique par rapport à l'adhésif ou aux substrats, et à une interface une impulsion incidente d'ultrasons, généralement dans la gamme de fréquences 1 à 25 MHz, sera totalement réfléchi, permettant à un minimum d'énergie d'être transmise à travers le vide. Cette énergie peut indiquer des défauts. Les transducteurs piézoélectriques sont couramment utilisés pour transformer les vibrations électriques en vibrations mécaniques [10].

Il y a deux manières distinctement différentes de transporter la méthode de transmission (figure I.15) et d'écho d'impulsion (figure I.16), la première technique emploie un émetteur et un récepteur séparés des deux côtés du joint, ainsi exigent l'alignement complet des sondes. Alors que cette difficulté pratique peut être évitée en utilisant la technique de résonance d'impulsion où le même transducteur est utilisé comme émetteur et récepteur où le transducteur individuel émet des ultrasons d'impulsion et dans les périodes mortes entre l'émission d'impulsion reçoit des signaux d'énergie réfléchi [10]. Les deux technologies doivent être combinées de manière satisfaisante avec le joint adhésif et peuvent être réalisées par :

- Transformateurs qui maintiennent le joint avec un couplant,
- Transducteurs et articulations immergés dans l'eau,
- À l'aide de la roue de recherche, sont constamment trempés dans l'eau, en contact avec l'articulation ou répandent des ultrasons le long d'un jet d'eau dirigé vers l'articulation.

La figure montre I.15 illustre une méthode de test ultrasonique utilisée pour les tests non destructifs des matériaux. Une sonde, qui fonctionne à la fois comme émetteur et récepteur d'ondes ultrasoniques, est placée sur un matériau de couplage pour faciliter la transmission du son dans le substrat. Le substrat, composé de plusieurs couches, réfléchit ces ondes à chaque interface. Ces réflexions sont visualisées sur un affichage à tube cathodique, chaque pic correspondant à une couche dans le substrat, les pics 1, 2, 3, 4,5 représenter respectivement les épaisseurs des substrats 1, 2, 3, 4,5.

La figure montre I.16 montre un schéma d'un dispositif de test ultrasonique. Il comprend un émetteur (Émetteur) qui émet des ondes ultrasoniques, et un récepteur qui capte ces ondes après qu'elles aient interagi avec le substrat. Un couplant est utilisé pour faciliter la transmission des ondes dans le substrat. L'affichage du tube cathodique montre deux pics représentant l'amplitude des signaux transmis A_T et l'amplitude des signaux réfléchis A_R .

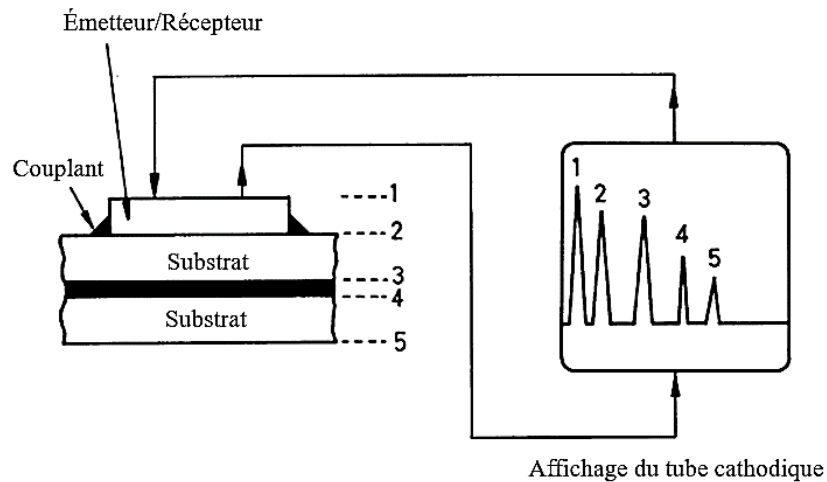


Figure I. 15 Schéma de contrôle non destructif par ultrasons par transmission

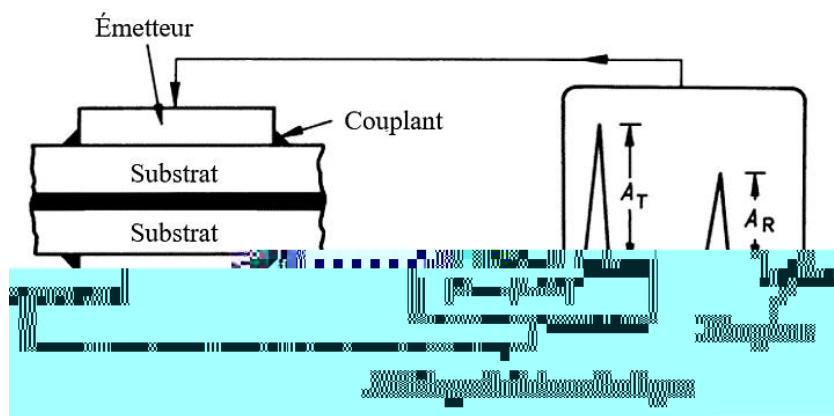


Figure I. 16 Schéma de contrôle non destructif par ultrasons à écho pulsé.

Ces deux méthodes permettent de détecter les défauts internes et de mesurer l'épaisseur sans endommager le matériau. La profondeur d'une caractéristique peut être déterminée en fonction du temps nécessaire pour que les réflexions reviennent.

7.1.2. Radiographie

En général, la radiographie utilise l'allégement des rayons qui traversent la structure pour identifier les différences de densité. Cependant, si l'un ou l'autre substrat est une substance à absorption élevée, cette procédure ne peut pas être facilement utilisée. Par

conséquent, à moins que l'adhésif ne contienne des charges métalliques, les substrats métalliques empêchent la colle d'être visible sur les radiographies. Cependant, les rayons X doux peuvent être utilisés car la densité des substrats plastiques renforcés de fibres est comparable à celle de l'adhésif [10].

7.1.3. Interférométrie holographique

L'interférométrie holographique surveille les changements dans la surface externe d'un corps à une demi-longueur d'onde, au moins de 0,25 μm dans l'exemple optique. Il utilise des pressions pour produire des déplacements dans un substrat extérieur couvrant une zone vide ou décollée par opposition à une bonne région bien liée. Cette approche est efficace pour les substrats composites à fibres minces nécessitant des contraintes minimales. Les substrats métalliques épais rendent plus difficile d'induire des déformations de surface locales. Les contraintes thermiques, vibratoires ou de pression sont utilisées pour générer les contraintes appliquées, et le décollement peut être détecté dans les conditions de fonctionnement appropriées [10].

7.2. Contrôles destructifs

Le test des joints adhésifs est crucial pour assurer la fiabilité des systèmes ou des composants collés. Il est utilisé pour la sélection des matériaux, la validation de la conception, l'évaluation de la durabilité environnementale et le contrôle de la qualité. Il existe de nombreuses méthodes d'essai disponibles en tant que normes nationales et internationales. Cependant, les essais standard peuvent ne pas être précis ou appropriés à toutes les fins, et seules quelques méthodes, comme l'essai de cisaillement à adhérence épaisse, conviennent à la conception de structures collées soumises à des charges et à des effets environnementaux [11].

7.2.1. Essai de Traction

La répartition exacte des contraintes dépend de la flexibilité relative des poutres transversales et de l'adhésif. Les résultats de ces essais de traction sont habituellement présentés comme la force à la rupture divisée par la section transversale. La distribution des contraintes le long de la ligne de liaison est une fonction forte de la géométrie du joint adhésif [12].

7.2.2. Essai de cisaillement

Les essais de cisaillement à recouvrement sont une méthode populaire pour tester les adhésifs, où la contrainte de cisaillement moyenne dans la couche adhésif est déterminée [12]. L'échec de ces tests peut être caractérisé par divers facteurs tels que :

- Limite d'élasticité,
- Charge maximale,

Il est important de noter que la distribution des contraintes dans les joints d'essai de cisaillement est complexe et non uniforme [12], influencée par des variables telles que :

- Épaisseur de la couche de liaison,
- Épaisseur d'adhérence,
- Les propriétés des matériaux adhésifs et adhésifs

La figure I.17 présente un organigramme d'un système de contrôle de la qualité l'assemblage par adhésif pour les grands avionneurs.

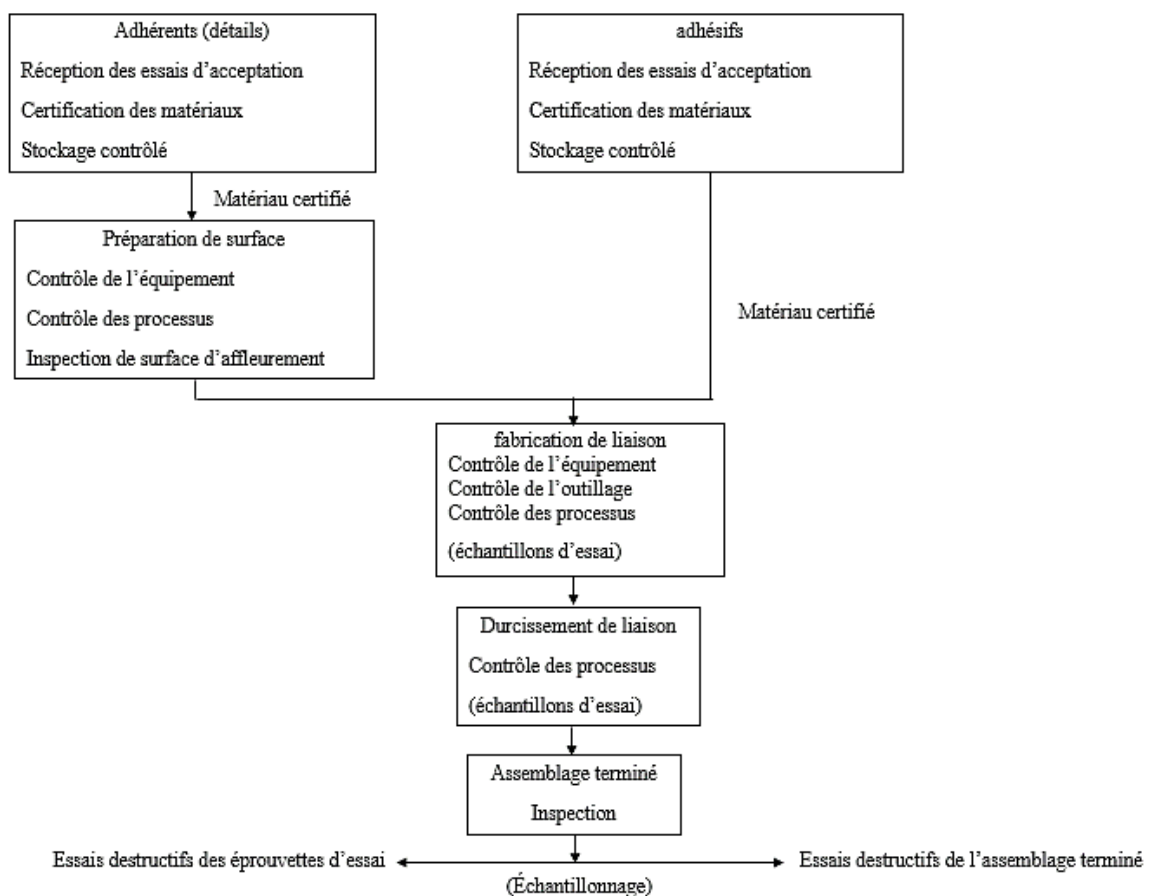


Figure I. 17 Organigramme d'un système de contrôle de la qualité pour l'assemblage par adhésif [8].

8. Domaines c `ooldb` shm

8.1. Industrie aéronautique

Les méthodes traditionnelles de rivetage dans l'industrie aéronautique sont connues pour être rapides, rentables et efficaces, mais elles peuvent également entraîner des contraintes et des dommages sur les avions. Le soudage se présente comme une alternative potentielle,

bien qu'il ne soit pas couramment utilisé dans les structures aéronautiques primaires en raison des défis du soudage des alliages légers.

D'autre part, l'assemblage par adhésif est devenu une alternative résistante, permettant la combinaison de différents matériaux sans risque de fortes contraintes thermiques. De plus, l'adhésion offre aux surfaces d'excellentes qualités aérodynamiques et une imperméabilité aux liquides et aux gaz [7].

8.2. Transports routiers et ferroviaires

L'industrie automobile vise à réduire le poids structurel de 70%, en particulier dans les voitures électriques, en utilisant des matériaux légers et recyclés. L'assemblage par adhésif est la méthode la plus efficace pour assembler ces structures, sont utilisé pour prévenir la corrosion et améliorer l'apparence des joints. Les adhésifs servent également de scellant, fournissant la force et assurant l'assemblage efficace de divers matériaux comme les métaux, les composites et le verre [7].

8.3. Industrie navale

Les navires de pêche et de transport de marchandises utilisent souvent une construction en acier, mais des températures de soudage élevées peuvent provoquer une distorsion. Pour améliorer la qualité, la performance et la consommation de carburant, les structures navales utilisent souvent une construction composite collée, comme les yachts, qui offre un excellent amortissement, une imperméabilisation et des propriétés écologiques [7].

8.4. Électronique

- Les adhésifs sont essentiels pour fixer et assembler les composants des appareils électroniques.
- La technologie adhésive permet un montage serré des composants électroniques sans espace.
- Les adhésifs ont une bonne conductivité thermique pour un transfert efficace de la chaleur ou de l'électricité.
- Ils ont une résistance diélectrique élevée pour éviter les courants indésirables ou le court-circuit [7].

8.5. Réparation par patch composite

Les patches de matériaux composites sont généralement utilisés pour réparer les structures métalliques présentant des fissures afin de prolonger leur durée de vie. Les patches collés sont

également utilisés pour la réparation des panneaux sandwich (composé de deux parements d'acier et d'une couche de polyuréthane), réparer les fissures dans les structures métalliques. Afin de prévenir les concentrations de contraintes, de contribuer au contrôle de la propagation des fissures, de réduire le risque de corrosion et de créer un renforcement plus efficace [13]. Le tableau I.5 montre les domaines d'application de chaque type adhésif.

Tableau I. 5 Domaines d'application des adhésifs [3]

Adhésifs	Application
Anaérobie	Scellant, Assemblage structurel
Acrylique modifié	Caoutchouc à plastique, composants électroniques de circuits imprimés, boîtiers cosmétiques en plastique et en métal.
Cyanoacrylate	Fibre de verre dans les bateaux, tôle dans les voitures et les avions
Époxy	Collage en aluminium et panneaux en nid d'abeille pour avions, renforts en tôle pour voitures, laminage de poutres en bois, joints en électronique
Silicone	Joints dans les voitures, Joints électroniques et isolation, joints, Collage des plastiques.
Uréthane	Collage de la fibre de verre et des plastiques.
Composés phénoliques	Les secteurs aéronautique et aérospatial, où ils sont utilisés pour le collage de métaux et de composites soumis à des températures extrêmes.
Adhésifs thermos fusibles	Emballage, meubles, chaussures, assemblage de livres, tapis, assemblages dans la quincaillerie et les automobiles
Adhésifs sensibles à la pression	Bandes et étiquettes, panneaux solaires, assemblages électroniques, cellophane, films plastiques, tissus et feuilles métalliques.

9. Avantages

- Fournir une répartition uniforme des contraintes en éliminant les pics individuels de concentration des contraintes.
- Permettre la construction de structures plus légères et offrir une meilleure résistance à la fatigue.
- Permettre de joindre une large gamme de matériaux, y compris des matériaux différents.
- S'assurer qu'il n'y a pas de contact direct entre les pièces à assembler, en évitant la

corrosion.

- La liaison adhésive fournit des joints électriquement isolants, empêchant la corrosion galvanique des adhérences métalliques.

10. Inconvénients

- Le décollement d'un joint adhésif n'est pas facile, car ce joint est permanent et peut être endommagé.
- L'adhésion est très sensible à la préparation de surface, et comme ce dernier est absolument nécessaire pour produire une liaison solide et durable, il a besoin d'environnement propre avec contrôle de température et de l'humidité.
- La nécessité constante de fabriquer des échantillons d'essai et de les tester par des méthodes destructives pour déterminer la résistance du joint, en raison du manque de fiabilité des essais non destructifs.
- Les matériaux adhésifs sont sensibles à la dégradation de l'environnement, la plupart absorbent l'humidité et présentent une durabilité réduites à une température élevée.

Conclusion

Le soudage à l'état solide assemble les métaux sans les faire fondre et sans utiliser de métaux d'apport. Les avantages de cette méthode sont que les propriétés originales des métaux restent les mêmes, ce qui conduit à des soudures plus fortes et plus durables. De plus, c'est un processus qui peut être facilement automatisé et ne change pas les caractéristiques des matériaux joints.

D'autre part, la soudure à froid utilise des adhésifs pour joindre une variété de matériaux. L'un des principaux avantages de cette méthode est qu'il favorise moins de zones de discontinuité et crée des champs de stress uniformes.

Chapitre

Comportement mécanique des joints adhésifs

Introduction

La soudure à froid est une technique utilisée dans diverses industries, offre plusieurs avantages tels que la possibilité d'assembler différents matériaux, une répartition uniforme de la charge et une isolation thermique-électrique efficace. Le comportement mécanique du collage est influencé par des facteurs tels que le type de joint, l'adhésif utilisé et la forme du joint. La longueur de chevauchement est un paramètre important qui affecte la résistance à la rupture. Malgré ses avantages, ce procédé est confronté à des défis tels que la fatigue, les incertitudes de comportement à long terme et la variabilité des charges de défaillance, ce qui rend la compréhension de son comportement mécanique pour une application efficace.

1. Rappel sur le comportement mécanique des matériaux

1.1. Courbe de traction

L'essai de traction fournit des données expérimentales sur la façon dont les matériaux s'étirent sous différentes charges [14]. Ces résultats sont affichés dans un graphique appelé "courbe de traction". Il existe deux types de courbes qui peuvent être dessinées après l'essai :

- la courbe conventionnelle
- la courbe rationnelle.

1.1.1. Courbe conventionnelle

La courbe conventionnelle est basée sur les résultats réels des essais et tracée à l'aide de valeurs nominales, et permet de mesurer facilement les propriétés du matériau étudié [14].

- σ : la contrainte normale,
- ϵ : la déformation longitudinale.
- L_0 : la longueur utile initiale de l'éprouvette,
- L : longueur de l'éprouvette pendant l'essai de traction,
- ΔL : l'allongement,
- F : la force de traction appliqué sur l'éprouvette,
- S_0 : la section initiale de l'éprouvette,
- S : la section de l'éprouvette dans la zone utile pendant l'essai.
- La limite d'élasticité R_e : également connue sous le nom de point de passage d'un matériau élastique à un comportement plastique, est une valeur qui ne peut pas être déterminée avec précision.
- La limite d'élasticité $R_{e0.2}$: désigne spécifiquement la contrainte à laquelle un matériau subit un allongement plastique de 0,2 %, marquant le début de la zone de déformation plastique.

- Résistance à la traction : elle représente la contrainte maximale qu'un spécimen peut supporter avant de subir la striction.
- Le coefficient de striction Z : il quantifie la différence de surface perpendiculaire au champ de contrainte avant et après rupture, fournissant un aperçu du comportement du matériau sous contrainte.

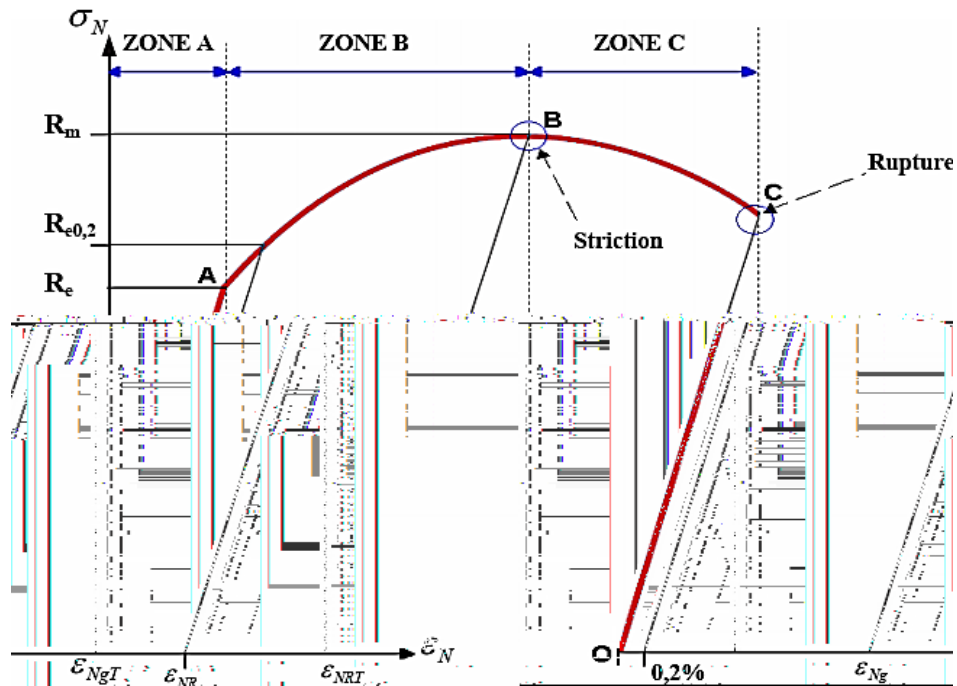


Figure II. 1 Diagramme de traction conventionnelle [14]

La figure II.2 illustre le diagramme de traction conventionnelle.

- la ligne OA représente une déformation élastique réversible.
- la courbe AB dans la zone B signifie le début de la déformation plastique, où des changements irréversibles se produisent. Lorsqu'il est soumis à des forces de traction dans cette région, le matériau subit un rebond élastique le long d'un chemin parallèle à OA, mais conserve une déformation permanente.
- Passant à la zone C, la courbe BC illustre un domaine de déformation plastique hétérogène. Ici, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue à mesure que l'allongement continue d'augmenter. La striction devient visible au point B, conduisant à une rupture éventuelle au point C. Cette zone est marquée par une instabilité plastique, caractérisée par un comportement imprévisible et instable. [14]

1.1.2. Courbe rationnelle

La section S et la longueur du spécimen fluctuent constamment dans la réalité, ce qui rend la mesure de cette variation intéressante en fonction de la force appliquée. En outre, la déformation nominale manque de signification physique car elle dépend de la géométrie du spécimen. La création d'une véritable courbe de traction, qui intègre des sections et des déformations réelles en temps réel, s'avère bénéfique. Cette courbe est dérivée de la courbe traditionnelle en traçant la contrainte σ par rapport au logarithme de déformation ε [14].

1.2. Contrainte vraie

La contrainte nominale σ_N est obtenue en divisant la force de traction F par la surface S_0 de la section initiale de l'éprouvette.

$$\sigma_N = \frac{F}{S_0} \quad \text{Eq II. 1}$$

La contrainte vraie est obtenue en divisant la force de traction par la surface variable pendant l'essai.

$$\sigma_v = \frac{F}{S} \quad \text{Eq II. 2}$$

La relation entre σ_v et σ_N :

$$\sigma_v = \sigma_N (1 + \varepsilon_N) \quad \text{Eq II. 3}$$

1.3. Critères de plasticité

1.3.1. Critère de Von Mises

Le critère le plus populaire pour les métaux est celui de Von Mises. Il est le résultat de facteurs énergétiques. Lorsqu'il est soumis à une charge externe, le volume d'un matériau a tendance à stocker de l'énergie interne [14]. L'expression développée du critère de Von Mises dans l'espace des contraintes à 6 dimensions est :

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + 3\tau_{12}^2 + 3\tau_{23}^2 + 3\tau_{31}^2} \quad \text{Eq II. 4}$$

Dans l'espace des contraintes principales, le critère de Von Mises se traduit par un cylindre, comme la figure II.2

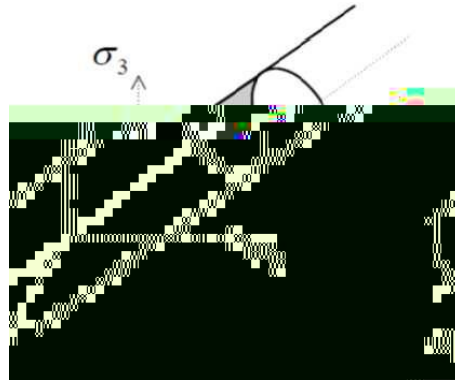


Figure II. 2 Critère de Von Mises dans l'espace des contraintes principales [15]

1.3.2. Critère de Tresca

Après avoir effectué des essais sur le plomb, Tresca a conclu que la plastification se produit lorsque la contrainte tangentielle maximale atteint un point particulier. Le phénomène de plastification se manifeste par un glissement planaire cristallographique, aidé par de fortes contraintes tangentielles. Selon le critère de Tresca, un matériau échouera si la contrainte de cisaillement maximale atteint une valeur critique [15]. La formule des critères :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_c \quad \sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_c \quad \sigma_2 - \sigma_3 = \sigma_c \quad \text{Eq II. 5}$$

La représentation graphique de ce critère dans l'espace des contraintes principales comme il est illustré dans la figure II.3.

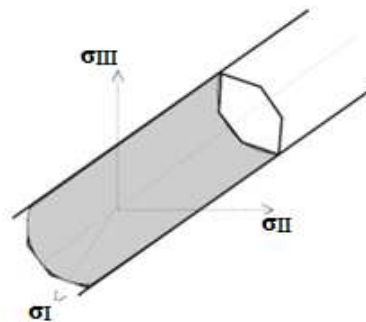


Figure II. 3 Critère de Tresca dans l'espace des contraintes principales [15]

Dans le plan des contraintes principales σ_I σ_{II} , comme la figure II.4 montre lorsque la troisième contrainte principale σ_{III} est nulle, les expressions des critères se réduisent alors à :

Eq II. 6

Eq II. 7

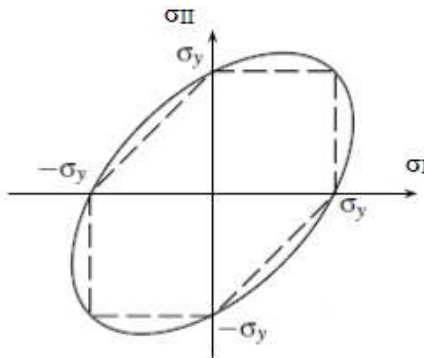


Figure II. 4 Représentation graphique des critères de Tresca (en pointillés) et de Von Mises dans le plan des contraintes principales (σ_I , σ_{II}) [15]

2. Conception des joints

Au but d'assurer l'intégrité structurelle d'une variété de produits et de matériaux il faut que les joints de liaison adhésifs sont à concevoir spécifiquement pour les adhésifs afin d'obtenir une résistance maximale et réduire la concentration de contrainte [8,10], il faut donc prendre en compte :

- Propriétés mécaniques
- Contraintes internes restantes
- Permettre un assemblage rentable,
- Permettre l'application de l'adhésif selon un motif approprié,

La figure II.5 montre un schéma de quelques types des joints. Les conceptions tentent de répartir les charges imposées dans la couche adhésive comme une combinaison de contraintes de cisaillement et de compression, en évitant autant que possible les contraintes de traction, de clivage et de décollement.

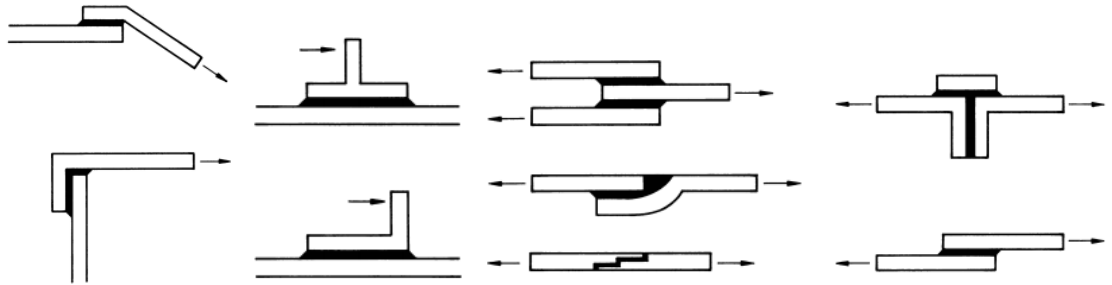


Figure II. 5 Types des joints pour l'assemblage pour adhésif

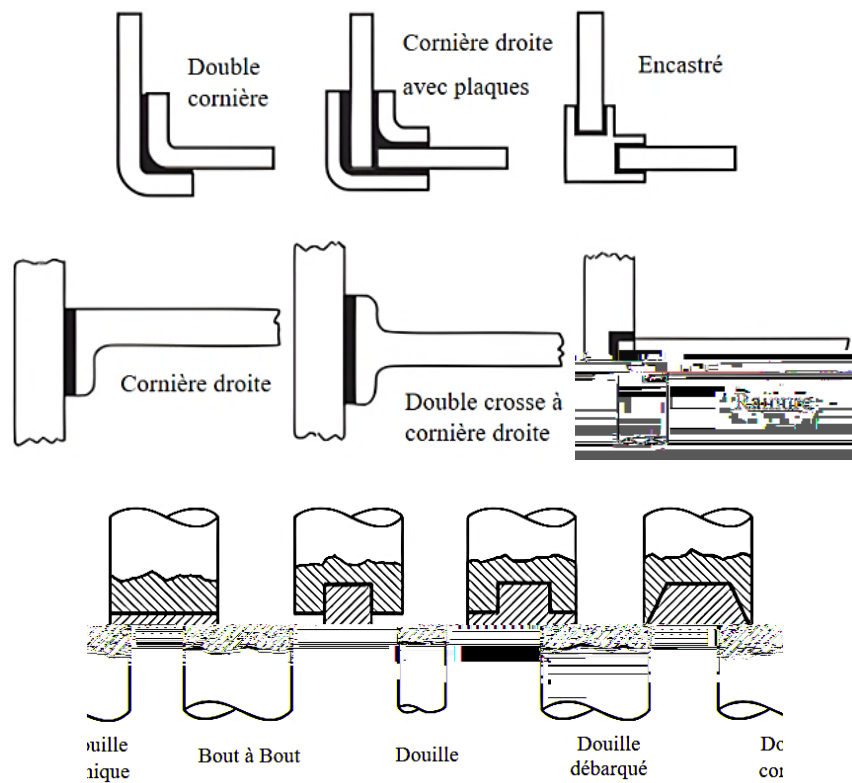


Figure . 5 - suite

La figure II.6 montre des types des joints pour matériaux flexibles.

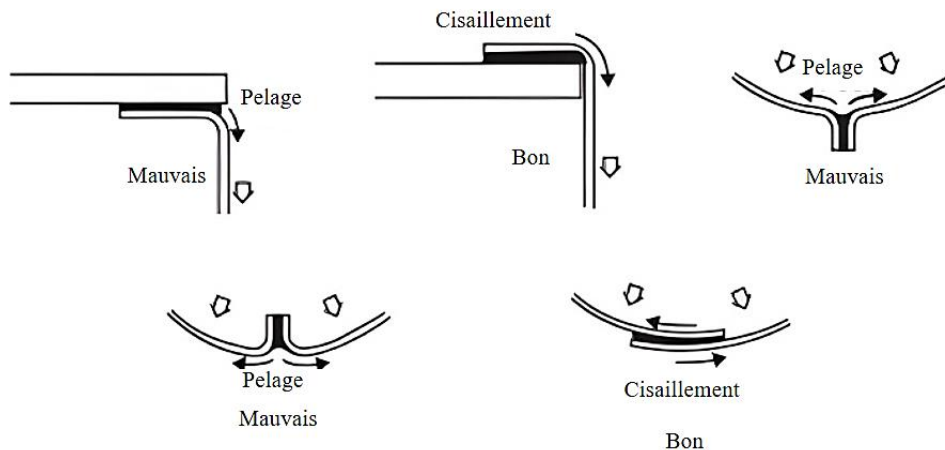


Figure II. 6 Joints pour matériaux flexibles

2.1. Différents types de contraintes dans les joints adhésifs

La figure II.7 montre les types des contraintes dans les joints adhésifs [16].

- Les contraintes de traction et compression se produisent quand une contrainte uniforme est appliquée à la ligne de liaison, sans moment de flexion (figure II.7.a et II.7.b).
- La contrainte de cisaillement se produit lorsque les joints sont soumis à des charges de cisaillement dans le plan, soutenant la charge uniformément. (figure II.7.c).
- La contrainte de décollement (pelage) se produit lorsque les substrats sont flexibles, avec une répartition des contraintes non uniforme le long de la ligne de liaison. Il est généralement concentré à la fin du chevauchement des articulations. (figure II.7.d).
- La contrainte de clivage est produite en raison d'un moment de flexion appliqué, provoquant une distribution de contrainte non uniforme le long de la ligne de liaison, et une concentration de contrainte significative aux bords du chevauchement (figure II.7.e).

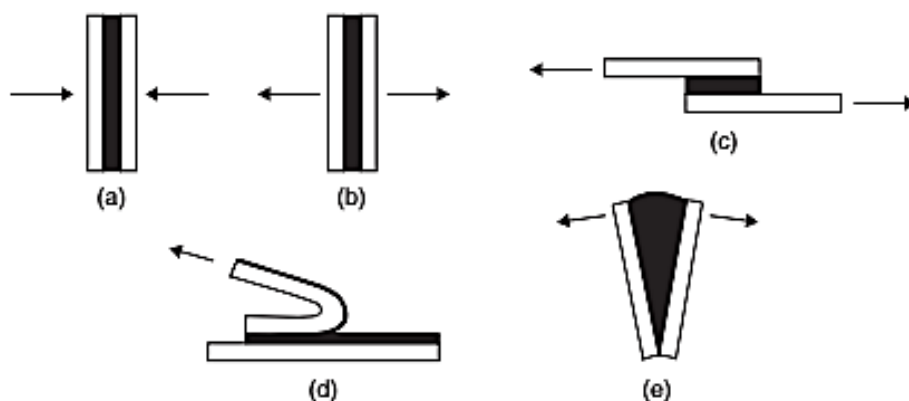


Figure II. 7 types de contraintes : a) compression b) traction c) cisaillement d) décollement e) clivage

Les matériaux polymères utilisés comme adhésifs ont un module et une résistance plus faibles que les métaux, les céramiques ou les composites à fibres continues, ce qui les rend adaptés au collage des tôles ou de panneaux minces. La capacité de déformation et la ténacité des adhésifs sont plus élevées lorsqu'elles sont mesurées en compression ou en cisaillement, ce qui affecte la conception pratique des joints adhésifs. La figure II.8 montre un schéma de force de traction sur le joint à recouvrement [8], et implique :

- (a) le joint déchargé,
- (b) le joint sous contrainte,
- (c) la répartition des contraintes dans l'adhésif.

Pour éviter les contraintes de traction, de clivage et de décollement, les concepteurs doivent maintenir les concentrations de contrainte à un minimum et répartir les charges dans la couche adhésive comme une combinaison de contraintes de compression et de cisaillement [8].

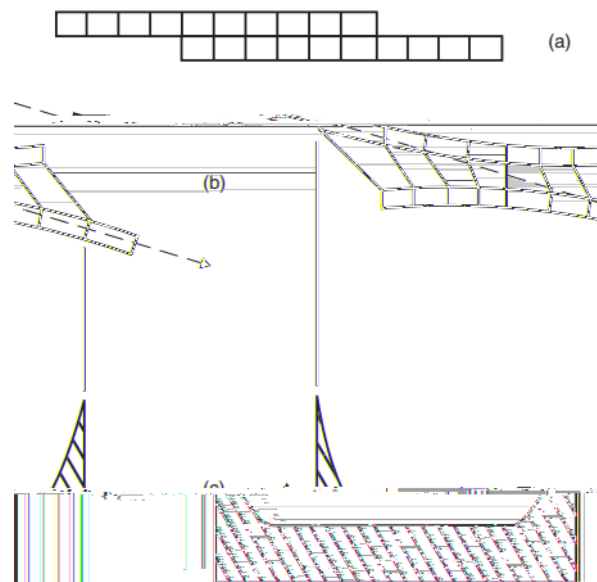


Figure II. 8 Force de traction sur un joint à recouvrement : **(a)** le joint déchargé, **(b)** le joint sous contrainte, **(c)** la répartition des contraintes dans l'adhésif [8].

Voici d'autres considérations pour la conception des joints adhésifs [8] :

- Compatibilité avec l'adhésif et la rétention de la résistance sous contraintes en service.
- La rupture du joint doit se produire dans l'un des joints, et non dans la ligne de liaison.
- Tenir compte de la dilatation thermique de matériaux différents.
- Éviter les charges de décollement ou de clivage.
- Utiliser des adhésifs à module inférieur à haute résistance au décollement.
- Utiliser des extrémités effilées sur les joints à recouvrement.
- Effectuer des essais de durabilité pour la chaleur, l'humidité.

2.2. Modes de rupture des joints adhésifs

Le rôle principal d'un joint adhésif est de transférer les charges entre les deux composants collés. En tenant compte du fait que la structure reste intacte lorsqu'elle est soumise à des contraintes statiques et dynamiques ainsi qu'à des conditions environnementales sévères telles que la température et l'humidité. La figure II.9 illustre les modes de rupture des joints adhésifs. Avec l'évaluation précise de la façon dont les contraintes sont réparties dans l'articulation et les modes de rupture qui peuvent en résulter, on peut distinguer trois modes de rupture différents :

- Rupture d'un des adhérents.
- Rupture cohésive à l'intérieur de l'adhésif.
- Rupture de l'adhésif à l'interface entre l'adhérent et l'adhésif.

La rupture de l'adhérence indique la faiblesse du lien entre l'adhésif et la surface à laquelle il se rapporte. Lors de la conception d'un joint, il est mieux de faire l'adhérent le lien le plus faible [17].



Figure II. 9 Modes de rupture des joints adhésifs (a) rupture d'un des adhérents (b) rupture cohésive à l'intérieur de l'adhésif (c) rupture de l'adhésif à l'interface entre l'adhérent et l'adhésif [17].

3. Contraintes dans les joints adhésifs

3.1. Effet de géométrie et les propriétés de l'adhésif

Les caractéristiques d'un adhésif jouent un rôle important dans la détermination de la résistance d'un joint. Un adhésif qui est ductile et a une densité d'énergie de contrainte de cisaillement élevée à la fracture se traduira par des joints plus forts. Afin de résister aux concentrations de contrainte et à la propagation des fissures, il est important que l'adhésif ait des propriétés telles que la déformation de rupture à haute résistance, l'énergie de rupture et la résistance au décollement. En outre, une contrainte de rendement élevée est nécessaire pour éviter le fluage excessif. L'augmentation de la tension de fracture et de l'énergie de fracture augmentera considérablement la force d'un joint à recouvrement. Cependant, lors de l'assemblage de substrats minces ou faibles ou lorsque de faibles charges de

fonctionnement sont requises, d'autres facteurs tels que le coût, la facilité d'application et la température de durcissement peuvent devoir être pris en compte dans le choix d'un adhésif [10].

L'augmentation du taux d'essai des joints adhésifs structuraux peut avoir un effet similaire à la réduction de température d'essai. Cependant, des changements significatifs dans les propriétés mécaniques nécessitent généralement une augmentation substantielle du taux d'essai, souvent d'un ordre de grandeur ou plus. La conception du joint est essentielle, car des facteurs tels que la géométrie et les matériaux du substrat peuvent avoir un impact significatif sur les propriétés mesurées [10].

La figure II.10 illustre un graphe montre comment la charge de rupture et la contrainte de rupture varient avec la longueur de chevauchement dans un joint collé. À mesure que la longueur de chevauchement augmente, la charge de rupture diminue tandis que la contrainte de rupture augmente. Il y a une longueur de chevauchement spécifique où la charge de rupture et la contrainte de rupture sont égales, indiquant potentiellement une longueur de chevauchement optimale pour maximiser les deux propriétés.

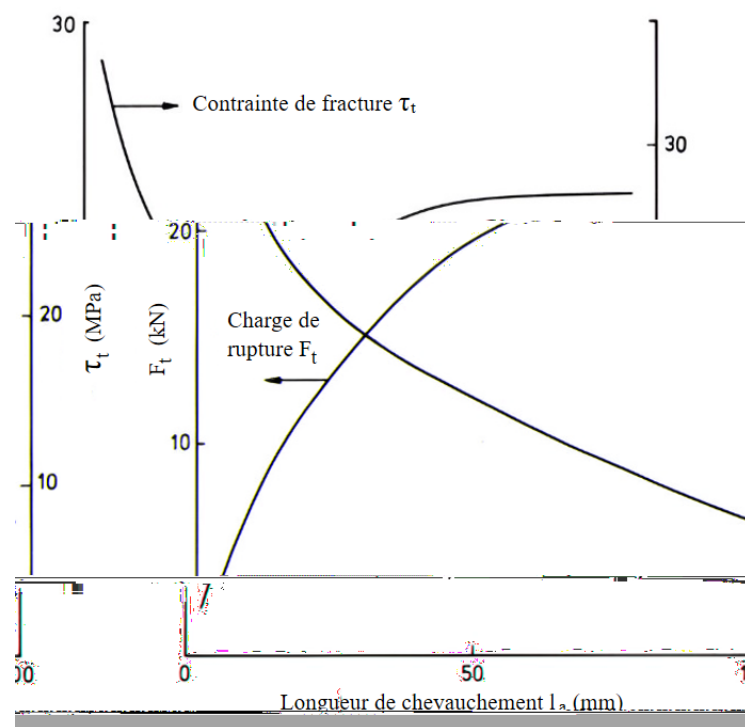


Figure II. 10 Charge de rupture expérimentale et contrainte des joints à recouvrement d'alliage phénolique/aluminium en fonction de la longueur de chevauchement L_a . [10].

La figure II.11 illustre un graphe qui montre comment la résistance au cisaillement de différents matériaux varie en fonction de la température d'essai. Les matériaux étudiés sont

distribution uniforme près de l'interface, augmentant progressivement vers la ligne centrale. La contrainte de cisaillement résiduelle maximale dans la couche adhésif est observée à l'interface ou à proximité et près des extrémités du joint. Dans la pratique, le joint présent généralement une force considérable et la plupart des analyses ont tendance à estimer les contraintes mentionnées [10]. De telles stratégies peuvent atténuer efficacement ces contraintes :

- Utilisation d'un adhésif plus souple,
- Application d'une couche adhésive plus épaisse,
- Application d'une température de durcissement inférieure,

Conclusion

Au cours de la dernière décennie, des progrès importants ont été réalisés dans la mesure des propriétés techniques de base des adhésifs et l'analyse des contraintes dans les joints. Cette méthode a été utilisée pour concevoir des joints plus efficaces dans des structures collées avancées. Cependant, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour confirmer la précision des mesures, modéliser la distribution des contraintes dans les conceptions de joints complexes et établir des critères de rupture pour prédire la rupture des joints. Des essais non destructifs améliorés sont également nécessaires pour établir une corrélation avec les critères de rupture.

Bg` o hsqd

Etude expérimentale

Introduction

Les deux chapitres précédents décrivaient les adhésifs, leurs types et leurs propriétés, la discussion portait sur la conception des joints et les méthodes d'essai normalisées utilisées pour évaluer le comportement mécanique des joints adhésifs.

Ce chapitre présente des expériences visant à déterminer la résistance à la rupture des joints adhésifs en appliquant deux types d'adhésifs sur plusieurs matériaux ayant des caractéristiques différentes.

1. Préparation des éprouvettes

Les matériaux choisis sont :

- Polychlorure de vinyle (PVC) du tuyau de canalisation d'eau.
- Polyéthylène (PE) du tuyau
- Acier inoxydable (316 L) utilisé pour le revêtement des façades extérieures
- Aluminium (Alliage d'aluminium AA6060-T6) utilisé dans l'industrie automobile
- Acier galvanisé des citernes.

Les adhésifs utilisés pour l'assemblage des éprouvettes sont :

- **Époxy** : adhésif thermodurcissable à deux composants composé de résine époxy et durcisseur.
- **Acrylique modifié** : adhésif thermodurcissable à deux composants composé de résine acrylique et durcisseur.

La figure III.1 montre les deux adhésifs utilisés pour l'assemblage.



Figure III. 2 Adhésifs utilisées (a) époxy (b) acrylique modifié

Etape 01 : avant de commencer le processus d'assemblage, les éprouvettes doivent être coupées d'une forme appropriée comme il est montré par la figure III.1, avec les dimensions donnée par le tableau III.1.

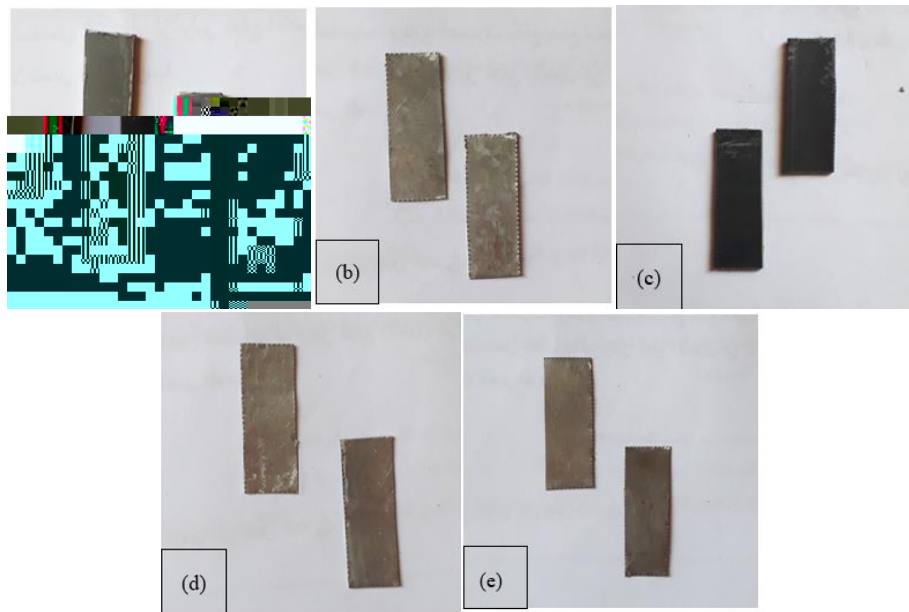


Figure III. 3 les éprouvettes d'essai (a) PVC (b) acier galvanisé (c) PE (d) aluminium (e) acier inox.

Tableau III. 1 Dimensions des éprouvettes

Matériaux	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)
Acier inox	60	10	0.3
Acier galvanisé	60	10	0.3
Aluminium	60	10	0.3
PE	60	10	1.3
PVC	60	10	1.6

Etape 02 : on abrase légèrement les éprouvettes avec un papier de verre, puis un nettoyage avec l'acétone.

Etape 03 : on prépare l'adhésif dans un plat propre, et mettant une quantité égale de résine et de durcisseur, puis mélanger les deux composants. On assembler les éprouvettes et appliquer une pression à la zone collée pendant environ 4 min, puis laisser durcir à l'air (préférable d'être dans un endroit ouvert) pendant plus d'une heure.

La figure III.3 montre les éprouvettes assemblées par époxy.

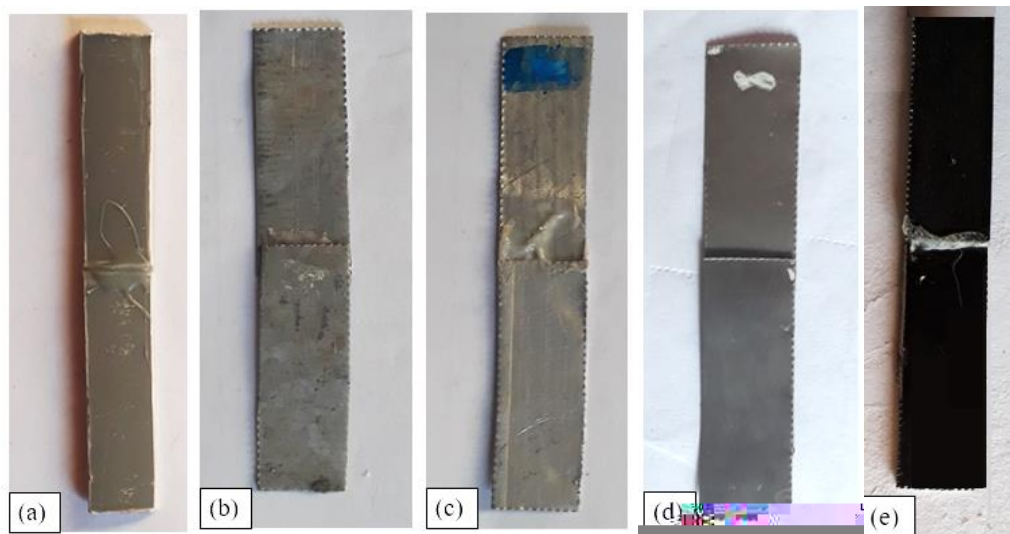


Figure III. 4 Eprouvettes assemblées par acrylique modifié (a) PVC (b) acier galvanisé (c) aluminium (d) acier inox (e) PE.

La figure III.4 montre les éprouvettes assemblées par acrylique modifié.

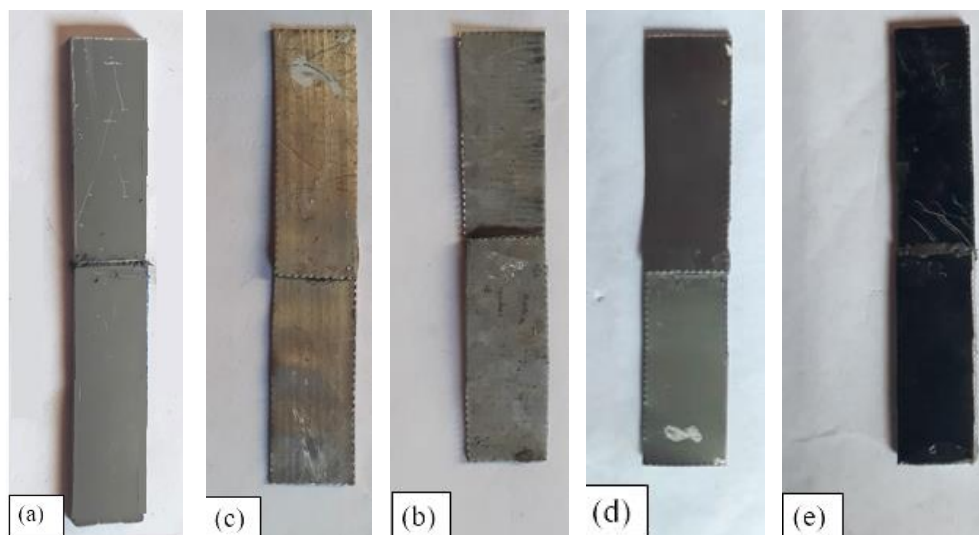


Figure III. 5 Eprouvettes assemblées par époxy (a) PVC (b) acier galvanisé (c) aluminium (d) acier inox (e) PE.

2. Essai de traction

- L'appareil utilisé pour effectuer l'essai est une machine de traction manuelle.
- L'éprouvette d'essai est placée entre les mâchoires de la machine (voir figure III.5).
- Des poids sont maintenus à la mâchoire mobile et reliés à un câble par deux poulies (voir figure III.6). Ces poids sont ajoutés progressivement, en même temps nous commençons à ajouter du sable jusqu'à ce que l'échantillon se brise (rupture de la pièce).
- Lors de la rupture, la masse finale des poids et du sable est prise pour la pesée.



Figure III. 6 Machine de traction

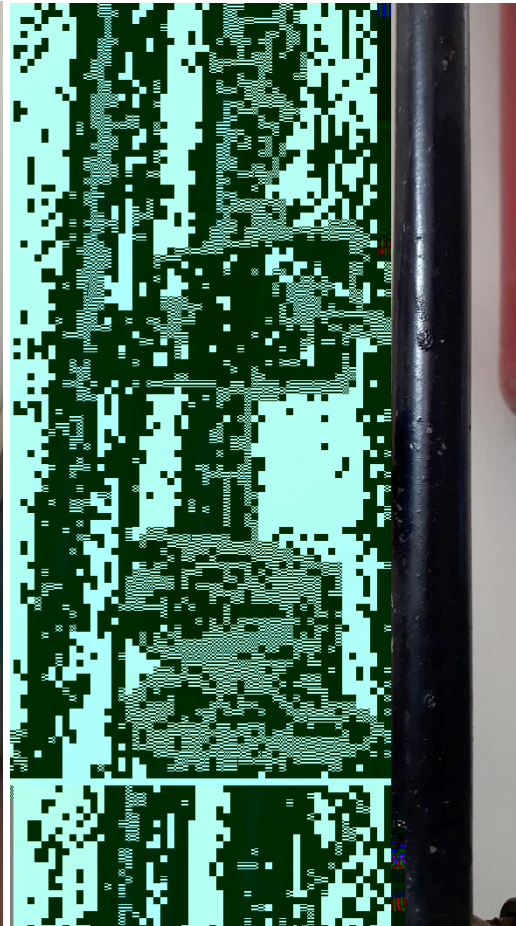


Figure III. 7 Éprouvette placée dans la machine

Les figures III.7 et III.8 montrent respectivement le type de rupture des éprouvettes d'essai assemblées par acrylique modifié et des éprouvettes d'essai assemblées par époxy. L'apparition d'une rupture dans la couche adhésive indique une rupture cohésive. Ce type de rupture est causé par la résistance insuffisante de l'adhésif. Aussi, si ce dernier est excessivement doux.

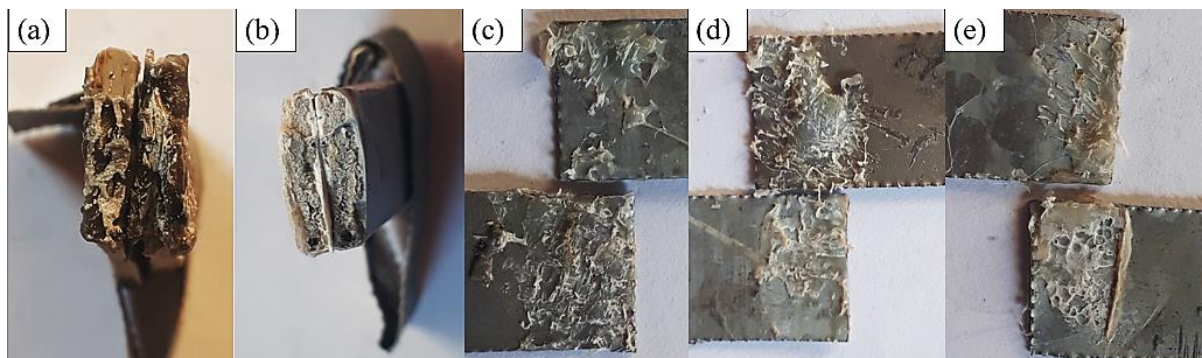


Figure III. 8 Rupture cohésive des éprouvette assemblé par acrylique modifié (a) PE (b) PVC (c) acier inox (d) acier galvanisé (e) aluminium.

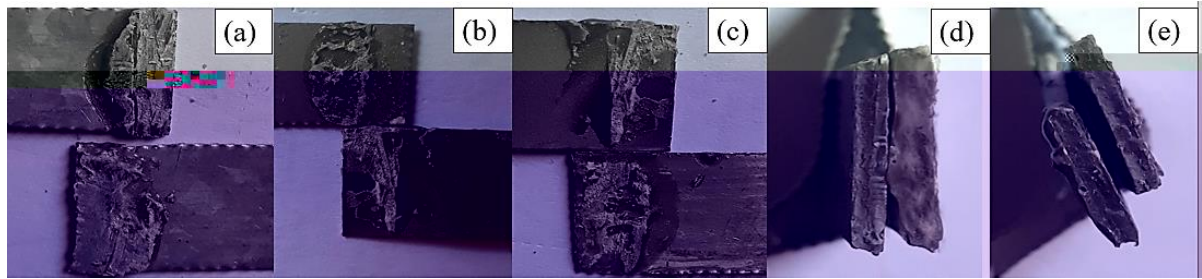


Figure III. 9 Rupture cohésive des éprouvette assemblé par acrylique modifié (a) acier galvanisé (b) acier inox (c) aluminium (d) PVC (e) PE.

3. Résultats c d k d r r ` h c d s q ` b s l m m :

On calcule la force de rupture obtenue par cette équation :

$$F \text{ (N)} = M \text{ (kg)} \cdot g \text{ (m/s}^2\text{)} \quad \text{Eq III. 1}$$

3.1 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE :

3.1.1 Assemblage par époxy :

Les valeurs des forces de rupture maximales sont données dans le tableau III.2.

Tableau III. 2 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy.

M c d k o q n t u d s s d	Forces de rupture
1	142.245
2	128.7072
3	123.4098
4	134.6913

La figure III.9 représente l'histogramme représentatif des valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy.

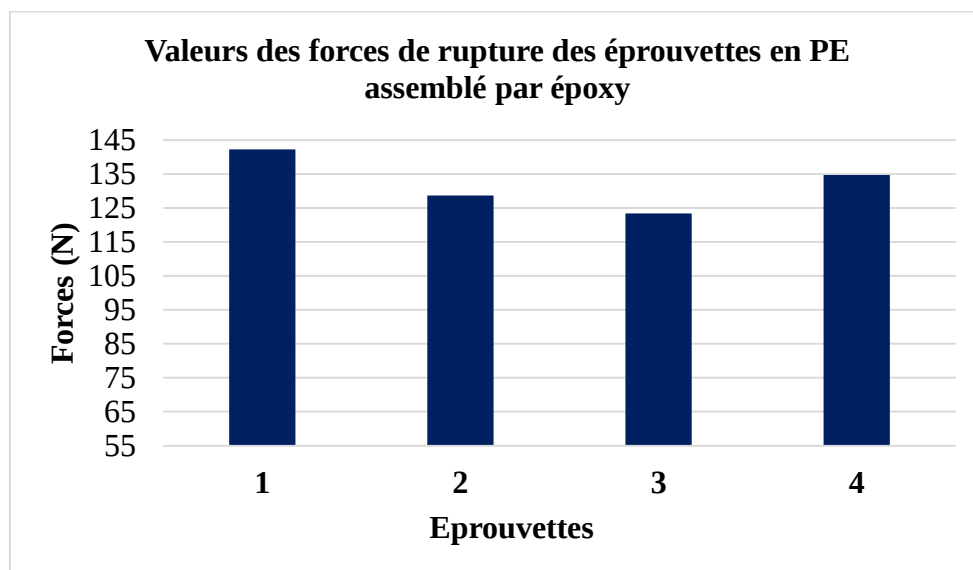


Figure III. 10 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy

3.1.2 Assemblage par acrylique modifié :

Les valeurs des forces de rupture maximales sont données dans le tableau III.3

Tableau III. 3 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par acrylique modifié.

M c d k o q n t u d s s d	Forces de rupture
1	136.26 N
2	142.44 N
3	123.6 N
4	132.24 N

La figure III.10 représente l'histogramme représentatif des valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy.

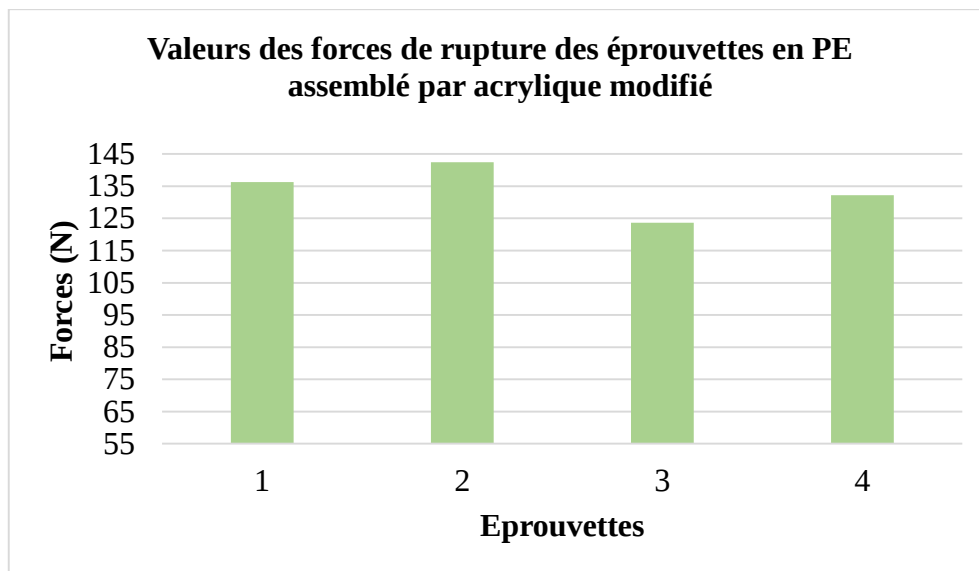


Figure III. 11 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par acrylique modifié.

3.2 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PVC :

3.2.1 Assemblage par époxy :

Les valeurs des forces de rupture maximales sont données dans le tableau III.4

Tableau III. 4 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PVC assemblé par époxy.

M c d k o q n t u d s s d	Forces de rupture
1	115.17 N
2	120.66 N
3	102.8 N
4	109.8 N

La figure III.11 représente l'histogramme représentatif des valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy.

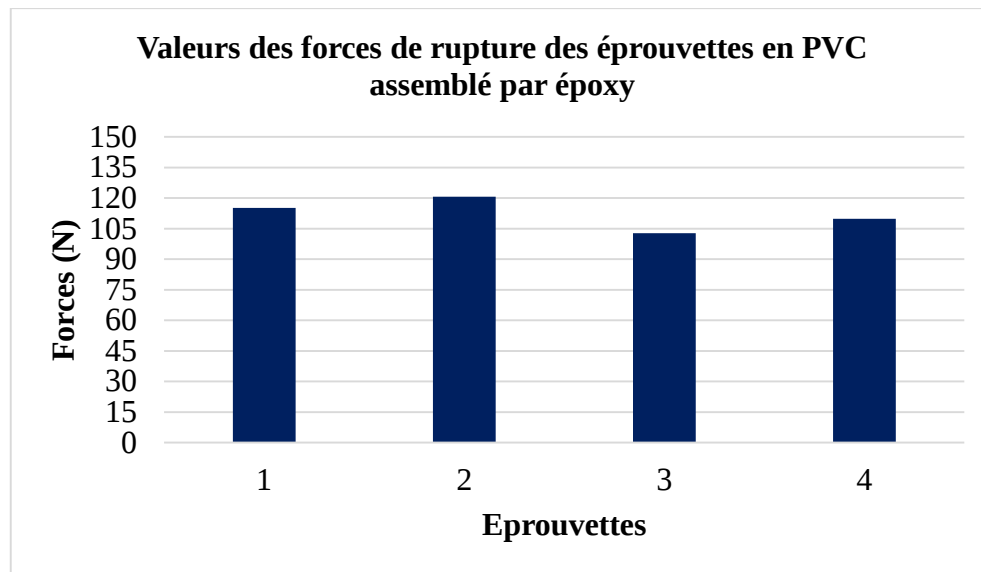


Figure III. 12 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PVC assemblé par époxy.

3.2.2 Assemblage par acrylique modifié :

Les valeurs des forces de rupture maximales sont données dans le tableau III.5

Tableau III. 5 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PVC assemblé par acrylique modifié.

M c d k o q n t u d s s d	Forces de rupture
1	126.45 N
2	124.58 N
3	133.3 N
4	126.45 N

La figure III.12 représente l'histogramme représentatif des valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy.

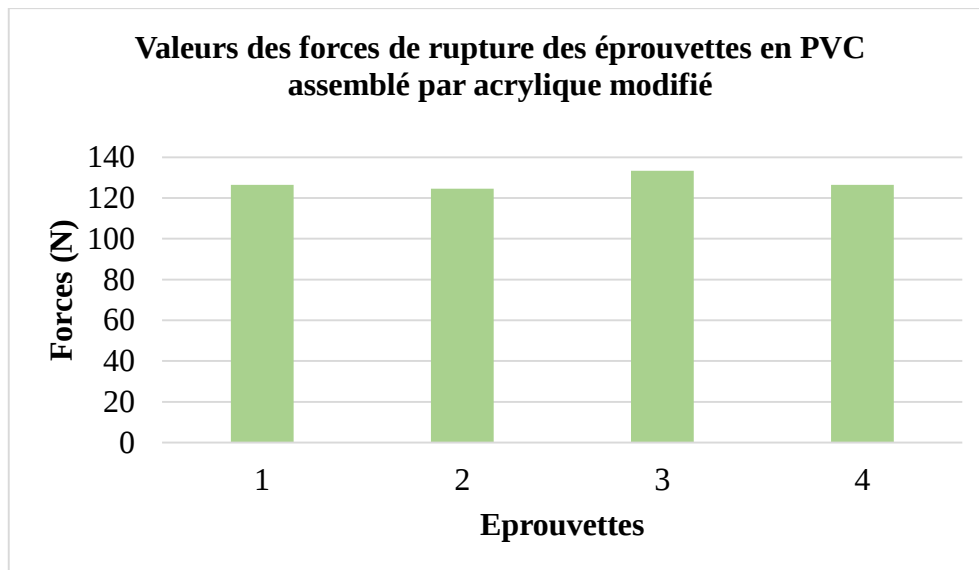


Figure III. 13 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PVC assemblé par acrylique modifié.

3.3. Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier inox :

3.3.1 Assemblage par époxy :

Les valeurs des forces de rupture maximales sont données dans le tableau III.6.

Tableau III. 6 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier inox assemblé par époxy.

M c d k o q n t u d s s d	Forces de rupture
1	285.96 N
2	272.9 N
3	284.98 N
4	289.5 N

La figure III.13 représente l'histogramme représentatif des valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy.

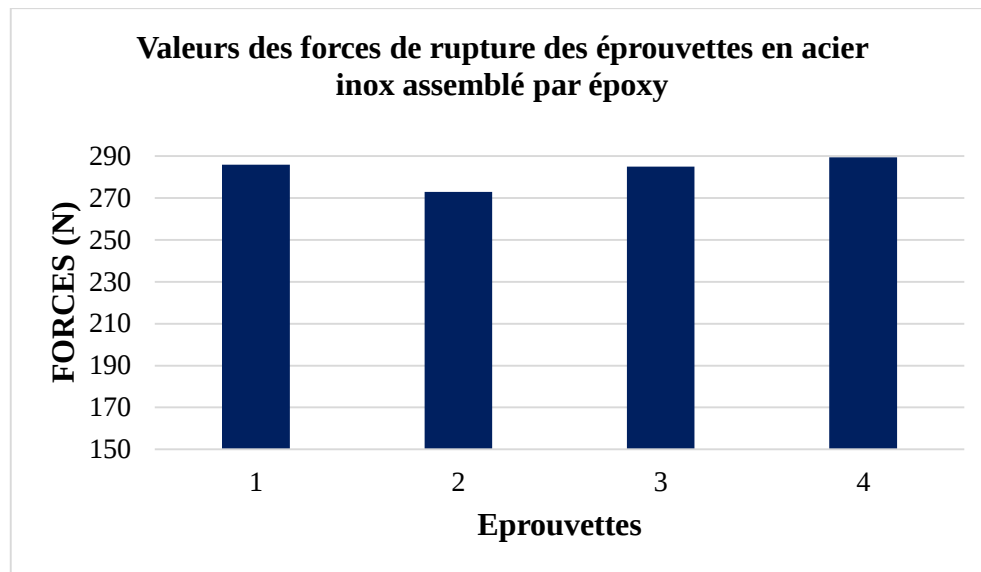


Figure III. 14 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier inox assemblé par époxy.

3.3.2 Assemblage par acrylique modifié :

Les valeurs des forces de rupture maximales sont données dans le tableau III.7.

Tableau III. 7 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier inox assemblé par acrylique modifié.

M c d k o q n t u d s s d	Forces de rupture
1	238.77 N
2	259.76 N
3	245.05N
4	238.57N

La figure III.14 représente l'histogramme représentatif des valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy.

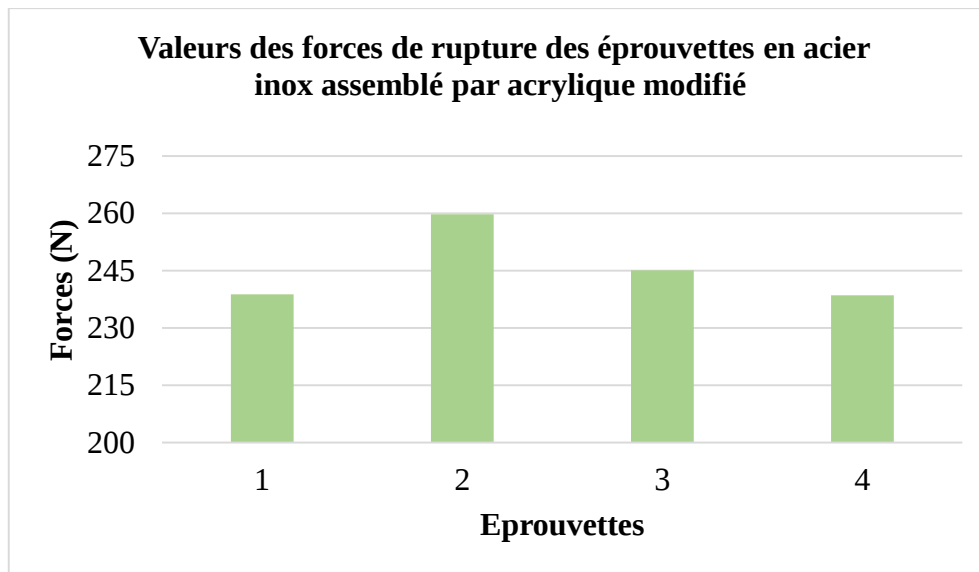


Figure III. 15 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier inox assemblé par acrylique modifié.

3.4. Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en aluminium :

3.4.1 Assemblage par époxy :

Les valeurs des forces de rupture maximales sont données dans le tableau III.8.

Tableau III. 8 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en aluminium assemblé par époxy.

M c d k o q n t u d s s d	Forces de rupture
1	62.48 N
2	65.72 N
3	45.32 N
4	56.21 N

La figure III.15 représente l'histogramme représentatif des valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy.

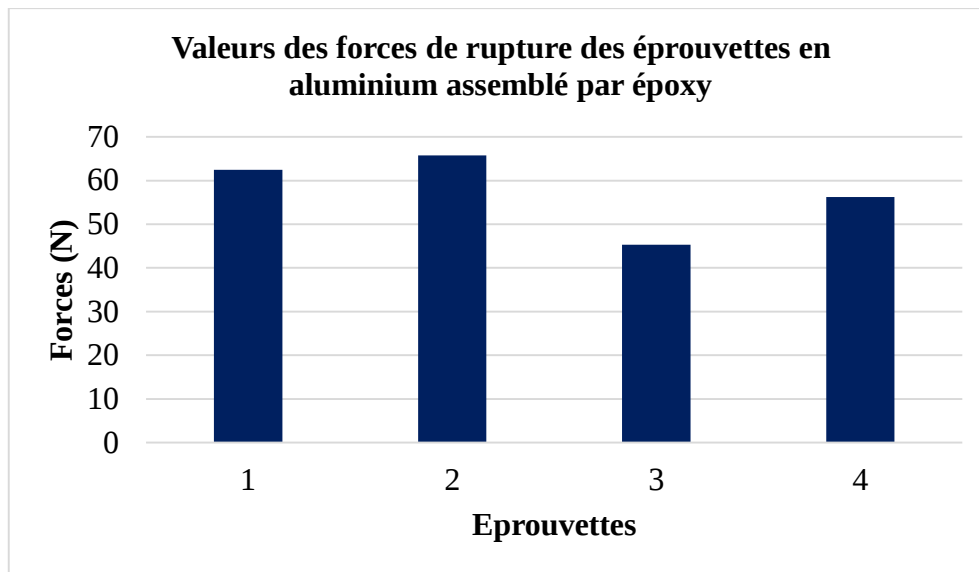


Figure III. 16 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en aluminium assemblé par époxy.

3.4.1 Assemblage par acrylique modifié :

Les valeurs des forces de rupture maximales sont données dans le tableau III.9.

Tableau III. 9 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en aluminium assemblé par acrylique modifié.

N° de k o qnt udssd	Forces de rupture
1	191.88 N
2	181.19 N
3	178.83 N
4	173.24 N

La figure III.16 représente l'histogramme représentatif des valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy.

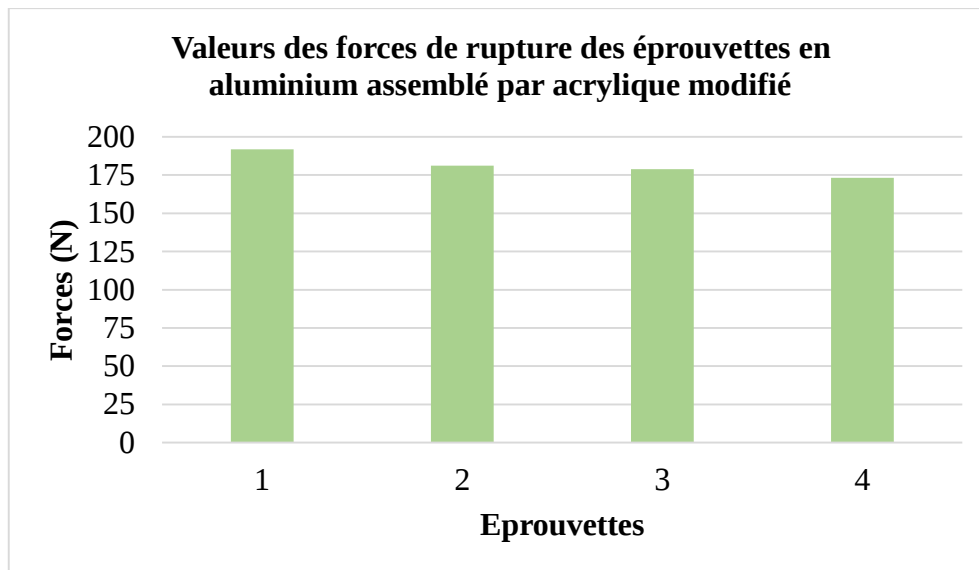


Figure III. 17 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en aluminium assemblé par acrylique modifié.

3.5. Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier galvanisé :

3.5.1 Assemblage par époxy :

Les valeurs des forces de rupture maximales sont données dans le tableau III.10.

Tableau III. 10 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier galvanisé assemblé par époxy.

M c d k o q n t u d s s d	Forces de rupture
1	226.74 N
2	200.45 N
3	206.14 N
4	232.43 N

La figure III.17 représente l'histogramme représentatif des valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy.

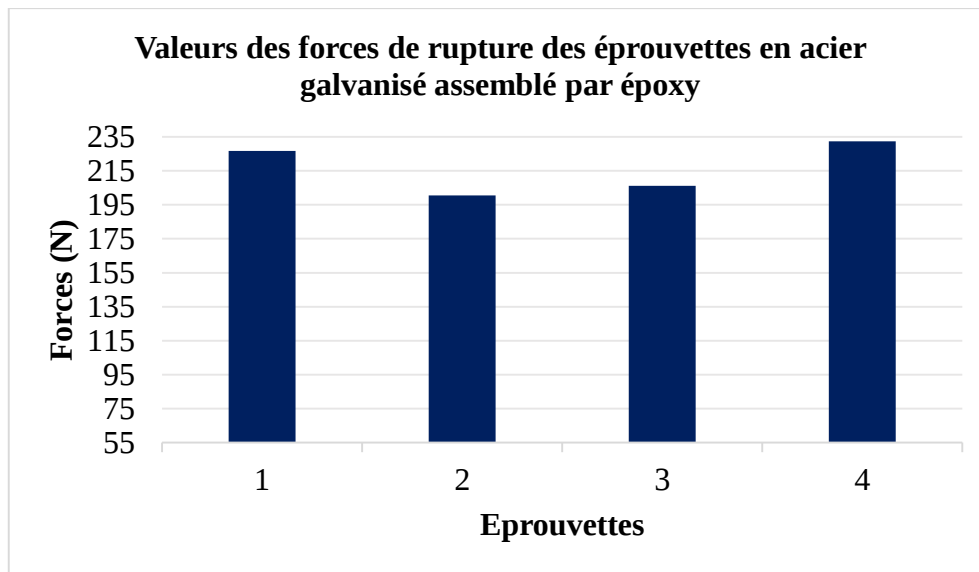


Figure III. 18 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier galvanisé assemblé par époxy.

3.5.2 Assemblage par acrylique modifié :

Les valeurs des forces de rupture maximales sont données dans le tableau III.11.

Tableau III. 11 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier galvanisé assemblé par acrylique modifié.

M c d k o q n t u d s s d	Forces de rupture
1	105.948 N
2	92.214 N
3	109.87 N
4	105.5 N

La figure III.18 représente l'histogramme représentatif des valeurs des forces de rupture des éprouvettes en PE assemblé par époxy.

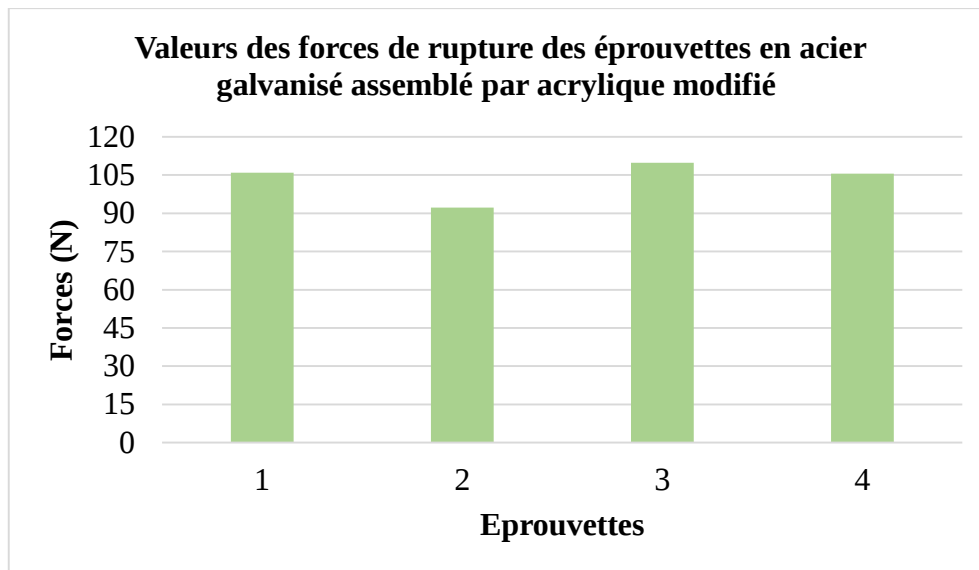


Figure III. 19 Valeurs des forces de rupture des éprouvettes en acier galvanisé assemblé par acrylique modifié.

5. Interprétation des résultats :

On peut dire que, l'acier inoxydable a montré la plus grande résistance de rupture avec les deux adhésifs, tandis que les autres matériaux ont montré des taux variables de résistance à la rupture. Ces résultats soulignent l'importance du choix de l'adhésif en fonction du matériau spécifique à assembler.

Conclusion

En conclusion, cette étude a permis d'explorer les performances de deux types d'adhésifs, l'époxy et l'acrylique modifié, sur différents matériaux (PVC, PE, acier inoxydable, aluminium et acier galvanisé). Les résultats ont montré que l'acier inoxydable présent la plus haute résistance aux deux adhésifs par rapport aux autres matériaux. Cependant, l'aluminium a montré un comportement distinctif, avec une résistance maximale plus élevée lors de l'application d'acrylique, contrairement à l'époxy. Il est également intéressant de noter que le PE a montré un niveau de résistance relativement constant, indépendamment du type d'adhésif utilisé. En revanche, pour le PVC, l'acrylique a conduit à une résistance légèrement supérieure par rapport à l'époxy.

Ces résultats soulignent l'importance de choisir le bon adhésif en fonction du matériau spécifique à assembler. Ils fournissent également des informations précieuses pour la conception de joints adhésifs dans diverses applications industrielles.

Bg` ohsqd U

Modélisation numérique

Introduction

Actuellement, la liaison adhésive est modélisée par l'analyse des éléments finis, et la modélisation de zone cohésive est une technique largement utilisée en raison de sa capacité à simuler avec précision le mécanisme de rupture du joint.

Dans ce chapitre nous utiliserons le logiciel ABAQUS et la simulation se fera par la modélisation de zone cohésive, ne nécessite qu'une connaissance approfondie des propriétés de traction et de cisaillement du matériau en plus des valeurs d'énergie de rupture.

1. Description de logiciel

ABAQUS est un logiciel propriétaire largement utilisé pour l'analyse des éléments finis et l'ingénierie assistée par ordinateur, comprend les éléments suivants :

- ABAQUS/Standard (le solveur pour les charges quasi-statiques)
- ABAQUS/Explicit (les charges/impacts transitoires du solveur)
- ABAQUS/CAE (une interface visuelle)

Dans ABAQUS, comme dans la plupart des logiciels de simulation par l'analyse des éléments finis, l'utilisateur est responsable de la cohérence des unités utilisées. Il n'y a pas d'unités prédéfinies dans le logiciel. Lorsque le travail sur des joints adhésifs, il est courant d'utiliser les millimètres pour les dimensions et les Newtons pour les forces. Par conséquent, les contraintes, qui sont définies comme la force par unité de surface, seront en MPa (Mégapascals), ce qui équivaut à des N/mm². Système unitaire pour la modélisation des joints assemblée par adhésif :

- Longueur : mm (millimètre)
- Température : °C (Celsius)
- Énergie : mj (milli joule)
- Dilatation Thermique : 1/°C (A)
- Puissance Thermique : W (Watt)
- Conductivité Thermique : W/mm.k
- Durée : S (Secondes)
- Masse : Tonne
- Force : N (Newtons)
- Traction/Compression : MPa ou N/mm²

Les propriétés dont nous avons besoin pour effectuer la simulation sont données dans le tableau IV.1 et tableau IV.2.

Tableau IV. 1 Caractéristiques physiques des matériaux [18].

Propriétés	Inox	Al	Galvanisé	PE	PVC
Résistance à la traction (MPa)	505	90	400	0.125-60.8	7-64.8
Module de Young (GPa)	190	67.9	210	1.72	3.75
Module de cisaillement (GPa)	77	25	80	2.5	1.45
Coefficient de poisons	0.29	0.36	0.29	0.5	0.16

Tableau IV. 2 Caractéristiques physiques des adhésifs [18].

Propriétés	Epoxy	Acrylique modifié
Viscosité (Cp)	20 e+3	14 e+3
Résistance à la tractions (MPa)	5.17 - 97	30 - 82
Module de Young (GPa)	3.96	2.74
Module de cisaillement (GPa)	1.07-586	1.25-480
Coefficient de poisons	0.35-0.42	0.37-0.45

2. Méthode de travail

- Construction du modèle en utilisant ABAQUS.
- Comprend toutes les propriétés mécaniques, les propriétés de rupture élastique.
- Création de toutes les sections.
- Appliquer toutes les conditions aux limites.
- Générer le maillage dans tous les modèles.
- Exécuter le modèle.
- Visualisation de la réponse du modèle aux contraintes de chargement appliquées.

2.1. Dessin des pièces :

Dessin et extrusion d'une forme de joint à recouvrement pour les pièces mince et joint bout à bout pour les éprouvettes épais (figures IV.1, IV.2).

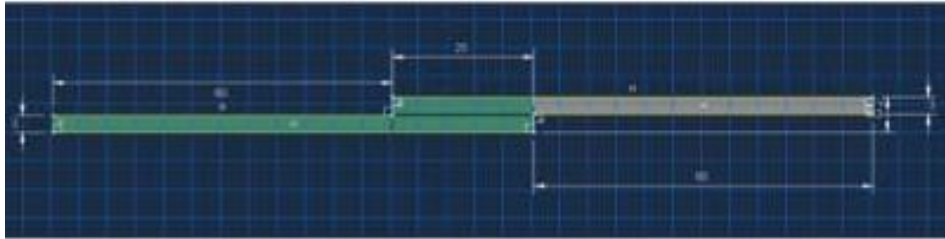


Figure IV. 1 dessin des éprouvettes à recouvrement

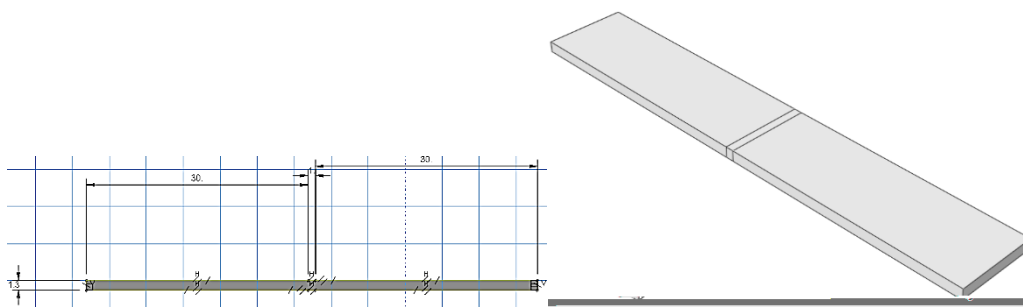


Figure IV. 2 dessin des éprouvettes bout à bout

2.2. Propriété des matériaux :

Entrer les propriétés nécessaires de chaque matériau, comme le module de Young et le coefficient de poisson, et pour les adhésifs, il faut définir une condition "Quads Damage" après, en appliquant module de traction E et les modules de cisaillement G1 et G2 (figures IV.3).

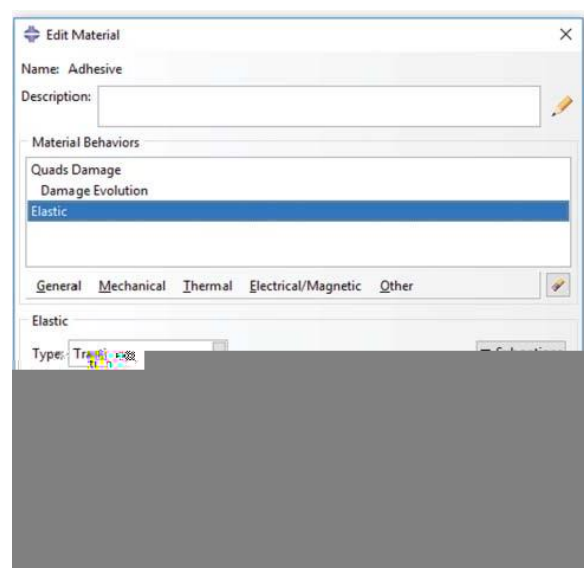


Figure IV. 3 Propriété des matériaux

Depuis, on édite le bouton « suboption », et en définissant le type d'évolution des dommages comme énergie (figure IV.4).

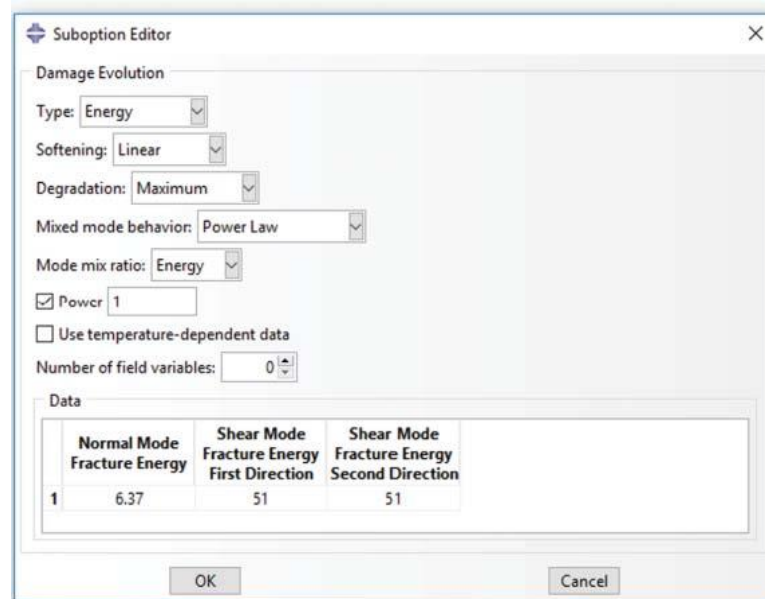


Figure IV. 4 Propriété des matériaux (Suboption)

2.3. Création des sections :

Création d'une section "Solide" puis "Homogène" pour définir les matériaux à assembler, et pour les adhésifs en sélectionnant "**other**" puis "**cohesive**" (type de contact entre les pièces). Ces sections sont elles-mêmes assignées aux emplacements géométriques dans le modèle réel (figure IV.5).

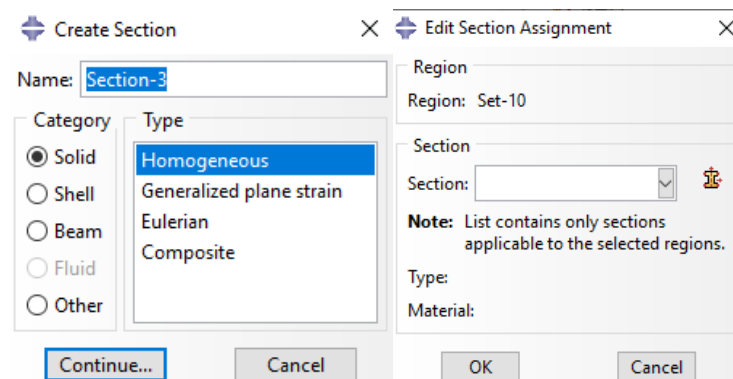


Figure IV. 5 Création des sections

2.4. Assemblage :

Après la création de la section on fait l'assemblage.

2.5. Création de step :

En créer un step et définir La taille de l'incrément qui régit la progression du modèle, la taille de l'incrément correspond à un pourcentage de la durée de la simulation (figure IV.6).

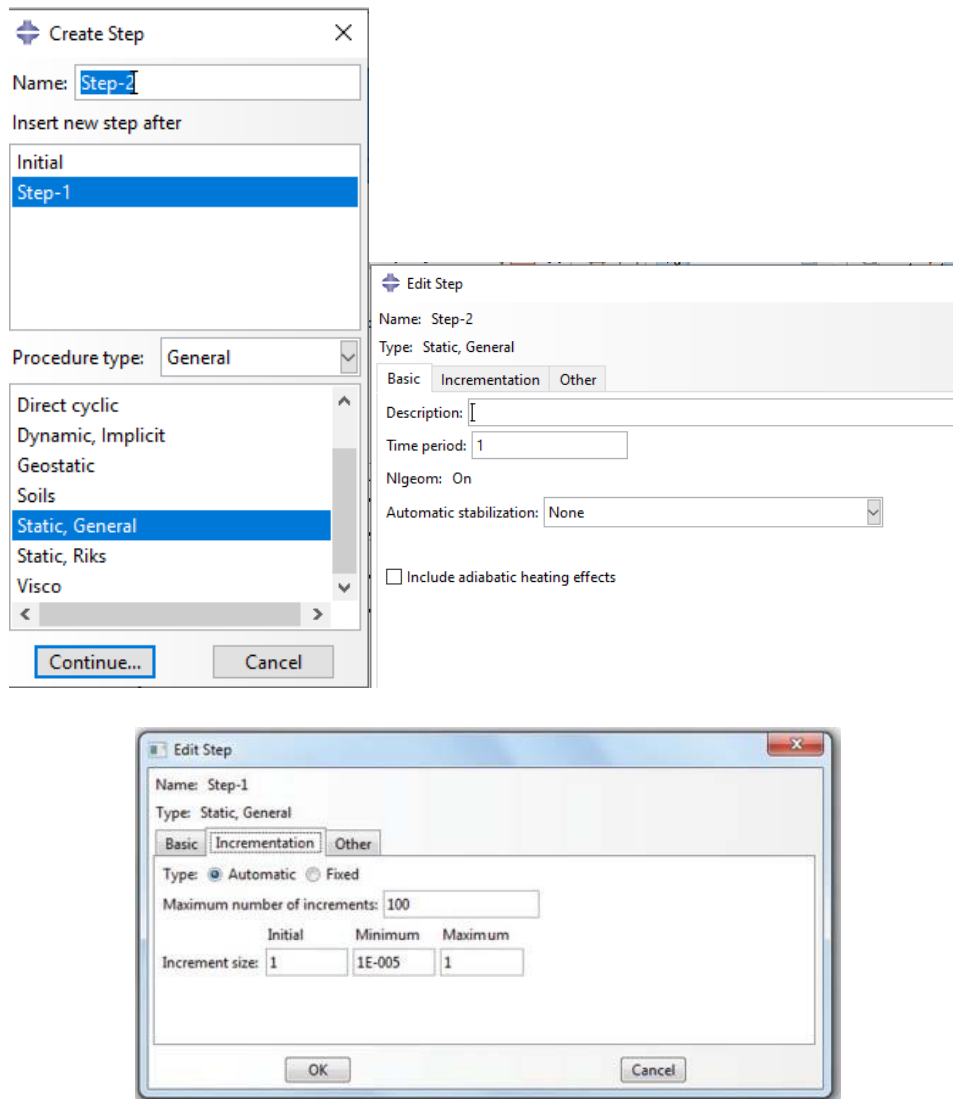


Figure IV. 6 Création de step

2.6. Création des charges et forces :

Définir un encastrement a une des faces du model et créer à l'autre ace une charge comme la figure IV.7 indique.

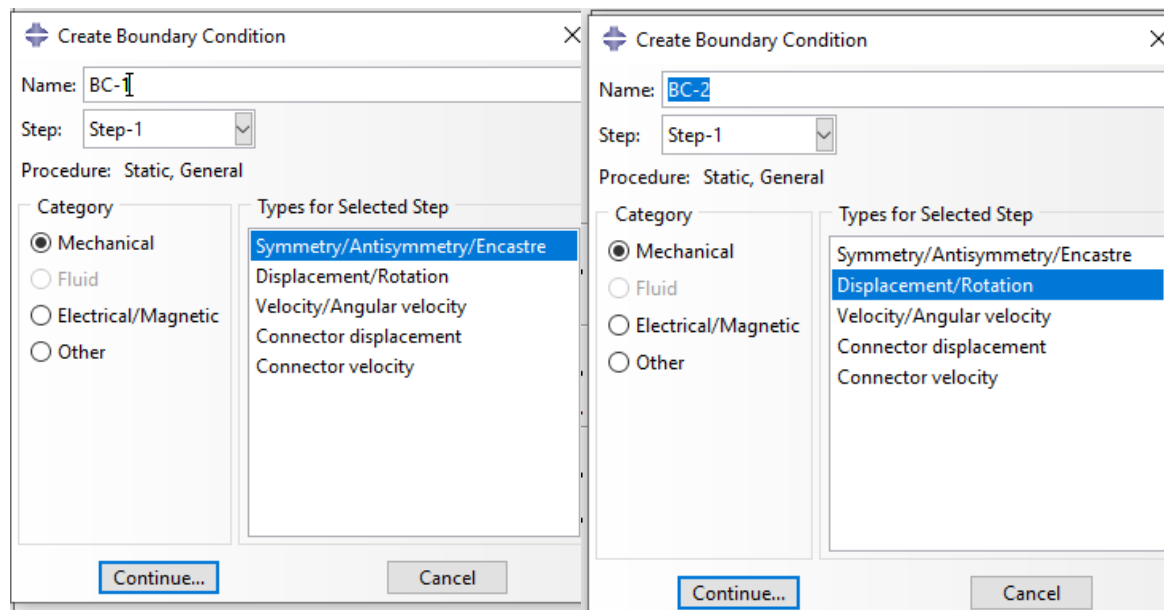


Figure IV. 7 Création des charges et forces

2.7. Module du maillage :

En effectuée un maillage de 0.5 comme il est montré dans la figure IV.8 par appliquer des nœuds qui serviront à guider la division du modèle en un maillage bien défini d'éléments.

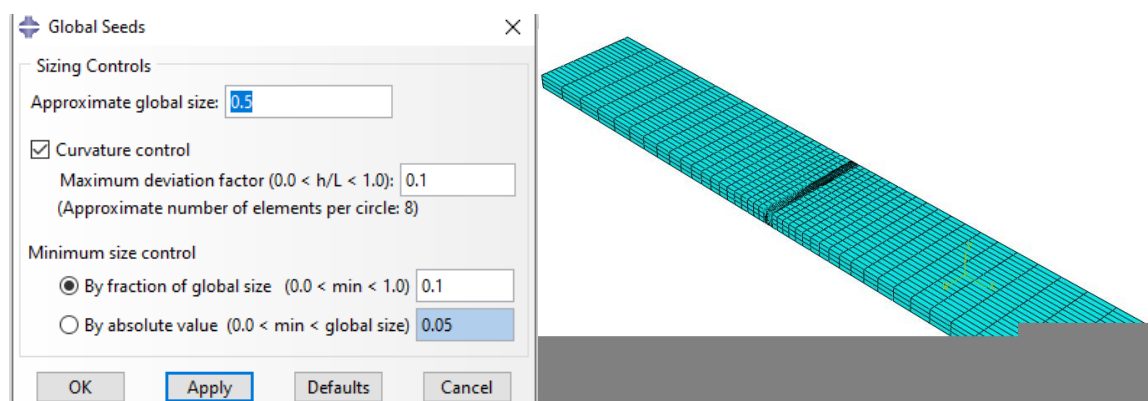


Figure IV. 8 Module du maillage

2.8. Module Job

Enfin, le modèle est soumis et surveillé dans la boîte de dialogue (figure IV.9).

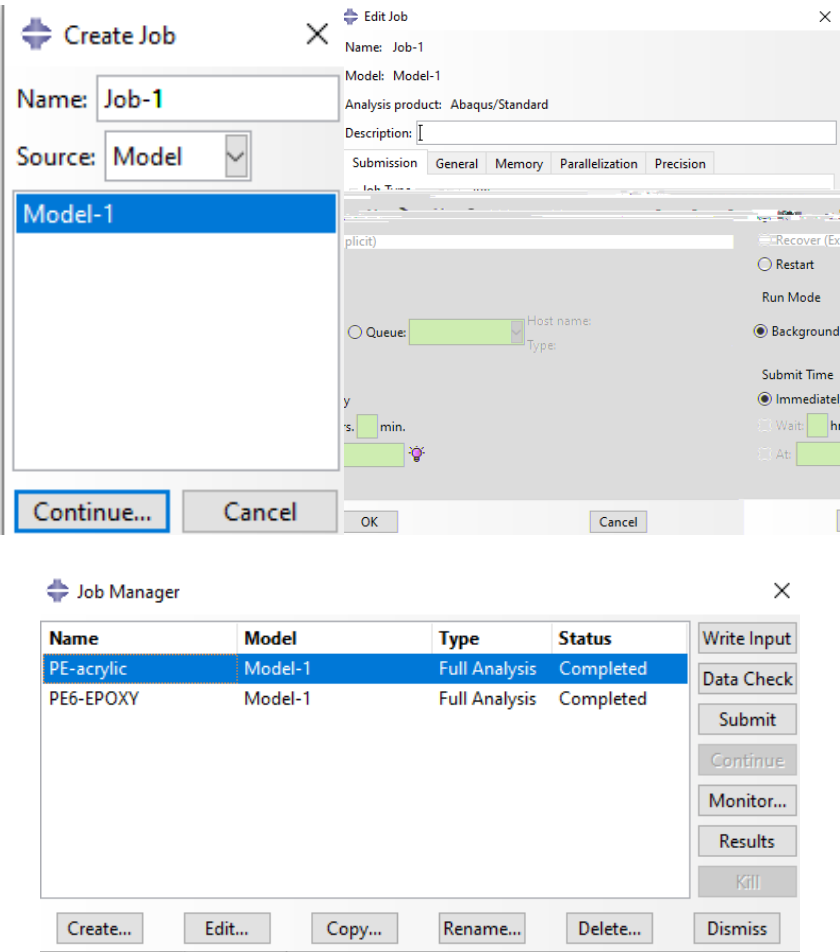


Figure IV. 9 Module Job

3. Résultats de simulation

3.1. Résultats simulation de PE

3.1.1. Assemblage par époxy

La figure IV.10 montre les résultats de simulation de joint de la pièce en PE.

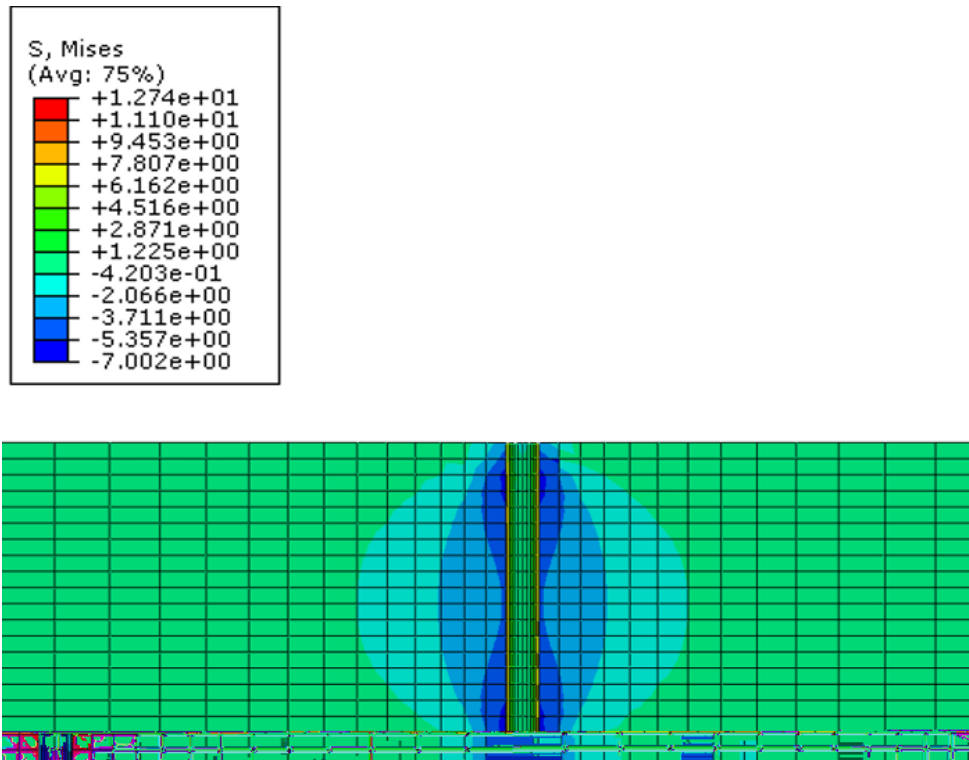


Figure IV. 10 Simulation de joint adhésif de la pièce en PE.

Résultat de l'essai pratique :

— — — — —

3.1.2. Assemblage par Acrylique modifié

La figure IV.11 montre les résultats de simulation de joint adhésif de la pièce en PE.

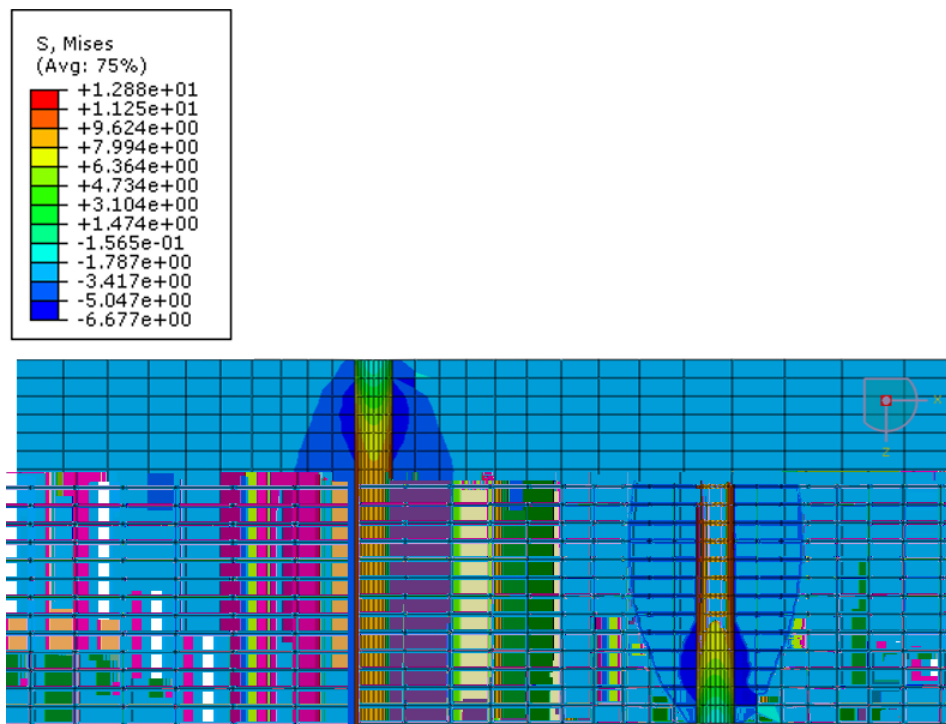


Figure IV. 11 Simulation de joint adhésif de la pièce en PE

Résultat de l'essai pratique :

— — — — —

3.2. Résultats simulation de PVC

3.2.1. Assemblage par époxy

La figure IV.12 montre les résultats de simulation de joint adhésif de la pièce en PVC.

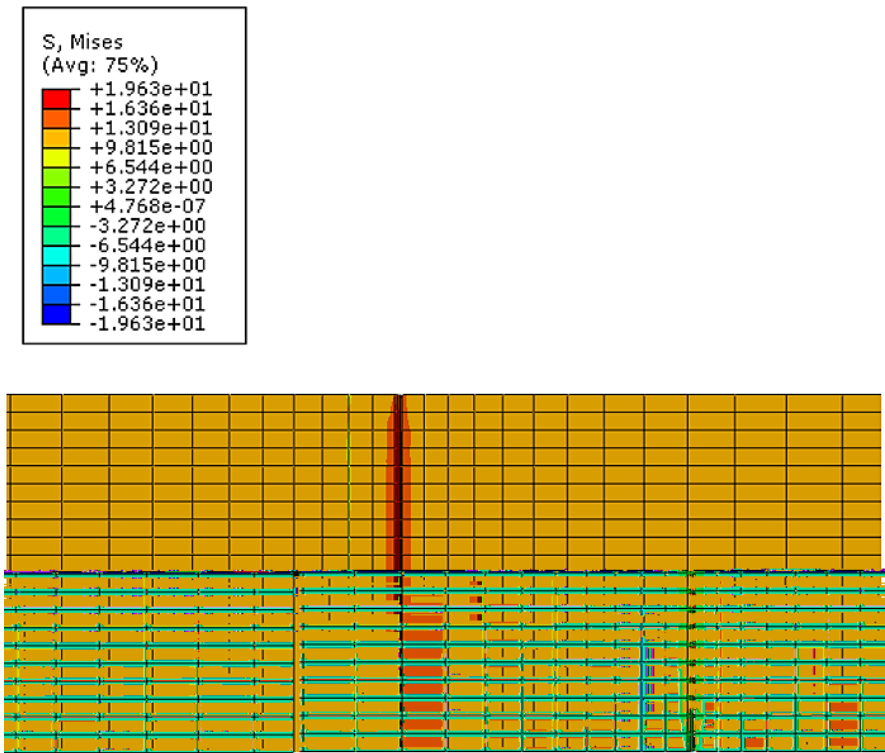


Figure IV. 12 Simulation de joint adhésif de la pièce PVC.

Résultats de l’essai pratique :

— — — — —

3.2.2. Assemblage par Acrylique modifié

La figure IV.13 montre les résultats de simulation de joint adhésif de la pièce en PVC.

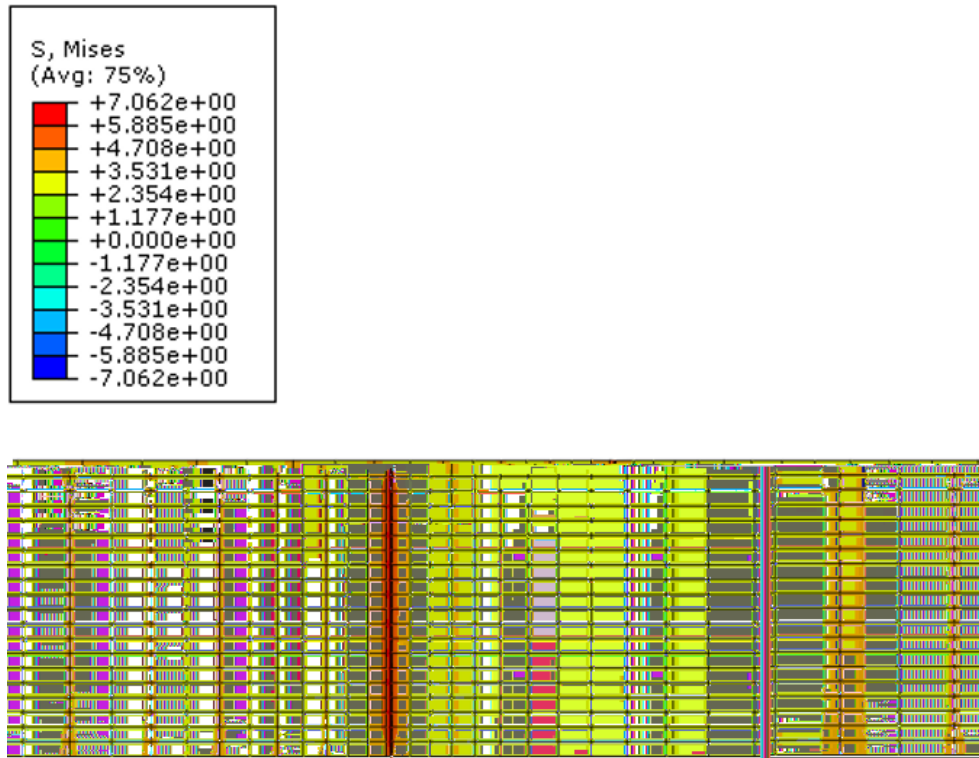


Figure IV. 13 Simulation de joint adhésif de la pièce en PVC.

Résultat de l'essai pratique :

— — — — —

3.3. Résultats r  t k  shmc d   l  minium

3.3.1. Assemblage par époxy

La figure IV.14 montre les résultats de simulation de joint adhésif de la pièce en aluminium.

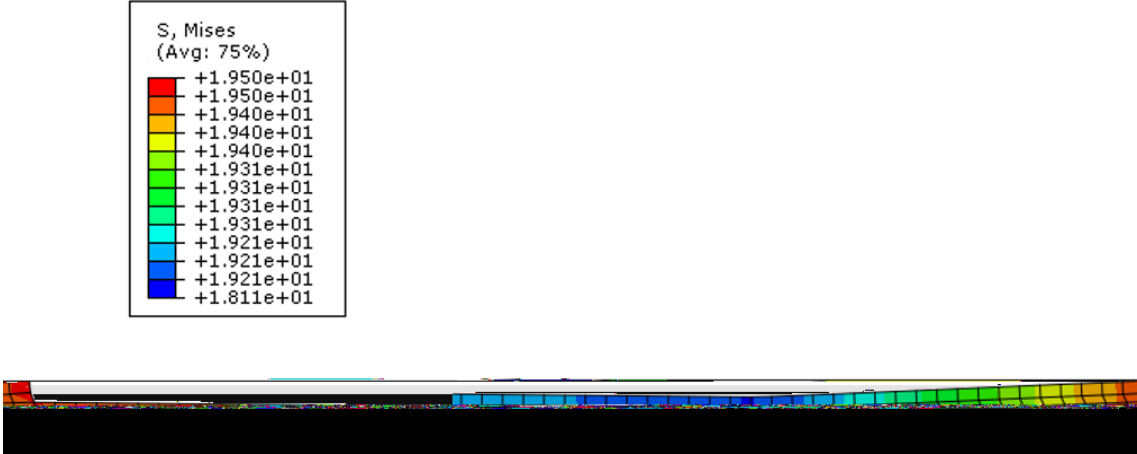


Figure IV. 14 Simulation de joint adhésif de la pièce en aluminium.

Résultat de l  essai pratique :

— — — — —

3.3.2. Assemblage par Acrylique modifié

La figure IV.15 montre les résultats de simulation de joint adhésif de la pièce en aluminium.

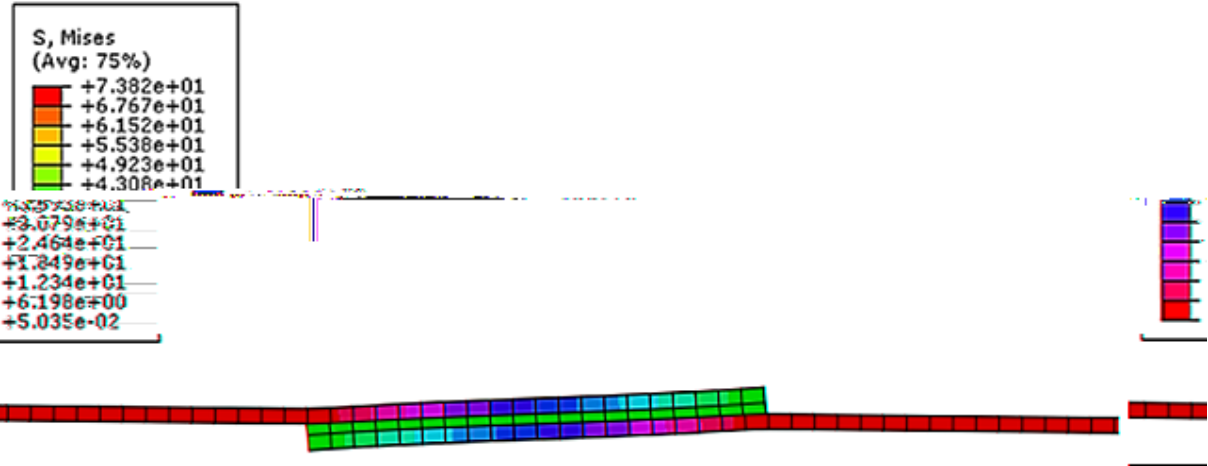


Figure IV. 15 Simulation de joint adhésif de de la pièce en aluminium.

Résultat de l  essai pratique :

— — — — —

3.4. Résultats simulation de l'acier galvanisé

3.4.1. Assemblage par époxy

La figure IV.16 montre les résultats de simulation de joint adhésif de la pièce en acier galvanisé.

Figure IV. 16

3.5. Résultats simulation de kAcier inoxydable

3.5.1. Assemblage par époxy

La figure IV.18 montre les résultats de simulation de joint adhésif de la pièce en acier inox.

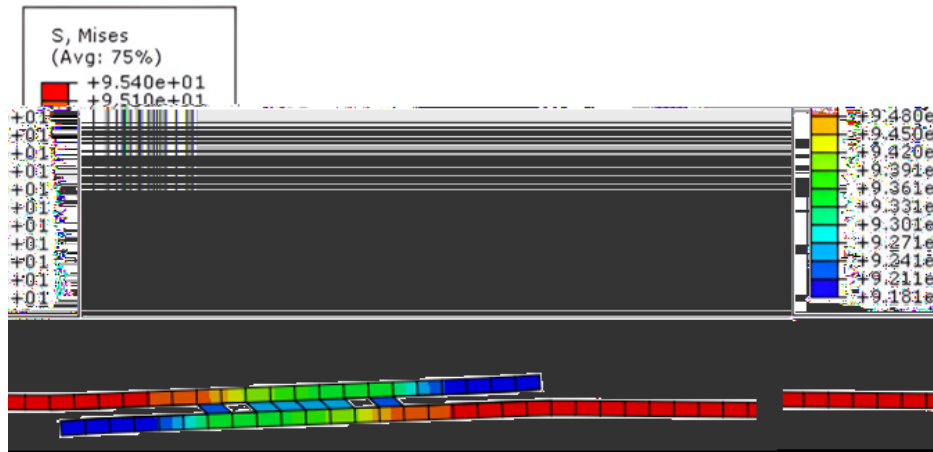


Figure IV. 18 Simulation de joint adhésif de la pièce en acier inox.

Résultat de l’essai pratique :

— — — — —

3.5.2. Assemblage par Acrylique modifié

La figure IV.19 montre les résultats de simulation de joint adhésif de la pièce en acier inox.

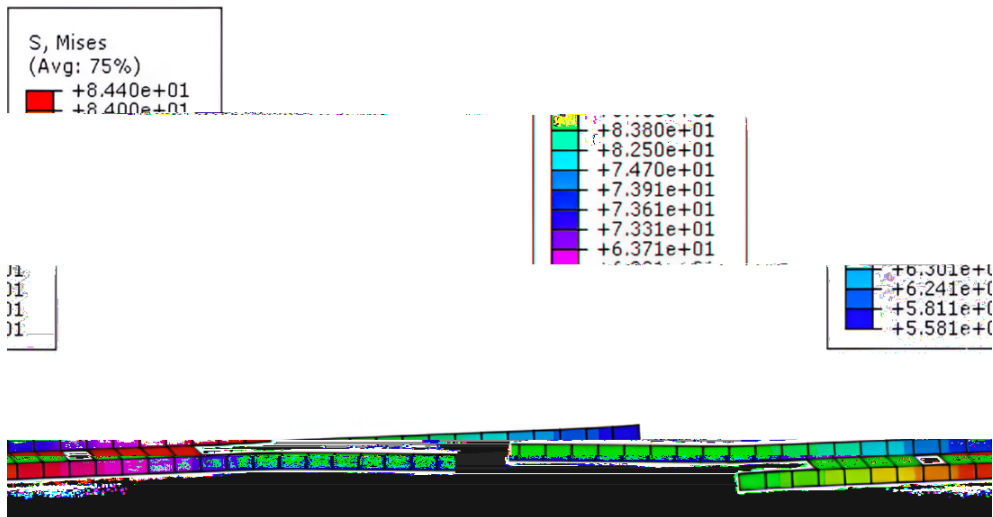


Figure IV. 19 Simulation de joint adhésif de la pièce en acier inox.

Résultat de l’essai pratique :

— — — — —

4. Interprétation des résultats

Le tableau IV.1 montre une comparaison entre les résultats de simulation et les résultats pratiques de chaque matériau.

Il est à noter que les résultats de la simulation correspondent généralement aux résultats de l'essai pratique. Cependant, une exception notable concerne le cas de l'acier galvanisé assemblé par époxy, où les résultats de la simulation diffèrent considérablement de ceux de l'essai pratique.

Tableau IV. 3 Comparaison entre les résultats de simulation et les résultats pratiques.

Adhésifs	Matériaux	Résultat de simulation	Résultat pratique
Époxy	Acier galvanisé	55.25 - 82.81 MPa	72.14 MPa
	Aluminium	19.4 - 19.5 MPa	19.14 MPa
	Acier inox	94.2 - 95.4 MPa	94.44 MPa
	PE	6.16 - 12.74 MPa	10.27 MPa
	PVC	6.54 - 19.63 MPa	7.00 MPa
Acrylique modifié	Galvanisée	28.92 - 42.74 MPa	34.46 MPa
	Aluminium	49.23 - 73.82 MPa	60.42 MPa
	Acier Inox	74.7 - 84.4 MPa	81.84 MPa
	PE	6.36 - 12.88 MPa	10.17 MPa
	PVC	2.35 - 7.06 MPa	10.27 MPa

Conclusion

Les simulations ont montré que l'acier inoxydable est le matériau le plus résistant parmi ceux testés, capable de supporter des contraintes jusqu'à un peu plus de 90 MPa. L'acier galvanisé a également démontré une résistance significative, bien que moindre que celle de l'acier inoxydable. Par ailleurs, le PE et le PVC ont montré une résistance nettement inférieure. L'aluminium a démontré une résistance modérée. Cependant, il est important de noter que les résultats de la simulation ne correspondent pas toujours aux résultats des essais pratiques. Ces résultats soulignent l'importance de réaliser des essais pratiques en complément des simulations pour obtenir une image précise de la résistance des différents matériaux.

Conclusion générale

Assemblage par adhésif est un processus clé dans de nombreuses industries, permettant l'assemblage de divers matériaux tels que les métaux, les plastiques et les composites sans attaches mécaniques ni chaleur. Il en résulte des produits plus légers, plus résistants et plus esthétiques. Le choix de l'adhésif est vital et dépend des matériaux à coller, de l'utilisation prévue du produit et des conditions environnementales auxquelles il sera confronté. Les adhésifs varient en résistance, flexibilité et résistance à la chaleur, aux produits chimiques et à l'humidité. Une liaison adhésive réussie nécessite une préparation minutieuse de la surface, une application adhésive correcte et des conditions de durcissement appropriées.

Cette étude a mis en évidence l'importance de la sélection appropriée des adhésifs en fonction du matériau spécifique à assembler. Les adhésifs époxy et acrylique modifié ont montré des performances variables sur différents matériaux, avec l'acier inoxydable présentant la plus haute résistance aux deux adhésifs. L'aluminium a montré une résistance maximale plus élevée avec l'acrylique, tandis que le PE a montré une résistance relativement constante, indépendamment du type d'adhésif utilisé.

Ces résultats fournissent des informations précieuses pour la conception de joints adhésifs dans diverses applications industrielles. Cependant, il est important de noter que les résultats des simulations ne correspondent pas toujours aux résultats des essais pratiques, soulignant ainsi l'importance de réaliser des essais pratiques en complément des simulations pour obtenir une image précise de la résistance des différents matériaux.

Références

- [1] <https://fecamp-services.com/blog/soudure-a-froid/> (
- [2] <https://www.manomano.fr/conseil/comment-faire-une-soudure-a-froid-4266>
- [3] Campbell, F.C. *Joining-Understanding the Basics*.
ISBN 978-1-61503-825-1
- [4] Lienert, T.J et Al. *Welding Fundamentals and Processes*, ASM Handbook Volume 06A.
ISBN

REFERENCES

- [12] Pizzi, A et Mittal, K.L. *Handbook of Adhesive Technology*, Revised and Expanded (second Ed.). CRC Press. (2003).
ISBN 9780429223037.
DOI : 10.1201/9780203912225.
- [13] Sersab, D. *Etude et optimisation expérimentale et numérique de la réparation des entailles sur des plaques en polyéthylène haute densité par la technique du meulage*, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, faculté de génie de la construction, département de génie mécanique (2010-2011).
- [14] Adams, R.D. *Adhesive Bonding Science, Technology, and Applications* (Second Edition).
ISBN 978-0-12-819954-1
DOI : 10.1016/C2019-0-00395-0
- [15] Ricardo, J.C.C et Al. *Adhesive Bonding Technology and Testing* (2023).
ISBN 9783527838028
DOI : 10.1002/9783527838028
- [16] Boutakhedmit, L.
de deux aciers inoxydables austéno-
duplex, Ecole Nationale Polytechnique, département de génie mécanique (octobre 2007)
- [17] Baba Hamed, F.Z. *Polycopié Théorie de la plasticité*, (2020 – 2021).
- [18] www.matweb.com