



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



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI
BEL-ABBES FACULTÉ DE
TECHNOLOGIE

THESE

Pour l'obtention du diplôme de doctorat

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Mécanique des solides et des structures

Présenté par : M^{elle} BENCHIHA Aicha

Thème

**Simulation numérique de l'effet de la présence des défauts
de collage sur le comportement des assemblages collés
sous chargement en traction**

Soutenue Devant la commission du Jury:

Encadreur :

Mr. K. MADANI

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

Président :

Mr. B. BOUCHOUICHA

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

Examineurs :

Mr. B. BOUTABOUT

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

Mr A. ZIADI

Professeur au C. U. de Ain Timouchent

Mr W. OUDAD

Maître de C au C. U. de Ain Timouchent

Mr A. MILOUDI

Maître de C à Université de Mascara

2014/2015

Remerciements

Je remercie tout d'abord le bon dieu le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin.

Je remercie mon encadreur Monsieur Dr. K. MADANI, directeur de Thèse qui m'a guidé et soutenu pour la réalisation de ce travail.

Je remercie infiniment aussi les membres de jury et enseignants pendant mes études.

Mes remerciements pour l'ensemble des membres de ma famille, Je remercie vivement et chaleureusement: Mon père que je le souhaite longue vie et bon santé, mes frère et mes sœurs, je les remercie pour tous l'aide qu'ils m'ont accordés le long de mes études.

Sans oublier de remercier aussi mes collègues de laboratoire mécanique physique des matériaux (LMPM), Je tiens à exprimer ma gratitude aux enseignants membres de ce laboratoire, qui par leur aide scientifique ont permis la réalisation de ce travail.

Je remercie infiniment aussi Mr Sahli. A pour son aides et conseils

A tout qui m'ont aidé de près ou de loin je tiens à exprimer mes sincères remerciements.

Aicha Benchiha.

الإهداء

بداية الحمد لله و الشكر و الثناء له دوما
أهدي ثمرة جهدي إلى التي كان فراقها هاجسا في
حياتي و ظل حزنها ولا يزال في قلبي
إلى روح الغالية "أمي الحبيبة"

رحمها الله

Résumé:

Notre travail est consacré à l'étude de comportement d'un assemblage collé type métal/métal en présence des défauts de collage sous chargement en traction. L'objectif de cette étude est d'analyser par la méthode d'éléments finis bidimensionnels et tridimensionnels à l'aide des codes de calcul FRANC2D/L (Fracture Analysis Code) et ABAQUS la résistances d'un joint adhésif collé à simple recouvrement en mettant en évidence plusieurs paramètres a savoir: le types du maillage, le nombres des éléments utilisés dans le maillage, les conditions aux limites, le chargement, l'épaisseur de l'adhésif, la longueur de recouvrement, le module de cisaillement et le vieillissement de l'adhésif, d'une part on analyse l'effet des défauts de collages dans les assemblage collés type métal/métal et d'autre part dans les structures réparees par collage de patch composite.

Le modèle géométrique pour le joint adhésif collé à simple recouvrement utilisé est effectué avec deux plaques minces en aluminium 2024-T3, avec l'adhésif époxyde ADEKIT structural A140 fait par la compagnie d'AXSON, l'analyse de la distribution des contraintes dans la couche d'adhésif montre de façon très détaillée que les contraintes sont situées sur les bords libres de la région de collage, et atteignent des valeurs maximales près de la zone de défaut, ces défauts sont le siège de concentration de contraintes.

Mots clés : Adhésif, joint à simple recouvrement, défaut, modélisation, vieillissement.

Abstract:

Our work is devoted to the study of behavior of a bonded assembly -type metal / metal in the presence of bonding defects under tensile loading. The objective of this study is to analyze the method of two-dimensional and three-dimensional finite element modeling is performed with computer codes FRANC2D / L (Fracture Analysis Code) and ABAQUS. The resistance of an adhesive bonded joint single lap highlighting several parameters namely : the type of the mesh, the numbers of the elements used in the mesh , boundary conditions and boundary , loading , thickness of adhesive , overlap length, the shear modulus and the aging of the adhesive , first we analyze the effect of bonding defects in the bonded assembly -type metal / metal and also in structures repair for by bonding composite patch.

The geometric model for the adhesive bonded joint single lap used is made with two thin aluminum plates 2024- T3, with the adhesive epoxy structural ADEKIT A140 made by the company AXSON , analysis of the stress distribution in the adhesive layer shows in great detail that the constraints are on the free edges of the bonding region and reach maximum defect zone near values, these defects are the stress concentration seat.

Keywords: Adhesive, single lap joint, defect, modeling, aging.

Tables des matières

Remerciements	i
Dédicaces.....	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Tables des matières	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	ix

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I: Généralités sur les assemblages collés

I-1.Introduction.....	6
I-2. Les mécanismes d'adhésion	7
I-2.1. L'adhésion mécanique.....	7
I-2.2. L'adhésion spécifique.....	8
• L'attraction électrostatique (Deryagin et Krotova).....	8
• L'adhésion chimique	8
• La théorie de l'adsorption ou du mouillage (Zisman)	9
• La théorie de la diffusion (Voyutskii)	10
I-2.3. L'adhésion massique	11
• La théorie rhéologique (Lake, Schultz et Gent)	11
• La théorie de la "couche de faible cohésion"	12
• Les principaux mécanismes d'adhésion.....	12
I-3. Les assemblages collés	13
I-3. 1. Sollicitation et rupture	14
I-3. 2. Les essais mécanique.....	16
• Traction-cisaillement.....	16
• Essai Arcan.....	17
• Torsion.....	18
I-4. Recherche sur les assemblages collés.....	18
I-4.1. Approches analytiques.....	19
I-4.2. Approches numériques.....	25
• Analyse par éléments finis.....	26
• Analyse bidimensionnelles (2D)	26
• Analyse tridimensionnelles (3D)	28
I-5. Le comportement des assemblages collés.....	30
I-5.1. La longueur de recouvrement.....	30
I-5.2. La rigidité des substrats.....	30
I-5.3. La rigidité de l'adhésif.....	31
I-5.4. Le comportement mécanique des adhésifs.....	31
I-6. Les défauts dans les assemblages collés.....	31
I-6.1. Procédés non destructifs de contrôle des assemblages collés.....	32
I-6.2. Procédés destructifs de contrôle des assemblages collés	33
I-7. Les avantages et les inconvénients du collage	34
I-7.1. Avantages de collage.....	34

I-7.2. Inconvénients de collage	35
I-8. Références	36

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

II-1. Introduction.....	38
II-2. La méthode des éléments finis.....	39
• Le maillage.....	41
• Les propriétés des matériaux.....	42
• Les conditions aux limites et de frontière.....	43
II-3. Géométries des joints	43
II-3.1. Détermination des contraintes dans un joint à simple recouvrement.....	45
• Définition d'une contrainte équivalente : Critère de Von Mises.....	45
• Définition des contraintes de tension et de cisaillement.....	46
II-4. Présentation des matériaux utilisés dans notre étude.....	48
II-4.1. Alliage d'aluminium 2024-T3.....	48
II-4.2. Adhésif Adekit A140.....	48
II-4.3. Model géométrique.....	50
II-4.4. Le maillage.....	50
II-5. Analyse et résultats.....	51
II-5. 1. Optimisation par la méthode des éléments finis tridimensionnels (3D)	51
• Influence des différents types du maillage sur la distribution de contraintes.....	51
• Influence du nombre des éléments sur la distribution des contraintes.....	54
• Influence de la charge «P » sur la distribution des contraintes.....	57
• Influence des conditions aux limites sur la distribution des contraintes.....	58
II-5. 2. Optimisation des paramètres géométrique par les méthodes EF (2D et 3D)....	62
• Le modèle géométrique et le maillage du JSR utilisé.....	62
• Influence de l'épaisseur de l'adhésif	63
• Influence de la longueur de l'adhésif.....	65
• Influence de module de cisaillement de l'adhésif.....	66
II- 6. Conclusion.....	68
II-7. Références.....	69

Chapitre III: L'influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

III-1. Introduction	71
III-2. Les méthodes des contrôles non destructif.....	72
III-2. 1. Sollicitation quasi-statique.....	73
• Contraintes mécanique statiques.....	73
• Contraintes thermiques.....	73
• Dépression.....	73
• Radiographie.....	73
III-2. 2. Sollicitation dynamique.....	74
• Vibrations.....	74
• Chocs.....	74
• Ultrasons.....	74

III-3. Modélisation par la méthode des éléments finis bidimensionnels (2D).....	75
• Influence de la présence des défauts dans l'adhésif sur la distribution des contraintes de cisaillement.....	75
III-4. Analyse et résultats.....	76
• Influence de l'épaisseur de l'adhésif	77
• Influence de la longueur de l'adhésif	78
• Influence de la longueur et l'épaisseur de l'adhésif.....	79
• Influence de module de cisaillement de l'adhésif.....	80
• Comparaison de la distribution des contraintes de cisaillement maximales de l'adhésif pour la longueur de recouvrement $L_r=25\text{mm}$ avec et sans défaut....	81
• Comparaison de la distribution des contraintes de cisaillement maximale de l'adhésif pour une épaisseur $e=0.25\text{mm}$ avec et sans défaut.	82
III-5. Modélisation par la méthode des éléments finis tridimensionnels (3D).....	83
• Le maillage du défauts.....	84
• Influence de la présence des défauts dans l'adhésif sur la distribution des contraintes de Von Mises, de cisaillement, et de pelage.....	84
• Comparaison de la distribution des contraintes de cisaillement maximale de l'adhésif avec les deux méthodes d'élément fini bidimensionnelle et tridimensionnels.....	89
III-6. Conclusions.....	91
III-7. Références	92

Chapitre IV: L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

IV-1. Introduction.....	94
IV-2. Généralités sur les types de vieillissement.....	95
IV-3. Les facteurs influençant la durée de vie des joints collés.....	95
IV-4. Vieillissement hygrothermique.....	96
IV-4. 1. Mécanismes d'hydrophilie	96
• Approche structurale.....	97
• Nature de l'eau dans la résine époxy.....	97
• Approche volumétrique.....	98
IV-4. 2. Propriétés mécaniques spécifiques.....	98
• Phénomènes visqueux.....	98
• Plasticité.....	99
• Transition vitreuse.....	100
• Critère de rupture.....	101
IV-5. L'eau et ses mécanismes de diffusion.....	101
IV-5.1. Diffusion de l'eau dans un adhésif.....	101
IV-5.2. Conséquences de l'absorption d'eau.....	103
IV-5.3. Méthodes d'étude du vieillissement.....	106
• Vieillissement en immersion de l'eau.....	106
IV-6. Modélisation numérique avec la méthodes d'élément fini tridimensionnel (3-D).....	108
IV-5.1. Le modèle géométrique.....	108
IV-7. Analyse et résultats.....	109
• 1 ^{er} Cas: Adhésif avant vieillissement et sans défauts.....	109
• 2 ^{em} Cas: Adhésif après le vieillissement et sans défauts.....	111

• 3 ^{em} Cas: Adhésif après le vieillissement et avec défaut.....	114
• Les contraintes de Von mises dans l'adhésif.....	115
• Les contraintes de cisaillement dans l'adhésif.....	116
• Les contraintes de pelage dans l'adhésif.....	117
• Comparaison de la distribution des contraintes de Von mises dans l'adhésif avec et sans défaut après le vieillissement.....	118
• Variation des contraintes maximales dans l'adhésif avec et sans défaut, de Von mises, de cisaillement, et de pelage pour différents temps d'immersion.....	119
• Visualisation des déformations plastiques équivalentes (PEEQ) dans l'adhésif avec et sans défaut, avant et après le vieillissement.....	121
IV-8. Conclusion.....	123
IV-9. Références.....	124

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

V-1. Introduction.....	126
V-2. Descriptions mécanique d'une fissure.....	127
V-2. 1. Facteur d'intensité de contrainte	128
V-2. 2. Modes élémentaires de fissuration.....	130
V-2. 3. Taux de restitution d'énergie.....	132
V-2. 4. Ecartement en fond de fissure (CTOD).....	133
V-3. Présentation de la technique de réparation.....	135
V-3. 1. Condition de réparation.....	135
V-3. 2. Différent types de réparation.....	136
• Réparation par patch simple.....	136
• Réparation par patch double.....	136
V-3. 3. Présentation du matériau de réparation.....	137
• Dimension du patch.....	137
• La rigidité du patch.....	137
V-4. Le développement du programme de calcul.....	138
V-4. 1. Formulation mathématique.....	139
V-4. 2. Modèle géométrique de la plaque.....	139
V-5. Analyse et résultats.....	141
V- 5. 1. Le facteurs d'intensité de contrainte dans l'adhésif sans défaut.....	141
• Influence de out-of-plan de flexion sur le (FIC).....	141
• Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur le (FIC).....	142
• Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure.....	
• Influence de différentes propriétés de patch.....	144
• Influence de différentes propriétés de patch sur le (FIC).....	145
• Influence de différentes propriétés de patch sur le déplacement d'ouverture de fissure	146
V- 5. 2. Effet de défaut dans l'adhésif (défaut de forme elliptique adhésif)	147
• Influence de défaut dans l'adhésif sur le facteur d'intensité de contrainte pour une épaisseur de l'adhésif $e_a = 0,20$ mm.....	148
• Influence de défaut dans l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure pour une épaisseur de l'adhésif $e_a = 0,20$ mm.....	149
• Influence de défaut dans l'adhésif sur le facteur d'intensité de contraintes pour différentes propriétés de patch.....	150

- Influence de défaut dans l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure pour différentes propriétés de patch.....151
- Comparaison entre l'adhésif avec et sans décollement de patch de Boron / époxy.....151

V- 5. 3. Comparaison de la variation du (FIC) pour différentes épaisseurs d'adhésif avec et sans défaut.....153

V- 5. 4. Comparaison de la variation du déplacement d'ouverture de fissure pour une longueur de fissure maximale pour différentes épaisseurs d'adhésif avec et sans défaut.....154

V-6. Conclusions.....155

V-7. Références.....155

Liste des figures

Figure I-1 : Exemple d'un mouillage pour l'ancrage mécanique (a) bon mouillage, (b) mauvais mouillage.....7

Figure I-2: Attraction électrostatique adhésif et substrat.....8

Figure I-3 : Mécanisme réactionnel entre un adhésif époxyde et un métal.....9

Figure I-4 : Mouillage d'un solide par une goutte de liquide.....9

Figure I-5: Définition de l'angle de mouillage.....10

Figure I-6: Interdiffusion de chaînes à l'interface entre deux polymères.....11

Figure I-7: Interaction entre les différentes couches de faible cohésion, l'adhésif et le substrat.....12

Figure I-8: Décomposition du processus de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion mis en jeu.....13

Figure I-9: Représentation schématique de différentes géométries d'assemblage.....14

Figure I-10: Mode de sollicitation d'un joint collé.....15

Figure I-11: Moment de flexion crée par le désalignement des substrats dans l'essai de T/C17

Figure I-12: Principe de l'essai Arcan et les différents points de fixation permettant de faire varier l'axe de sollicitation.....18

Figure I-13: Le joint adhésif collé (à simple recouvrement).....19

Figure I-14: Contraintes dans l'adhésif.....20

Figure I-15: Modèle de Goland et de Reissner.....21

Figure I-16: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésive de cisaillement et de pelage (a)- Volkersen; (b)-Goland et Reissner pour des adhérents d'alliage d'aluminium et un adhésif époxyde.....22

Figure I-17: Le comportement de plasticité dans l'adhésif selon Hart-Smith.....23

Figure I-18: Distribution des contraintes de cisaillement avec ou sans prise en compte de l'effet de bords libres.....25

Figure I-19: Dans le bleu le défaut initial, en rouge la propagation des fissures (a) Joint déformé ; (b) chemin de fissure du côté d'avancement.....27

Figure I-20: Maillage par l'élément fini.....28

Figure I-21: Différents modes de ruptures.....32

Figure I-22: Défauts typiques présents dans un joint de colle.....33

Figure I-23: Différents modes de sollicitations mécaniques.....34

Figure II-1: Les éléments les plus fréquemment utilisés.....39

Figure II-2: Un élément, (a)- tétraèdre de quatre nœuds, (b)- hexaèdre de huit nœuds.....41

Figure II-3: Maillage avec la méthode d'éléments finis tridimensionnelle.....42

Figure II-4 : Le joint adhésif collé à simple recouvrement.....	43
Figure II-5: Les contraintes dans un joint à simple recouvrement.....	44
Figure II-6: La distribution des contraintes de Von Misés (adaptée de Flom et Wang.....	45
Figure II-7: Présentation des contraintes de tension et cisaillement dans un JSR.....	47
Figure II-8: Courbe contrainte-déformation,-a) de l'aluminium 2024-T3, -b) de l'adhésif Adekit A140.....	49
Figure II-9: Modèle géométrique de joint adhésif collé à simple recouvrement.....	50
Figure II-10: Maillage du joint adhésif collé à simple recouvrement utilisée.....	51
Figure II-11: Distribution des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage dans l'adhésif pour les différents types du maillage.....	53
Figure II-12: Distribution des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage suivant la longueur de recouvrement en fonction du nombre des éléments du maillage.	
Figure II-13: Variation des contraintes maximales de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage dans l'adhésif.....	55
Figure II-14: Variation des contraintes maximales de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage dans l'adhésif.....	56
Figure II-15: Distribution des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement et c)- de pelage dans l'adhésif.....	57
Figure II-16: Les configurations du joints avec les différentes conditions aux limites étudié60	
Figure II-17: Distribution des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage dans l'adhésif.....	61
Figure II-18: Le modèle géométrique et le maillage de joint à simple recouvrement.....	63
Figure II-19: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différentes épaisseurs a)- avec (2D), et b)- avec (3D), suivant la longueur de recouvrement.....	64
Figure II-20: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différentes longueurs de recouvrement a)- avec (2D), et b)- avec (3D).....	66
Figure II-21: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différentes module de cisaillement (G), a)- avec (2D), et b)- avec (3D), pour une longueur de l'adhésive $L_r=25\text{mm}$	67
Figure III-1: Type de défauts / dommages cohésifs ou adhésifs.....	71
Figure III-2: Les modes de défaillance (cohésif et adhésif).....	72
Figure III-3: Balayage aux ultrasons d'un joint à recouvrement collé en aluminium.....	74
Figure III-4: Le modèle géométrique et le maillage de joint à simple recouvrement.....	75
Figure III-5: Les différents modèles géométriques de l'élément adhésif avec les dimensions des défauts.....	76
Figure III-6: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différentes épaisseurs suivant longueurs de recouvrement.....	77
Figure III-7: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différentes longueurs de recouvrement.....	78
Figure III-8: Distribution des contraintes de cisaillement maximale de l'adhésif pour différentes longueurs de recouvrement et différentes épaisseurs d'adhésif.....	79
Figure III-9: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différentes module de cisaillement (G).....	80
Figure III-10: Distribution des contraintes de cisaillement maximales de l'adhésif pour différentes épaisseurs de l'adhésif avec et sans défaut.....	81
Figure III-11: Distribution des contraintes de cisaillement maximales de l'adhésif pour différentes longueurs de recouvrement avec et sans défaut.....	82
Figure III-12: Les différents modèles géométriques de l'élément adhésif avec les dimensions des défauts.....	83

Figure III-13: Maillage de trois types des défauts dans l'adhésif.....	84
Figure III-14: Distribution des contraintes de, Von mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour les modèles (A)et (B).....	85
Figure III-15: Distribution des contraintes de, Von mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour les modèles (C)et (D).....	86
Figure III-16: Distribution des contraintes de, Von mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour les modèles (E)et (F).....	87
Figure III-17: Comparaison entre la modélisation numérique en (2D) et (3D), b)- adhésif avec quatre défauts, c)- adhésif avec défaut centrale.....	90
Figure IV-1: Mobilisation d'une molécule d'eau par deux groupements polaires.....	97
Figure IV-2: Liaisons possibles de molécules d'eau avec un réseau époxy.....	98
Figure IV-3: Notion de viscoélasticité (en pointillés la réponse élastique à la sollicitation)..	99
Figure IV-4: Variation du module d'Young et du volume spécifique.....	100
Figure IV-5: Courbe de diffusion de type Fick.....	103
Figure IV-6: Schéma récapitulatif des différents modes de pénétration de l'eau dans un assemblage collé [2].....	104
Figure IV-7: Courbes caractéristiques contrainte-déformation de l'adhésif courbe moyen..	107
Figure IV-8 : Variation des modules d'Young en fonction de taux d'absorption d'eau.....	108
Figure IV-9: Modèle géométrique de joint adhésif collé à simple recouvrement.....	109
Figure IV-10: Distribution des contraintes dans l'adhésif sans vieillissement.....	109
Figure IV-11: Variation des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage dans l'adhésif.....	110
Figure IV-12: Distribution des contraintes dans l'adhésif, pour différents temps d'immersion suivant la longueur de recouvrement.....	112
Figure IV-13 : Distribution des contraintes pour une semaine et neuf semaines d'immersion..	112
Figure IV-14: Les modèles géométriques des adhésifs utilisés avec les dimensions des défauts.....	114
Figure IV-15: Distribution des contraintes de Von mises dans l'adhésif, pour différents temps d'immersion suivant la longueur de recouvrement.....	115
Figure IV-16: Distribution des contraintes de cisaillement dans l'adhésif, pour différents temps d'immersion suivant la longueur de recouvrement.....	116
Figure IV-17: Distribution des contraintes de pelage dans l'adhésif, pour différents temps d'immersion suivant la longueur de recouvrement.....	117
Figure IV-18: Distribution des contraintes dans l'adhésif sans vieillissement suivant le long de la ligne centrale de la couche d'adhésif.....	119
Figure IV-19: Distribution des contraintes maximales dans l'adhésif, pour différents temps d'immersion.....	120
Figure IV-20: Déformations plastiques équivalentes (PEEQ) dans l'adhésif avec avant et après le vieillissement.....	122
Figure V-1: Fissure semi-elliptique dans une plaque et au voisinage d'une entaille.....	127
Figure V-2: La répartition des contraintes au voisinage du fond de fissure.....	128
Figure V-3: Les trois modes fondamentaux d'ouverture de fissure.....	131
Figure V-4: Ouverture de la fissure.....	134
Figure V-5: Modèle géométrique de la plaque.....	140
Figure V-6: Variation du facteur d'intensité de contrainte (FIC) en fonction de la longueur de fissure, pour l'épaisseur de l'adhésif = 0,1 mm.....	142

Figure V-7: Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur FIC.....	143
Figure V-8: Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure.....	144
Figure V-9: Influence des propriétés de patch sur le (FIC).....	146
Figure V-10: Influence des propriétés du patch sur le déplacement d'ouverture de fissure..	147
Figure V-11: La forme elliptique de défaut dans l'adhésif.....	147
Figure V-12: Influence de défaut dans l'adhésif sur le (FIC).....	148
Figure V-13: Influence de défaut dans l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure..	149
Figure V-14: Influence de la présence de défaut dans l'adhésif sur le (FIC).....	150
Figure V-15: Influence de défaut dans l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure pour différentes propriétés de patch.....	151
Figure V-16: Comparaison entre l'adhésif avec et sans défaut pour le patch Boron / époxy.....	152
Figure V-17: La variation du facteur d'intensité de contrainte (FIC) pour différentes épaisseurs d'adhésif avec et sans défaut.....	153
Figure V-18: La variation du déplacement d'ouverture de fissure pour différentes épaisseurs d'adhésif avec et sans défaut.....	154

Liste des tableaux

Tableau I-1: Energies des différents types de liaisons intermoléculaires.....	13
Tableau II-1: Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 2024-T3.....	48
Tableau II-2: Propriétés mécaniques de l'adhésif Adekit A140.....	49
Tableau II-3: Valeurs maximales des contraintes de, Von mises, de cisaillement et de pelage dans l'adhésif pour différents types du maillage.....	52
Tableau II-4: Les valeurs maximales des contraintes de, Von mises, cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour différentes charges.....	58
Tableau II-5: Les valeurs maximales des contraintes de, Von mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour chaque modèle.....	62
Tableau II-6 : Les différents Propriété mécanique utilisés dans les calculs.....	67
Tableau III-2: Les valeurs maximales des contraintes de, Von mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif avec et sans défaut.....	88
Tableau III-1: Dimensions détaillées des défauts.....	76
Tableau IV-1: Différentes actions de l'eau sur un polymère.....	105
Tableau IV-2 : Les différents propriété mécanique utilisés dans les calculs.....	107
Tableau IV-3: Les valeurs maximales des contraintes de, Von mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour différent temps d'immersion.....	111
Tableau V-1: Dimensions de la plaque entaillée et fissurée, la couche d'adhésif et le patch.....	140
Tableau V-2: Propriétés de la plaque d'aluminium, la couche d'adhésif et le patch	140
Tableau V-3: Propriétés du différentes patch utilisées dans l'analyse.....	145



INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

Introduction

Depuis longtemps, l'homme réalise des assemblages par collage pour créer des objets utilitaires ou décoratifs. Au cours de l'histoire, l'adhésif a subi diverses transformations jusqu'à la conception aujourd'hui de résines synthétiques, qui sont largement employées dans de nombreux procès de fabrication. Ces résines offrent, entre autres, la possibilité de rassembler des matériaux qui jusqu'alors ne pouvaient pas être collés. A partir du milieu du vingtième siècle, les avancées dans le domaine des sciences des matériaux et la constante nécessité de disposer de structures plus performantes, plus légères, plus résistantes et plus fiables, ont motivé le développement de nouvelles méthodes d'assemblage structural. L'assemblage par collage semble être une technique prometteuse avec des avantages comme la réduction du poids, la possibilité de unir différents matériaux, une bonne résistance à la fatigue, l'atténuation du choc et la facilité pour rassembler les formes les plus complexes.

Les collages sont de plus en plus employés dans l'industrie, aussi bien pour les liaisons entre pièces métalliques qu'entre pièces composites. Les assemblages collés sont parfois plus intéressants que les méthodes classiques car les concentrations de contraintes dues aux trous et les éléments de liaison. Les tensions sur les extrémités sont aussi réduites car la colle remplit tout l'espace entre les deux éléments rassemblés, ce qui favorise la répartition des efforts. Grâce à de nombreux avantages, le collage remplace souvent les procédés traditionnels d'assemblages tels que le boulonnage, le rivetage, le vissage, l'agrafage ou bien même le soudage. Une brève énumération des avantages de l'assemblage par collage met en évidence une répartition plus régulière des contraintes (distribuée par totalité les concentrations de contrainte et sont moins susceptibles de se produire que dans des techniques conventionnelles d'attache), la possibilité d'assembler des matériaux de nature différente grâce aux progrès constants de l'industrie chimique, un amortissement des vibrations dans la structure grâce aux propriétés de l'adhésif, un allègement des structures, une amélioration de l'esthétique, un prix de revient souvent inférieur aux techniques d'assemblages classiques.

L'utilisation d'adhésifs présente pourtant quelques inconvénients comme la faible résistance à la température et l'absorption de l'eau. Les composants collés peuvent aussi présenter des défauts qui réduisent la qualité de l'assemblage comme les porosités et les

INTRODUCTION GENERALE

espaces vides. Une bonne qualité d'adhésion est garantie par les essais avec lesquels on est capable de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'assemblage ou bien de détecter les défauts à l'intérieur de la couche de colle. Il existe deux types d'essais: les premiers provoquent la rupture de l'éprouvette, les deuxièmes sont des contrôles non destructifs. Les essais destructifs les plus fréquemment utilisés consistent à mesurer la force nécessaire pour faire propager une fissure dans l'interface collée. Selon le mode de sollicitation, on peut envisager divers types d'essais destructifs. Les plus utilisés sont les essais DBC (Double Cantilever Beam), ENF (End Notched Flexure) et MMF (Mixte Mode Flexure). Parmi les tests non destructifs, les principaux mis en œuvre en vue de détecter des défauts de collage sont les méthodes ultrasonores, l'interférométrie holographique et la thermographie infrarouge.

Pour mieux comprendre le comportement des assemblages collés telles que la longévité, la résistance à la fatigue, et la résistance au vieillissement, il existe beaucoup de modèles a été développée par des méthodes numériques pour analyser et expliquer le comportement des joints adhésifs collés, parmi les méthodes numériques, la méthode des éléments finis bidimensionnels et tridimensionnels a été fortement développée aux court de ces dernières années grâce à l'amélioration des performances des moyens informatiques et des codes de calcul (ABAQUS , ANSYS, FRANC2D ...etc) , elles permettent de modéliser des géométries complexes et la prise en compte d'un nombre important de phénomène physique offrant des perspectives intéressantes par rapport aux modèles analytiques.

L'objectif de notre travail est d'analyser la résistance des assemblages collés en présence des défauts dans la couche d'adhésif, plusieurs paramètres sont pris en considération tels que le chargement, l'épaisseur de l'adhésif, la longueur de recouvrement, le module de cisaillement la forme, la position et le nombre de défauts ainsi que l'effet du vieillissement de l'adhésif.

Ce manuscrit est structuré en cinq chapitres:

- **Chapitre I :**

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique. Il nous a paru utile de présenter un état de connaissances actuelles sur la technologie du collage, en rappelant la nature d'adhésion et les techniques de mise en œuvre qui sont couramment utilisées. Dans ce

INTRODUCTION GENERALE

chapitre, nous proposons de réaliser une étude bibliographique axée sur les points suivants: Dans la première partie, nous rappellerons les différentes théories qui sont généralement invoquées pour expliquer les mécanismes d'adhésion. La seconde partie sera consacrée à une description générale des études sur les joints adhésifs collés dans les premiers travaux dans le domaine du comportement des joints adhésifs collés, avec les deux approches analytique et numérique. Enfin, la dernière partie fera l'état de l'art sur le comportement mécanique des assemblages collés. Une attention particulière sera portée aux différents défauts dans un joint de colle que nous utiliserons dans la suite de cette étude.

- **Chapitre II :**

Dans ce chapitre, nous présentons une modélisation numérique qui utilise la méthode des éléments finis bidimensionnels et tridimensionnels, Cette modélisation est effectuée avec les codes de calcul ABAQUS et FRANC2D/L, sur des joint adhésif collé à simple recouvrement. Dans ce chapitre II, on a essayer d'optimiser les paramètres géométriques de l'adhésif qui lui permettent d'acquérir une résistance accrue en amoindrissant les valeurs des contraintes notamment de pelage et de cisaillement. Ces paramètres géométriques sont réalisées par la variation de différentes types du maillage, le nombres des éléments utilisés, les conditions aux limites et de frontière, le chargement, l'épaisseur de l'adhésif, la longueur de recouvrement et le module de cisaillement de l'adhésif. Enfin, nous comparerons les résultats qui se trouver avec les deux méthodes numérique, bidimensionnels et tridimensionnel dans le but de telle modélisation est d'aider à mieux comprendre précisément le comportement mécanique des joints adhésifs collés.

- **Chapitre III :**

Est consacrée à l'étude de l'évolution de la distribution des contraintes de cisaillement, de pelage, et de Von Mises, dans la couche d'adhésif selon la longueur du recouvrement pour le joint adhésif collé à simple recouvrement de deux plaques d'alliages d'aluminium 2024-T3, avec une approche numérique qui utilise la méthode des éléments finis bidimensionnels et tridimensionnels avec les codes de calcul ABAQUS et FRANC2D/L, sous l'effet de divers paramètres, dans les deux catégories. Les paramètres géométriques qui incluent l'épaisseur de l'adhésif, la longueur du recouvrement, et les paramètres matériels tels que le module de cisaillement de l'adhésif aux présences des défauts dans l'adhésif.

INTRODUCTION GENERALE

- **Chapitre IV:**

Ce chapitre sera consacré à l'étude des propriétés de l'adhésif époxyde bi-composant type ADEKIT A140 sous l'effet de l'absorption d'eau. Dans la première partie, nous détaillerons les particularités des différents types de vieillissement, les mécanismes d'hydrophile qui gouvernent l'insertion de déplacement, l'absorption et la diffusion des molécules d'eau au sein du matériau. Puis dans une seconde partie, nous étudierons avec des résultats des essais expérimentaux l'influence de vieillissement de l'adhésif sur certaines propriétés mécaniques avec la méthode d'élément finis tridimensionnelles l'évolution des propriétés mécanique de l'adhésif (le module d'Young E , et le module de cisaillement G), sur le comportement des assemblages collés, avec et sans défauts dans le but d'analyser l'effet de l'absorption d'eau sur la distributions des contraintes de cisaillement, de pelage, et de Mises dans l'adhésif.

- **Chapitre V :**

La détermination du facteur d'intensité de contrainte à la pointe de la fissure est l'une des méthodes les plus utilisées pour prédire la durée de vie en fatigue des structures d'aéronefs. Cette prédiction est plus compliquée pour les fissures réparées avec les patches composites. Dans ce chapitre, nous présentons une étude qui utilisée un programme mathématique développé par Ratwani pour calculer le facteur d'intensité de contrainte (FIC) et le déplacement d'ouverture de fissure (COD) pour les fissures réparées avec des patches composites simples et double. Le but ce chapitre est analysé les effets de différentes propriétés de patch et l'épaisseur de l'adhésif avec et sans défauts dans l'adhésif, sur le facteur d'intensité de contraintes dans une plaque d'aluminium avec une entaille circulaire centrale, et on suppose l'existence d'une fissure émanant d'entaille réparé avec des patches simples et doubles.

Chapitre I



Généralités sur les assemblages
collés

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

I-1. Introduction

L'apparition et le développement des adhésifs structuraux permettent au collage, très ancienne technique d'assemblage, de trouver sa place dans les industries de pointe grâce aux efforts réalisés dans l'aéronautique. De nos jours, la technique d'assemblage par collage est encore appelée à un large développement dans de nombreux domaines de l'industrie (automobile, constructions navales, aéronautique, bâtiment.) vu les progrès constants réalisés en sciences des matériaux, en particulier dans l'industrie des matériaux composites [1].

Et, en effet, cette technique d'assemblage présente de nombreux avantages, comme l'aptitude à assembler des matériaux de nature très différente, la meilleure répartition des contraintes, le gain de poids, la diminution des points de corrosion. Pour autant, le collage reste une technique d'assemblage complexe. La préparation des surfaces doit être minutieuse, les réactions de réticulation des adhésifs sont parfois longues, la résistance mécanique de tels assemblages est limitée par les propriétés de l'adhésif lui-même, et, admettons le, la durée de vie des ces assemblages n'est jamais connue avec précision. Grâce à ces avantages, le collage remplace souvent les procédés traditionnels d'assemblages tels que le boulonnage, le rivetage, le vissage, l'agrafage ou bien même le soudage.

D'un point de vue industriel donc, si le collage est intéressant en termes de coûts et d'allègement des structures, il est encore difficile d'évaluer avec précision la fiabilité, dans le temps et en service, des joints collés. L'incertitude est amplifiée si les assemblages sont soumis à des environnements agressifs (forte humidité, température élevée, produits corrosifs,...). Ce constat provoque toujours, par conséquent, une certaine réticence dans les bureaux d'études vis-à-vis de cette technique d'assemblage [2].

Dans ce chapitre, nous proposons de réaliser une étude bibliographique axée sur les points suivants: dans la première partie, nous rappellerons les différentes théories qui sont généralement invoquées pour expliquer le phénomène d'adhésion. La seconde partie fera l'état état des connaissances actuelles sur la modélisation du comportement mécanique des assemblages collés et faire une recherche sur l'analyse des joints adhésifs collés dans les premiers travaux, analytiquement et numériquement. Enfin, la dernière partie sera consacrée à une description générale sur le comportement des assemblages collés (les défauts dans les assemblages collés) ainsi les avantages et inconvénients du collage.

I-2. Les mécanismes d'adhésion

On retrouve une difficulté au niveau des considérations théoriques, puisqu'il n'existe pas de théorie unifiée de l'adhésion mais de nombreux modèles dans lesquels l'approche du problème est différente. Ainsi, si les chimistes, par exemple, justifient l'adhésion par la création de liaisons covalentes fortes, les physiciens considèrent, quant à eux, les dissipations d'énergie. Quelques auteurs ont essayé de regrouper ces modèles selon différentes approches, par exemple, la revue de Shanahan qui a proposé une classification en considérant l'adhésion mécanique, spécifique et massique :

I-2.1. L'adhésion mécanique

Cette théorie, également appelée théorie de "*l'ancrage mécanique*", Il y a phénomène d'adhérence car l'adhésif va se loger dans les pores, les aspérités du substrat. Cette théorie fait donc intervenir la rugosité du substrat et la notion du mouillage (aptitude qu'à un liquide à occuper la plus grande surface possible quand nous l'étendons sur une surface solide). La rugosité paraît donc être un facteur favorable quand l'adhésif mouille bien (augmentation de la surface de contact et meilleur ancrage mécanique) dans une certaine limite. Plus précisément, le mouillage qui n'est pas réalisé dans les creux peut constituer des amorces de rupture de l'assemblage ; de plus, il y a concentration de contraintes au sommet des aspérités. Il semble qu'une surface obtenue par grenailage ou sablage (rayon de courbure faible des aspérités) soit préférable.

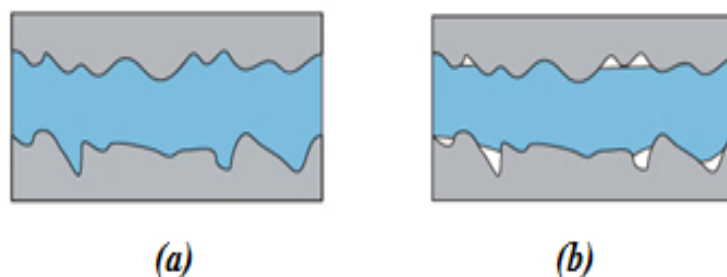


Figure I-1 : Exemple d'un mouillage pour l'ancrage mécanique (a) bon mouillage, (b) mauvais mouillage.

I-2.2. L'adhésion spécifique

- *L'attraction électrostatique (Deryagin et Krotova)*

Ce modèle, proposé en 1948, assimile l'assemblage collé à un condensateur plan et suppose des dissipations de charges électriques entre les deux matériaux. Si ce modèle semble peu crédible aujourd'hui, il a le mérite d'introduire la notion de forces à longue distance, de nature dipolaire, susceptibles d'induire l'adhésion. Elle suppose qu'adhésif et substrat forment les plaques d'un condensateur. L'énergie d'adhésion est alors équivalente au travail nécessaire pour séparer les plaques d'un condensateur plan. Cependant la provenance des charges électriques n'est pas indiquée, et il semblerait qu'elles soient plutôt une conséquence de l'adhésion et non la cause [3].

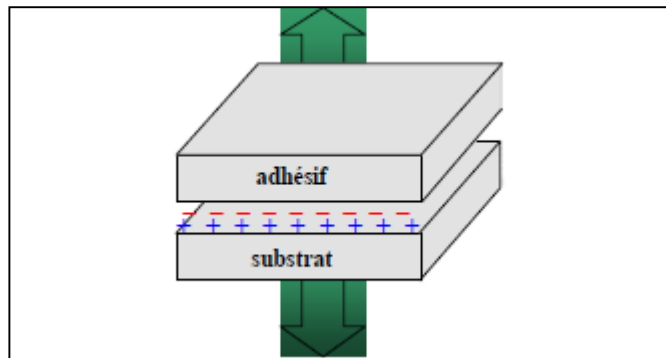


Figure I-2: Attraction électrostatique adhésif et substrat [2].

- *L'adhésion chimique*

Cette théorie explique l'adhésion par la création de liaisons covalentes entre le substrat et l'adhésif. S'il est évident que cette contribution est majoritaire pour certains systèmes, lors de l'utilisation d'un primaire d'adhésion par exemple, cette théorie ne suffit pas à elle seule pour expliquer l'adhésion en général. L'adhésion s'explique ici par la formation de liaisons chimiques entre adhésif et substrat. C'est le cas pour certaines résines époxydes et certains métaux, ou entre le laiton et le caoutchouc.

En présence d'eau, les molécules H_2O se greffent aux oxydes pour former des groupes hydroxyles. Il y a donc en surface une molécule contenant un atome d'hydrogène et un atome oxygène électronégatif. La surface se présente comme fortement polarisée et va pouvoir interagir avec les groupes polaires de la résine époxyde (Figure I-3).

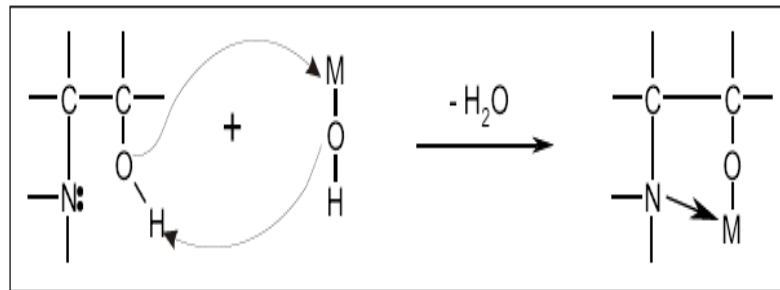


Figure I-3 : Mécanisme réactionnel entre un adhésif époxyde et un métal.

- **La théorie de l'adsorption ou du mouillage (Zisman)**

Pour qu'il y ait adhésion, la mouillabilité de l'adhésif sur le substrat doit être aussi bonne que possible. Dans ce cas, des interactions à courte distance pourront alors se développer (liaison de Van der Waals par exemple) : il y aura adhérence. Elle fait intervenir les notions suivantes. L'énergie superficielle d'un liquide ou tension superficielle caractérise l'aptitude de la surface d'un liquide à prendre la plus petite surface possible ; elle caractérise également la cohésion du liquide puisqu'il faut vaincre les forces de cohésion internes de celui-ci pour accroître cette surface. L'énergie de surface d'un solide représente la quantité de travail qu'il a fallu dépenser pour créer cette surface, ce qui revient au travail correspondant à la rupture des liaisons atomiques, à pression et température constantes. Soit alors une goutte de liquide sur une surface solide (Figure I-4).

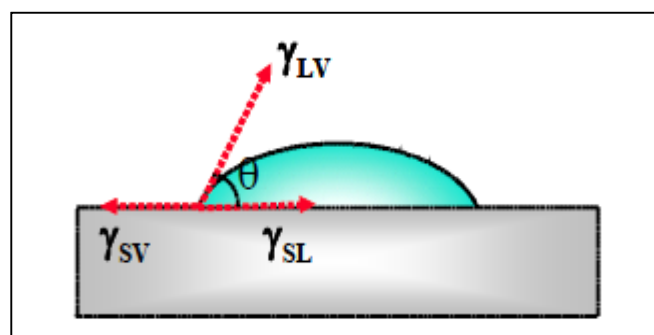


Figure I-4 : Mouillage d'un solide par une goutte de liquide.

L'équilibre des forces au point A donne l'équation suivante (équation de Young) :

$$\gamma_S - \gamma_{SL} = \gamma_L \cos \theta \tag{I-1}$$

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

Où γ_S est l'énergie de surface du solide, γ_L est l'énergie superficielle du liquide et γ_{SL} est l'énergie interfaciale liquide-solide. Le liquide est alors parfaitement étalé quand θ est nul, ce qui correspond à une valeur critique γ_c de l'énergie superficielle du solide :

- si $\gamma_L < \gamma_c$ alors $\theta=0$: **Le mouillage est bon** ;
- si $\gamma_L > \gamma_c$ alors $\theta > 0$: **Le mouillage est mauvais**.

Les énergies superficielles des principales colles donnent des valeurs comprises entre 25 et 50mN/m ; les métaux ont tous des valeurs d'énergie superficielle critique supérieures.

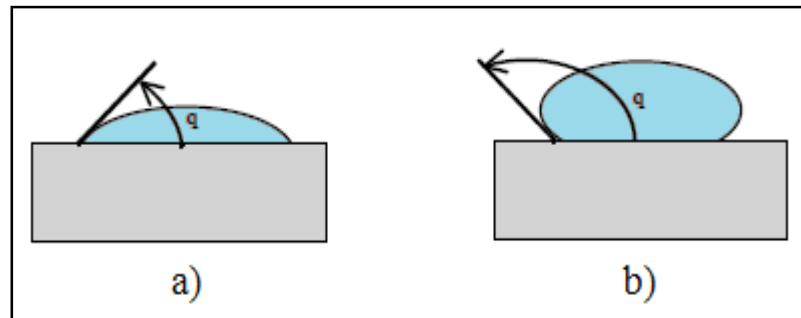


Figure I-5: Définition de l'angle de mouillage.

- Bon mouillage (a): L'étalement est caractérisé par un petit angle de contact entre la goutte et la surface.
- Mauvais mouillage (b): L'étalement est caractérisé par un grand angle de contact entre la goutte et la surface.
- **La théorie de la diffusion (Voyutskii)**

Selon cette théorie, limitée essentiellement aux matériaux macromoléculaires, l'adhésion serait due à la diffusion de segments moléculaires de part et d'autre de l'interface. L'enchevêtrement des chaînes, qui peut aller jusqu'à la disparition de l'interface, assure la cohésion des deux solides. Cette théorie se limite évidemment au collage de polymères chimiquement compatibles.

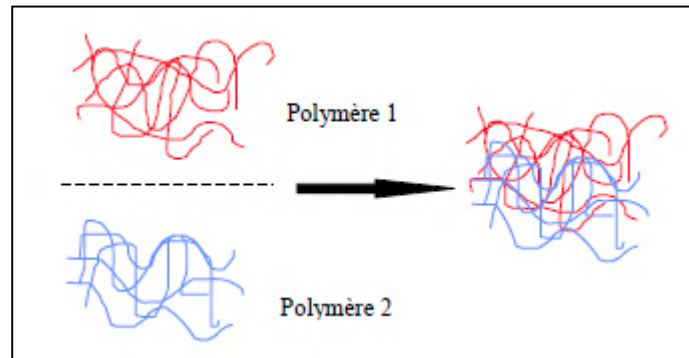


Figure I-6: Interdiffusion de chaînes à l'interface entre deux polymères.

I-2.3. L'adhésion massique

- *La théorie rhéologique (Lake, Schultz et Gent)*

Cette théorie prend en compte les phénomènes de dissipation d'énergie au cours des tests mécaniques, tel le pelage, et essaie de les quantifier afin de pouvoir revenir à l'énergie d'adhésion.

L'énergie nécessaire W_{adh} pour séparer réversiblement 1cm^2 d'interface solide/liquide s'écrit :

$$W_{adh} = (1 + \cos \theta) \gamma_L \quad (\text{I-2})$$

Cette énergie ne dépend que des propriétés de surface des substrats, Il y a adhérence si :

$$W_{adh} \geq (1 + \cos \theta) \gamma_L \quad (\text{I-3})$$

L'énergie de rupture W_{rupt} d'un assemblage est reliée à l'énergie d'adhésion réversible par :

$$W_{rupt} = W_{adh} f(V, T, \dots) \quad (\text{I-4})$$

Où :

f est une fonction des propriétés de l'adhésif qui dépend de la vitesse V de séparation, de la température T , ... Elle décrit l'énergie dissipée irréversiblement dans le processus de séparation. Ce modèle élargit et complète le modèle thermodynamique précédent.

- **La théorie de la "couche de faible cohésion"**

Cette théorie, appelée "Théorie des couche faible", a été initialement proposée en 1961 par Bikermann. Cette théorie n'explique pas l'adhésion mais émet des hypothèses pour expliquer la rupture de joints collés. Lors de la séparation de surface collée, la rupture ne se propage pas strictement à l'interface mais suit un chemin près de l'interface, où une des deux surfaces est localement mécaniquement faible. Ces faiblesses correspondent à la présence de bulles d'air piégées, d'impuretés à l'interface ou de réactions entre les composants et le milieu: ce sont les couches interfaciales de faible cohésion [3].

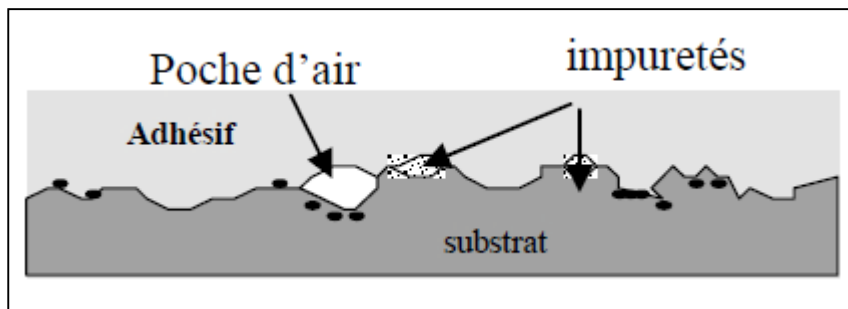


Figure I-7: Interaction entre les différentes couches de faible cohésion, l'adhésif et le substrat.

- **Les principaux mécanismes d'adhésion**

Chacune des théories présentées rend compte de phénomènes particuliers, mais ne permet pas à elle seule de décrire la globalité des mécanismes de l'adhésion.

On peut cependant considérer que le processus de collage se déroule en plusieurs grandes étapes qui font intervenir ces différents mécanismes de l'adhésion (Figure I-8):

- Mise en contact des substrats avec la colle
- Création de liaisons plus ou moins fortes et de portées variables, qui vont maintenir la cohésion de l'assemblage. Les énergies des différents types de liaisons sont rapportées dans le tableau (I-1).

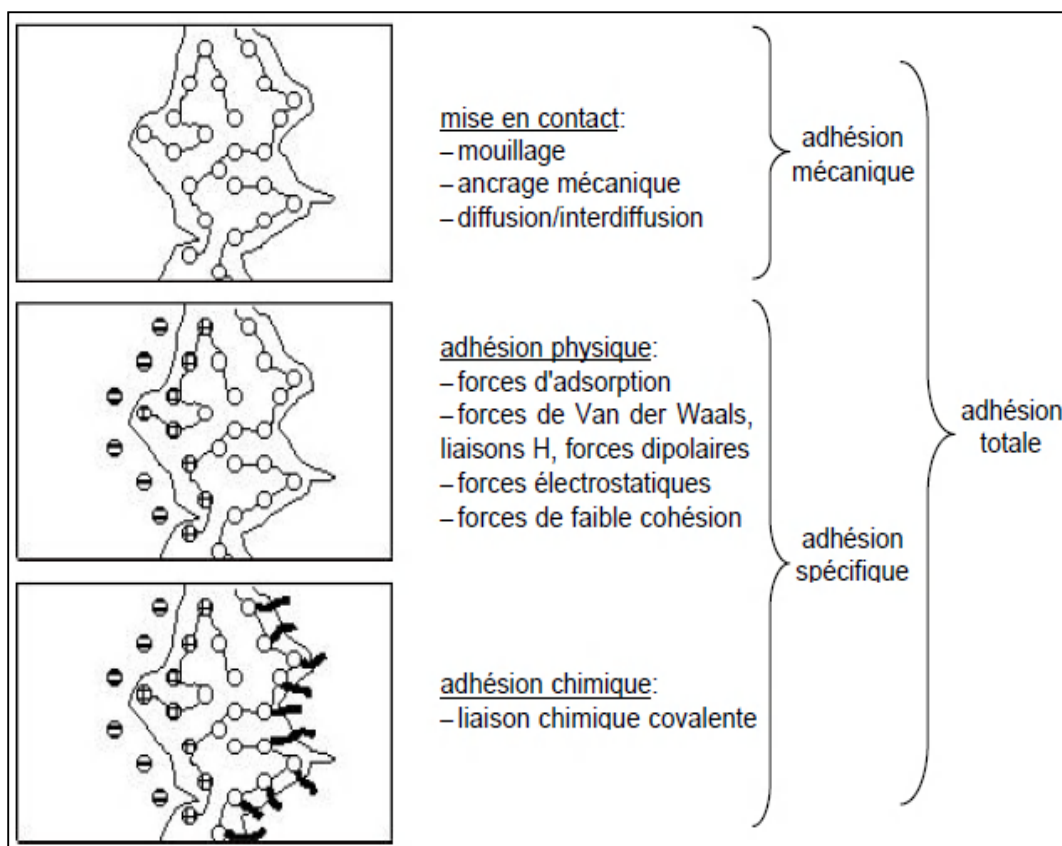


Figure I-8: Décomposition du processus de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion mis en jeu.

Type de liaison		Energie (kcal/mol)
Liaisons chimiques	ionique	100-250
	covalente	15-170
	métallique	27-83
Liaisons intermoléculaires	liaison hydrogène ou acide/base	<12
	dispersion (London)	<10
	dipôle-dipôle (Keesom)	<5
	dipôle-dipôle induit (Debye)	<0,5

Tableau I-1: Energies des différents types de liaisons intermoléculaires.

I-3. Les assemblages collés

Les assemblages collés ont une très grande efficacité. Ils permettent de distribuer les efforts transférés sur une plus grande surface. Les joints collés peuvent être entre deux stratifiés composés ou entre une structure composée en stratifié et en métal. Pour les applications aéronautiques qui nous intéressent, ces assemblages collés sont tels que le joint de colle travaille en cisaillement dans son plan. La géométrie de base est le recouvrement simple ou double. Pour atténuer les contraintes de pelage, deux géométries peuvent être

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

utilisées plus particulièrement : la jonction en escalier et la jonction biseautée. Nous notons que ces jonctions peuvent être simples ou double. Les jonctions longitudinales de fuselage, auxquelles le travail présenté doit pouvoir s'appliquer, sont des jonctions à simple recouvrement. Par conséquent, dans ce qui suit nous nous intéresserons plus particulièrement à ce type d'assemblage (Figure I.9).

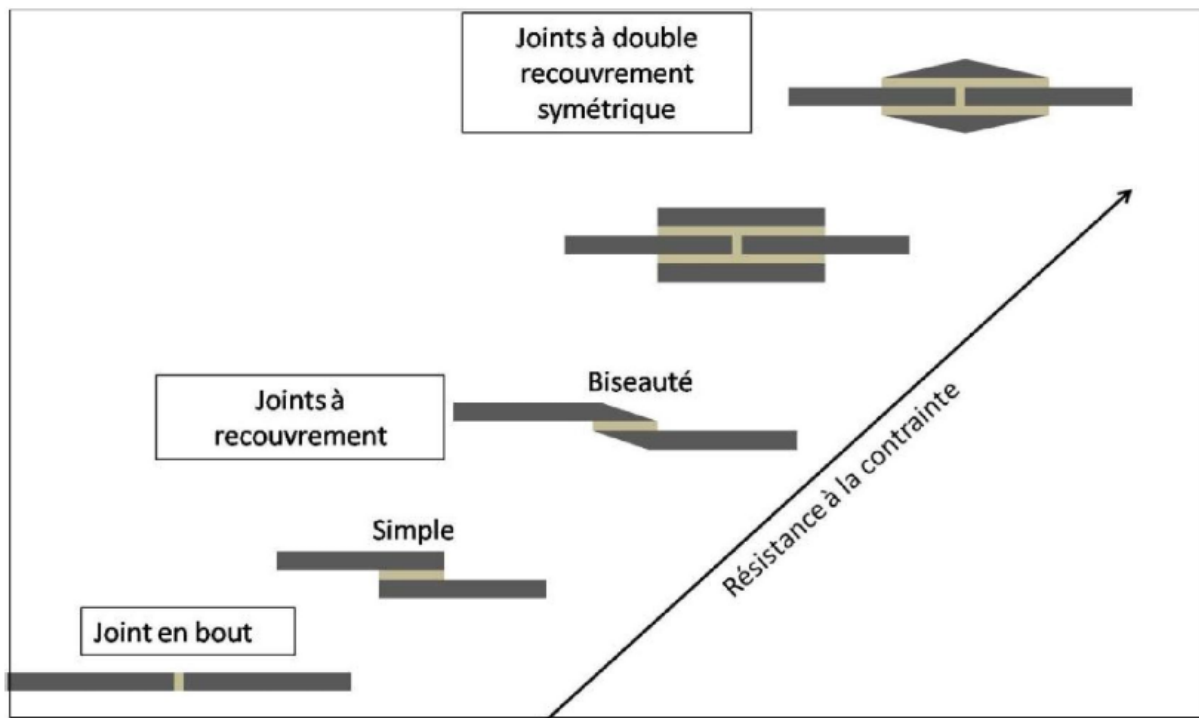


Figure I-9: Représentation schématique de différentes géométries d'assemblage.

Le joint à simple recouvrement avec les caractéristiques de la simplicité et efficacité a été appliqué largement dans beaucoup d'applications et devient un spécimen standard d'essai pour déterminer les propriétés mécaniques des adhésifs [4].

I-3. 1. Sollicitation et rupture

Un assemblage collé dans une structure industrielle peut être sollicité mécaniquement de nombreuses manières (Figure I.10). Ces sollicitations peuvent être classées en fonction de l'état de contraintes qu'elles génèrent dans la couche de colle. Le cisaillement qui consiste à appliquer à un substrat un effort axial de traction, permet d'obtenir une répartition des contraintes de cisaillement assez homogènes. La traction, obtenue en tirant un substrat perpendiculairement au plan de collage, génère principalement des contraintes de traction

mais également un peu de cisaillement à cause de l'effet Poisson sur la colle. Pour obtenir du clivage, on considère que les substrats sont très rigides par rapport à la colle et ne se déforment pas. On tire alors sur l'extrémité d'un substrat tout en bloquant l'autre. On obtient un moment de flexion générant un état de contrainte assez complexe dans l'adhésif. Le pelage quant à lui se rapproche fortement du clivage à l'exception près qu'un des substrats peut se déformer. Sur une structure industrielle, ces sollicitations n'apparaissent jamais seules et on rencontre plutôt une superposition de ces efforts ce qui rend l'étude très complexe. Il est reconnu que les efforts de traction provoquent des ruptures prématurées des assemblages, notamment par ouverture des microcavités existantes dans la couche de colle ou à l'interface (bulle d'air dans l'adhésif, mauvais collage,...).

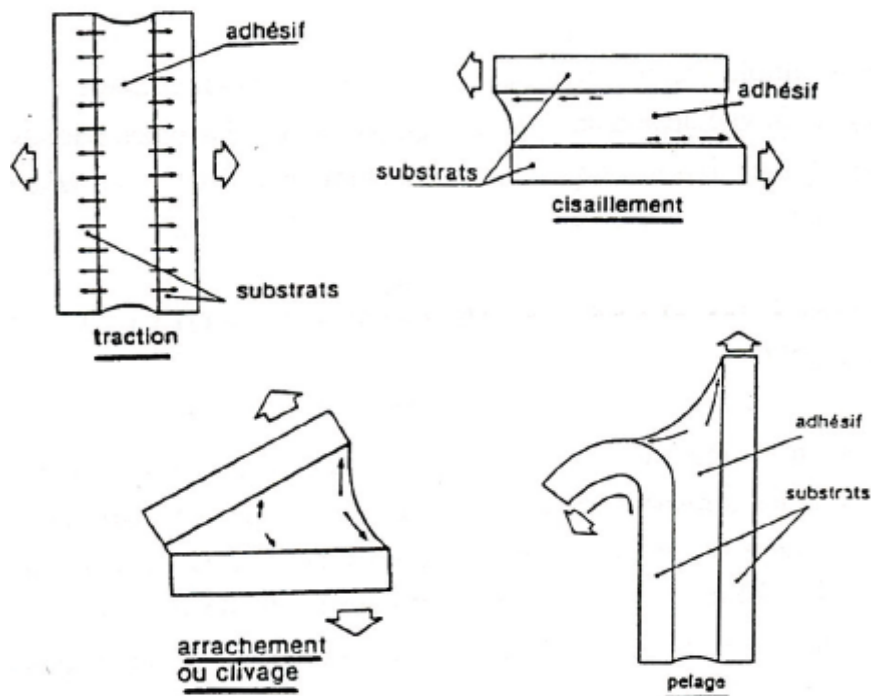


Figure I-10: Mode de sollicitation d'un joint collé.

La rupture dans un assemblage collé est également très complexe du fait de la nature hétérogène de l'assemblage collé métal/adhésif/métal. La rupture peut s'effectuer dans la colle ou dans un des substrats, on parle alors de rupture cohésive. Mais on peut également casser à l'interface entre la colle et un des substrats, soit par décollement soit par rupture de l'interphase qui est la zone de transition entre l'adhésif et le substrats et qui possède ses propriétés propres, on parlera alors de rupture interfaciale ou adhésive. Dans certains cas, la rupture peut s'amorcer dans la colle et se propager à l'interface ou dans le substrat, on parle de mode mixte de rupture [5].

I-3. 2. Les essais mécaniques

Il existe de très nombreux essais mécaniques permettant de tester les assemblages collés. La finalité d'un essai est très variable. Solliciter un assemblage peut permettre la mise en évidence des mécanismes de déformations ou de rupture d'assemblages plus ou moins représentatifs d'une structure complexe. Un essai mécanique peut également être destiné à obtenir des données intrinsèques à l'adhésif, aux substrats ou à l'interface. Le critère de choix d'un essai donné dépend en grande partie de la géométrie de l'assemblage testé et des paramètres que l'on souhaite déterminer. Malheureusement la nature complexe d'un assemblage collé rend le dépouillement de telles expériences particulièrement difficile. Une étude numérique complémentaire est souvent menée en parallèle pour aider l'interprétation des résultats expérimentaux. On décide de présenter plus en détail trois essais qui sont régulièrement réalisés par les industriels et les laboratoires pour caractériser leurs assemblages collés : traction/cisaillement, Arcan, torsion. Il en existe, bien évidemment, beaucoup d'autres mais il serait trop fastidieux de les détailler tous.

- **Traction-cisaillement**

L'essai de traction-cisaillement (T/C) ou de cisaillement-plan est un « grand classique » (Figure I-11). Il est régulièrement employé dans le domaine automobile sur les joints simple recouvrement (SLJ) comme essai de validation d'un couple adhésif/substrat. Il est en effet représentatif des conditions géométriques d'assemblage de tôles dans une voiture et il est simple de mise en œuvre. Toute la difficulté dans l'interprétation des résultats de cet essai vient du fait que les substrats ne sont pas alignés et qu'en appliquant une sollicitation de traction, on génère un moment de flexion et donc la rotation d'une partie de l'assemblage. Si les substrats sont souples ou minces, un phénomène de pelage apparaît générant des contraintes supplémentaires (Figure I-11). Le champ de contraintes ainsi obtenu dans la couche de colle est tridimensionnel, il est donc impossible de donner une valeur de la contrainte à rupture uniquement à partir de la force enregistrée. Cet essai ne permet pas d'obtenir les propriétés de l'adhésif in situ par exemple, sauf en utilisant des substrats très épais.

Généralement les essais de T/C sont menés à titre comparatif (variation de la force à rupture pour divers traitements de surface, changement du mode (faciès) de rupture avant/après vieillissement) ce qui nécessite une étude numérique complémentaire pour les dépouillements.

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

Dans le paragraphe suivant, les modèles analytiques et numériques permettant de modéliser ce type d'essais seront présentés.

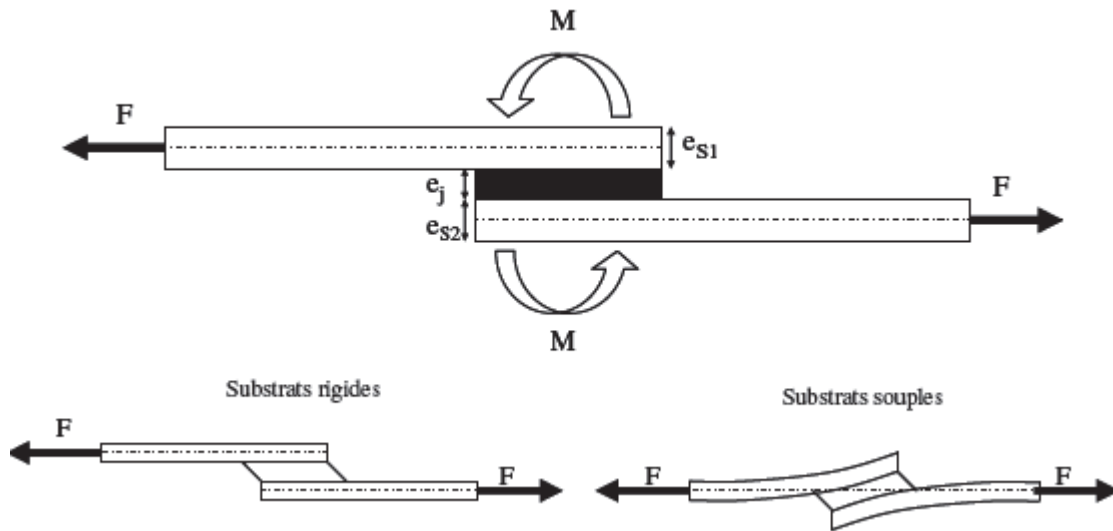


Figure I-11: Moment de flexion créée par le désalignement des substrats dans l'essai de T/C.

- **Essai Arcan**

L'essai ARCAN a été développé et amélioré pour palier le défaut de l'essai de T/C où on ne peut pas découpler l'effet du cisaillement de l'effet de traction à cause du pelage qui apparaît. Cet essai permet de contrôler l'angle de sollicitation par rapport au plan du recouvrement (Figure I-12). On peut ainsi imposer un cisaillement pur, une traction pure ou une combinaison connue des deux effets, combinaison qui ne varie pas avec l'effort contrairement au T/C. Cet essai parfois couplé à une étude numérique permet d'obtenir les caractéristiques de l'adhésif in-situ et de les comparer aux propriétés de l'adhésif massif. Cependant les exigences nécessaires à la mise en place d'un tel essai sont relativement sévères. Le système de fixation étant composé de plusieurs pièces, le positionnement et l'alignement de ces dernières doit être précis afin d'obtenir des résultats exploitables. De surcroît, il est nécessaire de préparer des éprouvettes très spécifiques avec un « bec » en extrémité de recouvrement qui permet de diminuer les sur contraintes à cet endroit.

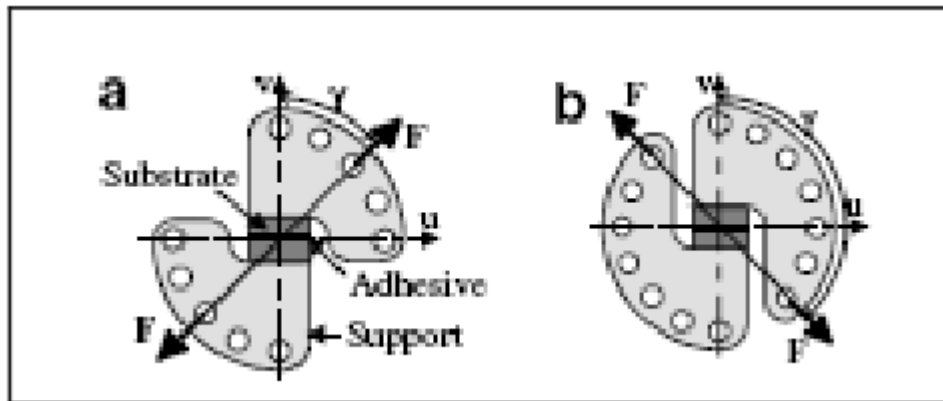


Figure I-12: Principe de l'essai Arcan et les différents points de fixation permettant de faire varier l'axe de sollicitation

- **Torsion**

L'essai de torsion est un peu moins courant car peu représentatif des liaisons collées couramment rencontrées dans l'industrie. Pourtant s'il est bien mis en œuvre, il permet d'obtenir un champ de contraintes de cisaillement assez homogène dans la couche d'adhésif. Les résultats sont bien plus faciles à interpréter que ceux d'un essai de traction/cisaillement et on peut donner une valeur de la contrainte à rupture in situ sans passer par une étude numérique fastidieuse. Cet essai de torsion est utilisé en général pour caractériser l'adhésif dans des assemblages de cylindres collés bout à bout ou emmanchés au quels on applique un moment de torsion ou des collages cylindre/plan (ou Napkin-ring) [6] qui sont sollicités en torsion au travers d'un bras de levier.

I-4. Recherche sur les assemblages collés:

Un joint adhésif collé est une structure composée de deux adhérents jointifs par un adhésif. **Adams et Wake** définissent l'adhésif en tant que « un matériau polymère qui, une fois appliqué aux surfaces, peut les joindre ensemble et résister à la séparation » et adhérents comme membres d'une structure qui sont joints ensemble par un adhésif.

Beaucoup de modèles pour les joints adhésif collés ont été développés les géométries des joints à simple recouvrement (Figure I-13). Cette configuration a été adoptée par la société américaine des matériaux d'essai comme essai mécanique standard pour la détermination de la résistance au cisaillement [7].

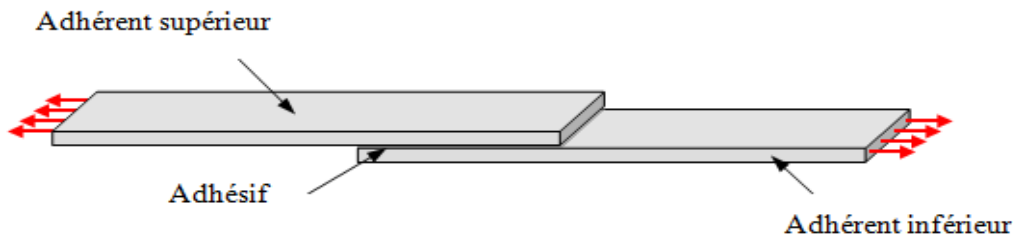


Figure I-13: Le joint adhésif collé (à simple recouvrement).

Il y a deux approches de base pour analyser les joints adhésifs collés : analytique et numérique. Dans la première approche, un ensemble d'équations et d'états de frontière est formulé. Les solutions de ces équations sont des expressions analytiques qui donnent des valeurs des contraintes à un point quelconque du joint. En la deuxième approche, des solutions des équations sont obtenues par la méthode numérique est représenté par un modèle discret au départ. Dans ce dernier, un système des équations algébriques est dérivé, généralement des fonctions d'énergie.

I-4.1. Approches analytiques

Les méthodes analytiques de détermination des contraintes se justifient pour plusieurs raisons. Elles peuvent tout d'abord s'imposer par manque d'outils de calcul. Utilisées dans des cas simples, elles permettent aussi de valider des modèles de détermination des contraintes sophistiqués. En homogénéisant les caractéristiques des substrats de joint collés de matériaux composites, ces méthodes donnent également la possibilité d'estimer, avec plus ou moins de précision, le niveau de contrainte auquel est soumis l'adhésif. Ce cas d'application, fréquent pour des études de pré-dimensionnement, est loin d'être négligeable. La caractéristique commune aux nombreux modèles analytiques est la simplicité de leurs hypothèses. Il en découle, comme nous allons le voir, une description plus ou moins précise et réaliste de l'état de contrainte recherché. La majorité des études analytiques classiques choisissent une approche bidimensionnelle de l'état de contraintes, pour des raisons évidentes de simplicité. Cette approche peut présenter des limitations, notamment dans le cas des substrats composites. Une autre hypothèse fréquente suppose qu'il n'y a pas de variation des contraintes dans l'épaisseur ni dans la largeur de la couche d'adhésif. Cette hypothèse est fondée sur la très faible épaisseur de cette couche devant celle des substrats. La seule variation des contraintes considérée est suivant l'axe longitudinal (axe de chargement).

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

L'état de contrainte supposé dans l'adhésif se résume donc le plus souvent aux composantes suivantes (Figure I-14) :

- La contrainte de cisaillement, σ_{xy}
- La contrainte normale, dite de pelage, σ_{yy}
- Et parfois la contrainte longitudinale, σ_{xx}

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

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

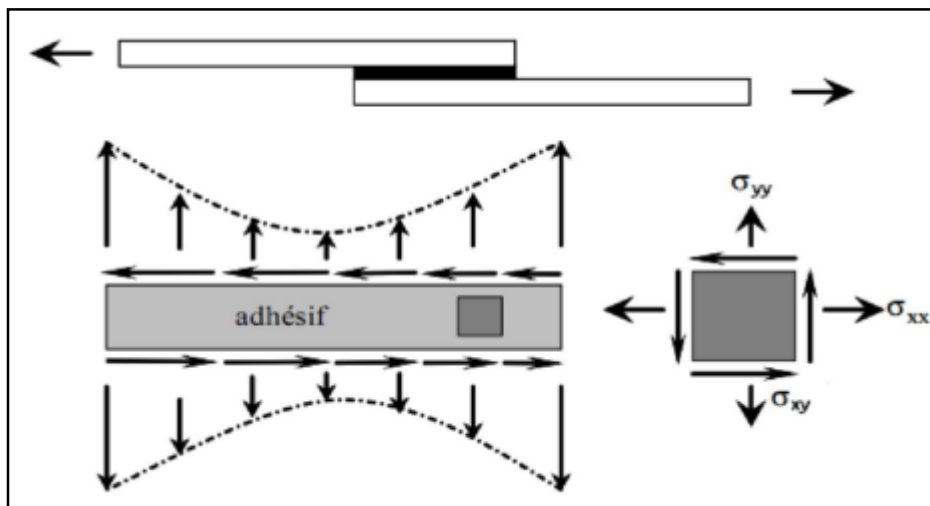


Figure I-14: Contraintes dans l'adhésif.

Les premiers calculs ont été effectués par **Volkersen**, a proposé la première approche en 1938 de l'état de contrainte dans un joint collé à simple recouvrement. Volkersen considère que l'adhésif et les substrats sont parfaitement élastiques et isotropes. Il néglige les contraintes de cisaillement dues à la flexion des substrats, supposés alors travailler en contraintes planes, et s'intéresse à la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche de colle [3]. Volkersen exprime ainsi la distribution des contraintes de cisaillement dans l'adhésif :

$$\tau(x) = \tau_m \frac{\omega l}{2} \left(\frac{\cosh \omega X}{\sinh \omega l/2} + \frac{|E_1 e_1 - E_2 e_2|}{E_1 e_1 + E_2 e_2} \frac{\sinh \omega x}{\cosh \omega l/2} \right) \quad (I-5)$$

Dans laquelle on a :

$$\omega = \sqrt{\frac{G_c}{e_c} \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2} \right)} = \sqrt{\frac{E_c}{2e_c(1+\nu)} \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2} \right)} \quad (I-6)$$

Dans laquelle E_1, e_1 et E_2, e_2 correspondent respectivement au module d'Young et à l'épaisseur de chaque substrat, G_c et e_c au module de Coulomb et à l'épaisseur de l'adhésif et l à la longueur du recouvrement.

Goland et Reissner proposent que le chemin excentrique de charge d'un joint adhésif collé à simple recouvrement cause un moment de flexion (M), et une force transversale (V) être appliqué au joint en plus de la charge de tension appliquée par largeur d'unité (P), suivant les indications de la figure (I-15). En raison de ce moment de flexion, le joint tournera, changeant la direction de la ligne de charge avec la tendance des forces de tension appliquées d'hériter la ligne. Car le joint tourne, le moment de flexion diminuera, provoquant un problème géométrique non linéaire où les effets des grands débattements des adhérents doivent être expliqués. Les premiers pour considérer ces effets étaient Goland et Reissner. Ils ont employé un facteur de moment de flexion (k) et un facteur de force transversal (k') qui rapportent la charge de tension appliquée par largeur d'unité (P) au moment de flexion (M) et à la force transversale (V) aux extrémités de recouvrement.

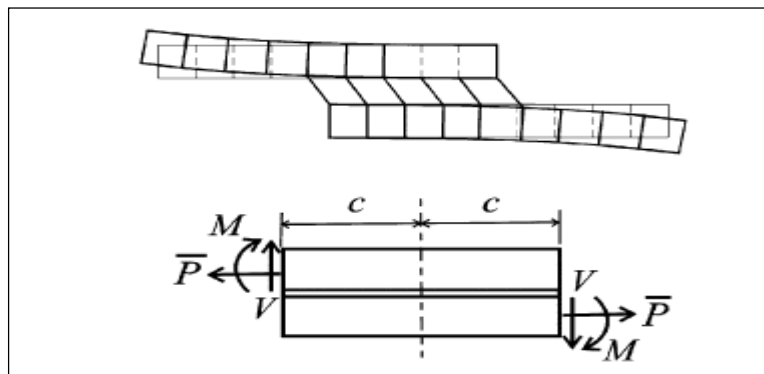


Figure I-15: Modèle de Goland et de Reissner.

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

Il n'y a aucun doute que les premiers travaux effectués principalement par Volkersen et Goland et Reissner étaient un grand pas en avant dans l'analyse des contraintes des joints adhésifs collés. Néanmoins, leur travail a eu plusieurs limitations.

- Ils n'expliquent pas des variations des contraintes adhésifs par la direction d'épaisseur, particulièrement l'interface soumet à une contrainte ce qui sont importants quand l'échec se produit près de l'interface.
- Les contraintes de cisaillement maximal se produit aux fins du recouvrement, qui viole l'état libre du contrainte, suivant les indications de la figure I-16.
- En conclusion, les adhérents ont été considérés en tant que faisceaux minces, ignorant le cisaillement traversant d'épaisseur et les déformations normales. Le cisaillement d'adhérents est particulièrement important dans les adhérents mous de cisaillement tels que les composites [8].

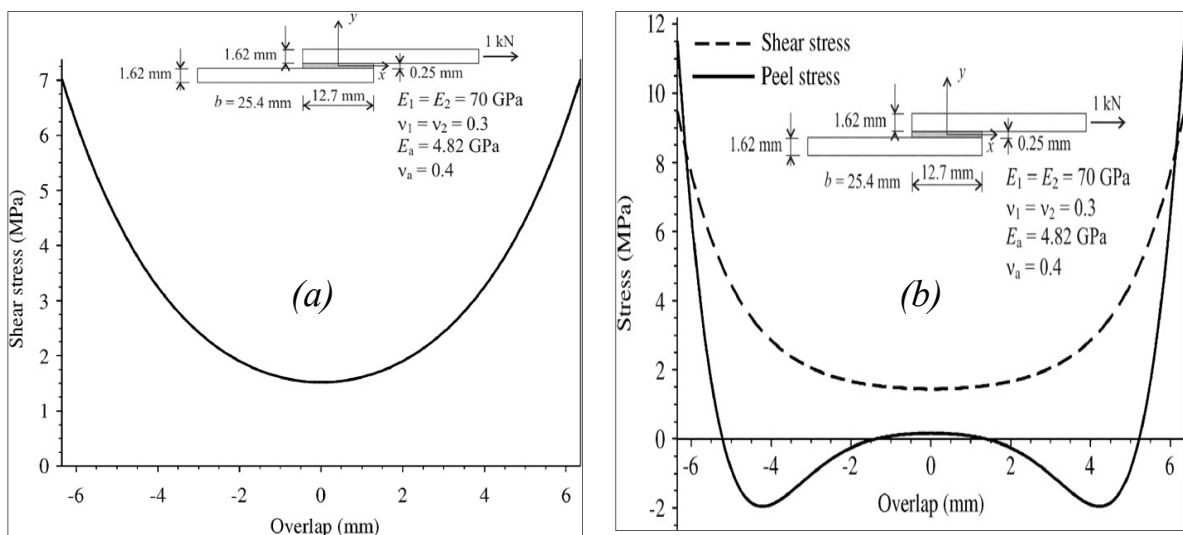


Figure I-16: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésive de cisaillement et de pelage (a)- Volkersen; (b)-Goland et Reissner pour des adhérents d'alliage d'aluminium et un adhésif époxyde.

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

$$T_{\max} = \left(\frac{1 + 3k_{GR}}{4} \eta_V L \coth(\eta L) + \frac{3(1 - k)}{4} \right) T_{\text{moy}} \quad (\text{I-7})$$

Et :

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

Dans le cas de substrats indéformables ($k_{GR} = 1$), la contrainte de cisaillement maximale est deux fois plus importante que la valeur prévue par Volkersen ; d'où l'importance de tenir compte de la rotation du joint.

Hart-Smith a édité une série de documents concernant des joints à simple recouvrement, double recouvrement, en escalier et biseautés, et faire un modèle de mécanique des continus dans lequel les adhérents étaient élastique isotrope ou anisotrope, et l'adhésif a été modélisé comme l'élastique, l'élastique-plastique, ou bi-élastique. Fondamentalement, la théorie classique de plaque a été adoptée pendant la dérivation de Hart-Smith. Cependant, les effets de la déformation transversale de cisaillement, qui s'est avérée importante quand le module transversal de cisaillement est petit. De plus, Hart-Smith s'intéresse au comportement non linéaire de l'adhésif : il a développé une approche élastique-plastique parfait (Figure I-17) [3].

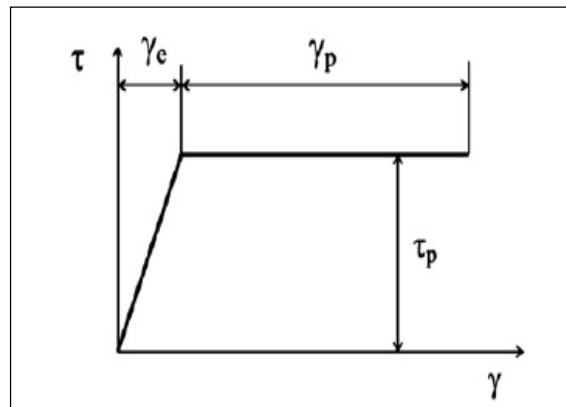


Figure I-17: Le comportement de plasticité dans l'adhésif selon Hart-Smith.

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

$$T(x) = A_a \cosh\left(2\lambda'\left(x - \frac{L}{2}\right)\right) + C_a \quad (\text{I-9})$$

Où :

$$C_a = \frac{f}{bL} - \frac{A_a}{\lambda'L} \sinh(L\lambda') \quad \lambda' = \frac{\eta_{HS}}{2} \sqrt{1 + 3\left(1 + \frac{e}{e_1}\right)} \quad (\text{I-10})$$

$$A_a = \frac{\lambda'}{b \sinh(\lambda'L)} \frac{1 + 3\left(1 + \frac{e}{e_1}\right) k_{HS}}{1 + 3\left(1 + \frac{e}{e_1}\right) f} \quad (\text{I-11})$$

Oplinger a fourni une analyse alternative de Harf-Smith que la modification pour le joint à simple recouvrement en considérant de grands débattements des adhérents et les effets des contraintes de cisaillement adhésifs et en ignorant les effets de la déformation d'épaisseur. De cette manière, on permet à des débattements adhésifs de découpler les deux moitiés du joint dans l'analyse de recourbement de débattement et l'analyse des contraintes d'adhésif. Là existent une bonne corrélation dans le facteur k de moment de bord entre les prévisions d'Oplinger et ceux de Goland et de Reissner [9]. La distribution de la contrainte de cisaillement s'exprime ainsi :

$$T(x) = \frac{\mu_1}{2e_1} \Delta_{h1} \frac{\cosh\left(\mu_1 \frac{x-L}{e_1}\right)}{\sinh\left(\mu_1 \frac{\lambda}{2}\right)} + \frac{\mu_2}{2e_1} \Delta_{h2} \frac{\cosh\left(\mu_2 \frac{x-L}{e_1}\right)}{\sinh\left(\mu_2 \frac{\lambda}{2}\right)} \quad (\text{I-12})$$

Où :

$$\Delta_{hj} = \frac{2\beta^2 \mu_j^2}{\mu_j^2 - 2\beta^2} \frac{E_1}{1-\nu^2} \frac{e_1}{2} k_{2j} \quad (\text{I-13})$$

$$k_{21} = \frac{1 + R^2 C_2 - k_0}{1 + R^2 C_1} \quad k_{22} = R^2 C_1 \frac{1 + R^2 C_2 - k_0}{1 + R^2 C_1} - R^2 C_2 \quad (I-14)$$

Pour la contrainte de pelage, Oplinger obtient quasiment la même équation que Goland et Reissner, de sorte que seule la modification du facteur de moment fléchissant est nécessaire. Il conclue que l'analyse de Goland et Reissner reste valable pour des substrats épais, ce qui n'est pas vrai pour des substrats plus minces, car plus sensibles à la flexion.

Delale et Erdogan incluent un modèle Zener à la loi de comportement de l'adhésif pour simuler l'effet de la viscoélasticité tandis que les substrats restent élastiques. Ils montrent que les contraintes de pelage ont tendance à se relaxer plus lentement que les contraintes de cisaillement ce qui les rend particulièrement néfastes pour la tenue de la structure en fatigue par exemple [10].

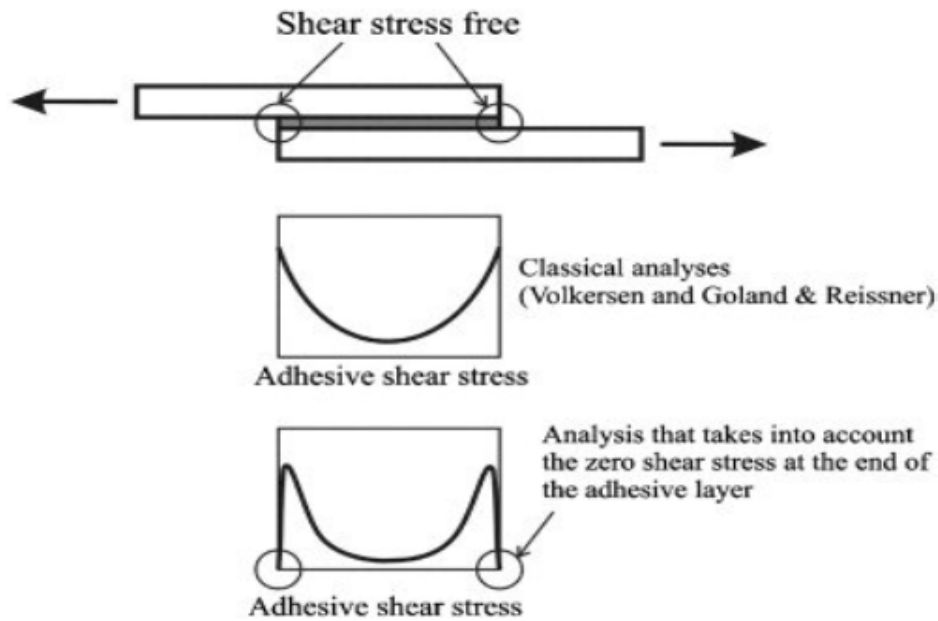


Figure I-18: Distribution des contraintes de cisaillement avec ou sans prise en compte de l'effet de bords libres.

I-4.2. Approches numériques

Une grande variété de modèles a été développée pour analyser les joints adhésifs collés. Certaines de ces techniques rapportent les méthodes numériques, qui fournissent un outil général pour analyser les géométries et des conditions de charge arbitraires. Parmi les

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

méthodes numériques, l'analyse par éléments finis a été intensivement employée avec le succès ; cependant, ce genre d'analyse exige de la génération d'un grand ensemble de données afin d'obtenir des résultats raisonnablement précis.

- **Analyse par éléments finis**

L'analyse par éléments finis a été employée dans beaucoup de domaines scientifiques et de technologie comprenant le flux de fluide, la conduction de chaleur, et l'analyse structurale. Cette revue est confinée à l'utilisation de la méthode d'élément fini pour les joints adhésif collés. Les premiers calculs par éléments finis (EF) ont été réalisés en 2D avec des éléments très simples (triangulaire ou rectangulaire et linéaire) et pour des comportements purement élastiques. Avec l'amélioration des méthodes EF, les modèles deviennent plus complexes : 3D, augmentation des degrés de liberté, couplages mécanique – thermique, intégration des critères de rupture...

- **Analyse bidimensionnelles (2D)**

Un grand nombre d'analyses par éléments finis bidimensionnelles des joints adhésif collés ont été exécutées. Tandis que ces analyses produisent des résultats précis pour quelques situations et exigent moins d'effort de modélisation que des analyses tridimensionnelles, elles peuvent encore exiger une quantité considérable de temps de machine et de génération des données. L'analyse par éléments finis bidimensionnelle des joints adhésifs collés peut être effectuée des éléments de contrainte plane conventionnelle ou des contraintes planes. Quand cette approche est suivie, des mailles très fines sont exigées, en particulier dans la couche adhésive, afin d'obtenir une exactitude raisonnable [7]. Une des premières analyses par éléments finis de joint à simple recouvrement a été éditée par plusieurs auteurs.

Bigwood et Crocombe ont présenté une analyse élastique complète du joint adhésif qui calcule le cisaillement d'adhésif et les contraintes de traction dans la région de recouvrement. Et cette analyse a été validée pour une gamme des cas de charge utilise un programme d'élément fini. Dans leurs analyses, le joint adhésif est modelé comme sandwich à adhésif-adhérent avec n'importe quelle combinaison du chargement de tension, de cisaillement et de moment appliqué aux extrémités des deux adhérents [12].

Wooly et Carver Ils ont employé la méthode d'élément fini élastique linéaire pour l'analyse de joint à simple recouvrement. Ils ont employé les triangles constants de contrainte

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

idéalisant les joints en tant que cas de contrainte plane. Ils ont conclu que la concentration de contrainte s'est produite sur les extrémités de recouvrement [13].

Penado afin d'augmenter l'efficacité informatique, Penado a présenté une approche basée sur la technique substrat-structure. Dans cette approche, la réponse générale du joint collé à simple recouvrement est obtenue analytiquement à partir de la solution des états d'équilibre de force-moment. Les valeurs analytiquement évaluées de force-moment aux extrémités de recouvrement sont alors employées comme état de frontière normale pour une analyse par éléments finis bidimensionnelle fortement détaillée du joint de recouvrement dans la prétention que les extrémités de recouvrement sont simplement soutenues [14].

Silva et Adams Une conclusion semblable a été obtenue par Silva et Adams dans le cas des joints à simple recouvrement. On le sait que la résistance au cisaillement de recouvrement diminue à mesure que l'épaisseur adhésive augmente, mais la gamme des épaisseurs adhésives étudiées dépasse rarement 1 millimètre. Les résultats présentés montrent ce qui se produit jusqu'à une épaisseur très épais (3 millimètre), avec et sans filet d'épanchement. La raison de la diminution de la force commune comme augmentations de l'épaisseur d'adhésifs est encore controversée [15].

Sheppard, Anderson, al et Ban ont proposé la théorie de zone de dommages, qui peut prévoir les charges d'échec de joint à simple recouvrement utilisé un critère d'échec approprié de référence. a prévu les charges d'échec des joints adhésifs en employant la théorie de mécanique de rupture et les défauts dans l'adhésif dû à de petits vides, a suggéré le rapport de zone de dommages pour prévoir des forces communes d'échec d'adhésifs [16].

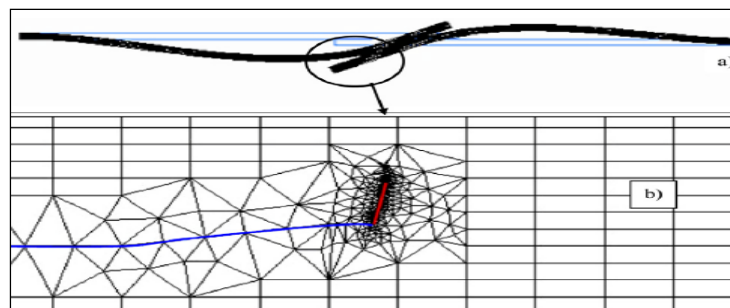


Figure I-19: Dans le bleu le défaut initial, en rouge la propagation des fissures (a) Joint déformé ; (b) chemin de fissure du côté d'avancement.

- *Analyse tridimensionnelles (3D)*

Des contraintes dans les joints adhésifs sont parfois obtenus avec l'exactitude raisonnable d'une ou les analyses bidimensionnelles. Cependant, il y a beaucoup de cas où une analyse bidimensionnelle ne s'applique pas ou ne produit pas l'exactitude acceptable. Même pour le joint à simple recouvrement, une analyse tridimensionnelle peut être exigée si la détermination précise des variations des contraintes à travers la largeur est désirée. Dans les cas où une analyse tridimensionnelle est exigée, les modèles d'élément fini sont le meilleur outil disponible. L'avantage principal en employant cette méthode est qu'aucune prétention spéciale n'est nécessaire. L'inconvénient principal est l'augmentation de la préparation de données et du temps de machine. des études tridimensionnelles notamment sont entreprises.

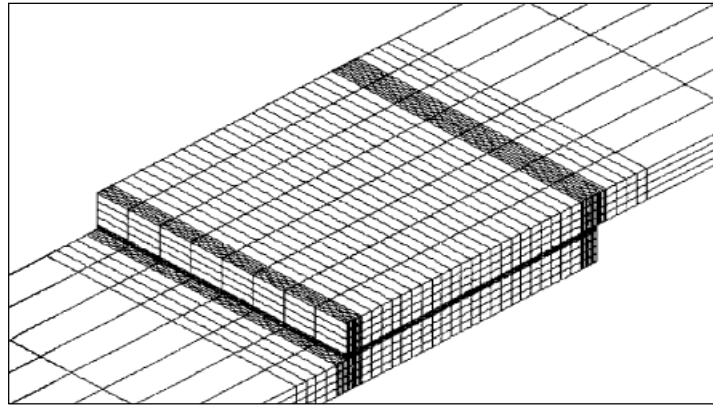


Figure I-20: Maillage par l'élément fini [11].

Adams, Peppiatt, Adams et Harris ont employé des critères pour prévoir la force commune avec le succès. Cependant, en raison de la singularité des contraintes aux coins de réentrée des joints, les contraintes dépendent de la grosseur de maillage utilisée et comment près des points de singulier les contraintes sont absorbées. Des valeurs des contraintes calculées aux points de gauss près de la singularité ou de l'extrapolation des valeurs de point de gauss à la singularité ont été en fait employées. Par conséquent, le soin doit être pris en employant ce critère. Bien que le critère soit sensible à la grosseur de maille utilisée, l'aperçu physique du procédé d'échec est clair, et c'est des contraintes principales maximum qui sont le plus responsable de l'échec des joints métalliques avec les adhésifs fragiles puisque les fissures lancent et propagent la normale à ces contraintes principales maximum [16].

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

Andruet et al a développé un modèle pour l'analyse tridimensionnelle des joints adhésifs basés sur la coquille et les éléments pleins. Les éléments de coquille sont employés pour modéliser les adhérents et la couche adhésive est modélisée comme élément plein avec des nœuds d'excentrage dans les adhérents. La formulation d'élément inclut des non-linéarités géométriques, et des effets de courant ascendant et d'humidité. En plus de considérer la nature tridimensionnelle des joints adhésifs, le calcul des contraintes précis aux interfaces d'adhérent-adhésif est concerné primaire. L'échec des joints adhésifs se produit habituellement dans l'adhésif (échec cohésif) ou aux interfaces d'adhérent-adhésif (échec adhésif). D'ailleurs, l'échec cohésif se produit habituellement près de l'interface d'adhérent-adhésif. Cependant, les éléments finis conventionnels basés sur des déplacements ne satisfont pas la continuité du vecteur de contrainte aux interfaces [12].

Ding, Kumosa, Ding et al a appliqué cette méthode pour déterminer le champ de contrainte singulier près de l'intersection d'une interface bi-matériel avec les bords libres dans les joints adhésifs. Bien qu'efficace pour une interface bi-matériel avec ou sans des fissures, cette approche souffre du nombre d'itérations exigées pour la convergence et de l'incapacité d'imposer la continuité des composants de traction à travers l'interface. En outre, le taux de convergence et l'exactitude des résultats dépendent des propriétés matérielles et de la graduation des déplacements pendant les itérations. La force du champ de contrainte singulier devient imprécise aux distances très étroitement à la jonction des matériaux différents ; un endroit commun de déclenchement d'échec. Cette inexactitude peut être attribuée à la limitation des éléments finis utilisés dans cette analyse [19].

Taylor a développé un modèle tridimensionnel simplifié d'un joint adhésif collé. Les adhérents ont été représentés par des éléments de plaques de neuf-nœud et l'adhésif a été modélisé par les éléments spéciaux de brique avec dix-huit nœuds excentrés. Analogie au modèle bidimensionnel, à l'adhésif et aux adhérents partager les nœuds, réduisant le nombre de degrés de liberté du joint. Les déplacements des adhérents et l'adhésif étaient compatibles aux interfaces, ainsi aucun trou ne s'est pas produit pendant la déformation. En conséquence, les mailles brutes ont donné des résultats précis. Le joint à simple recouvrement et les géométries de fente-pièce rapportée ont été analysées avec cette technique. Les résultats ont montré clairement la variation des contraintes de pelages et de cisaillement le long de la largeur du spécimen [7].

I-5. Le comportement des assemblages collés

Les travaux de Goland et Reissner et de Hart-Smith apparaissent comme étant des travaux références. En effet, Goland et Reissner sont les premiers à prendre en compte la flexion des substrats, tandis que Hart-Smith, sur la base des travaux de Goland et Reissner, analyse les assemblages collés sous toutes ses configurations. Par conséquent, ces travaux offrent la possibilité assez simplement d'être considéré comme référant à d'autres analyses.

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

- La longueur de recouvrement ;
- La rigidité (épaisseur et module d'élasticité) des substrats ;
- La rigidité (épaisseur et module d'élasticité) de l'adhésif ;
- Le comportement mécanique de l'adhésif.

I-5.1. La longueur de recouvrement

Les contraintes adhésives maximales en bord de joint augmentent quand la longueur de recouvrement augmente ; l'effort est donc transféré préférentiellement aux extrémités du joint. La charge moyenne à rupture augmente avec la longueur de recouvrement jusqu'à atteindre un plateau ; d'où l'existence d'une valeur optimale de recouvrement : c'est la longueur de recouvrement qui permet de supporter un effort maximal pour une surface collée minimale.

I-5.2. La rigidité des substrats

L'augmentation de l'épaisseur des substrats diminue la concentration des contraintes de cisaillement et augmente la concentration de contrainte de pelage. De Bruyne, montre que la résistance au cisaillement et le rapport $\frac{\sqrt{e}}{L}$ sont liés.

L'augmentation de la rigidité de flexion permet de diminuer la concentration des contraintes de cisaillement aux extrémités du joint. Cependant, l'augmentation de la rigidité des substrats par une augmentation de leur épaisseur ou de leur module d'Young augmente le facteur de moment fléchissant et donc une augmentation des contraintes de pelage. Un facteur important

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

est le rapport de la rigidité relative du substrat sur la rigidité relative de la colle : $E_i e / E e_i$. Plus ce rapport sera élevé, plus les contraintes de pelage seront faibles.

I-5.3. La rigidité de l'adhésif

Théoriquement, la résistance du joint collé augmente avec l'épaisseur de l'adhésif. Pourtant, les résultats expérimentaux montrent que la charge moyenne à rupture augmente puis décroît au-delà d'une certaine épaisseur jusqu'à une certaine limite. Dans [3], l'auteur explique que c'est le développement des contraintes d'arrachement aux extrémités du joint, croissant avec l'épaisseur de l'adhésif, qui entraîne une diminution de la résistance au cisaillement. Son étude met en évidence qu'aux extrémités du joint, il existe des zones à très fort gradient de contraintes de pelage, accompagnant l'annulation des contraintes de cisaillement aux bords libres. Il montre par ailleurs que les ruptures du joint de colle tendent à être adhésives et non cohésives quand l'épaisseur augmente (ce n'est donc pas la structure interne de la colle qui s'affaiblit quand l'épaisseur croît) : les contraintes sont d'autant plus élevées à l'interface substrat/adhésif que le joint est épais. Quand le module de cisaillement de la colle augmente, la résistance au cisaillement diminue ; ceci pourrait être expliqué par l'augmentation des contraintes maximales adhésives des adhésifs quand leur module augmente.

I-5.4. Le comportement mécanique des adhésifs

Sous les hypothèses simplificatrices prises par Hart-Smith, l'auteur montre que la prise en compte du comportement plastique de l'adhésif permet d'accorder résultats théoriques et expérimentaux. Cela montre donc l'importance du comportement adhésif considéré. De plus, cela montre que des modélisations, pour lesquelles l'adhésif est simulé par des ressorts agissant dans le plan et hors plan, suffisent, même si l'état de contrainte nulle en bord libre n'est pas vérifié. La prise en compte du comportement visqueux, des adhésifs montre l'évolution au cours du temps des assemblages collés. Par conséquent, la prise en compte de la variation temporelle des propriétés mécaniques des matériaux au cours du temps permet alors de prédire le comportement de l'assemblage collé au cours du temps.

I-6. Les défauts dans les assemblages collés

L'adhérence des assemblages collés est généralement mesurée à l'aide d'essais mécaniques de séparation de l'assemblage mais peut aussi être évaluée soit par des procédés

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

de contrôle destructifs et non destructifs de l'assemblage qui permettent d'identifier des défauts dans le joint de colle tels que de la porosité, un déficit de polymérisation, de la microfissuration ou des décollements ponctuels. Les essais mis en œuvre permettent une étude de la répartition de l'état de contrainte en fonction des données géométriques de l'assemblage et de la loi de comportement de l'adhésif.

I-6.1. Procédés non destructifs de contrôle des assemblages collés

L'objectif de tels procédés de mesure est de déterminer une corrélation directe entre la résistance mécanique du joint et des grandeurs mécaniques, physiques ou chimiques du joint sans toutefois l'endommager ou le détruire comme précédemment. De telles méthodes sont capables de localiser ou d'identifier des défauts qui peuvent diminuer les performances ou la durée de vie de l'assemblage. Il existe deux zones bien distinctes d'examen des propriétés de l'adhésif : la partie cohésive de l'assemblage qui permet d'évaluer les propriétés intrinsèques du joint et la zone interfaciale qui permet d'identifier la résistance du joint entre l'adhésif et le substrat. De plus, les cavités, les décollements localisés et la porosité créent une classe de défauts supplémentaire qui doit être inspectée. Avant d'étudier les méthodes d'identification non destructives des défauts pouvant entamer la résistance du joint, il est nécessaire d'identifier la nature de ces défauts.

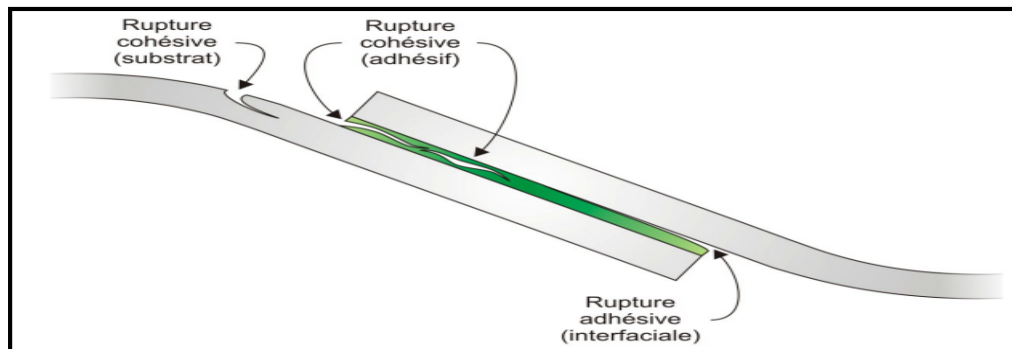


Figure I-21: Différents modes de ruptures.

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

- Une **porosité** due à des gaz de polymérisation ou de l'air emprisonné pendant la fabrication de l'assemblage.

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

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

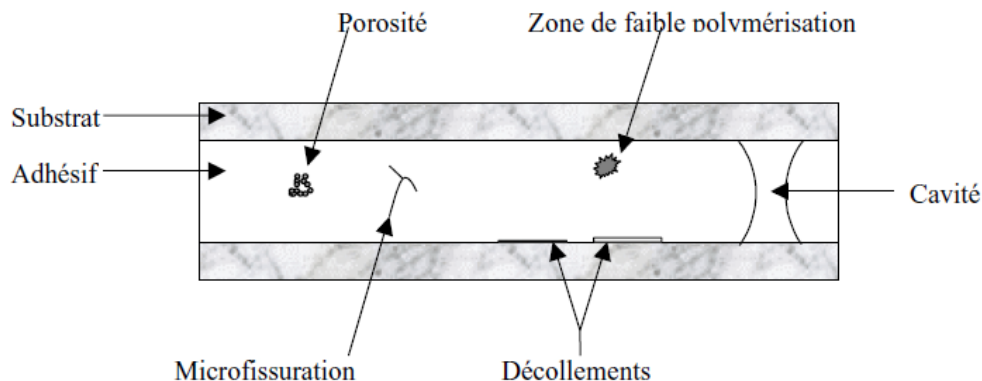


Figure I-22: Défauts typiques présents dans un joint de colle.

Lors de la réalisation d'un assemblage collé, de nombreux types de défauts sont susceptibles d'être créés. Ces défauts sont évidemment des sites préférentiels pour l'amorçage de la rupture. La figure I-22. Représente les défauts typiques d'un assemblage collé.

I-6.2. Procédés destructifs de contrôle des assemblages collés :

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

- Des contraintes normales au plan du joint (traction, compression).
- Des contraintes tangentielles au plan du joint (cisaillement).

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

- Des contraintes de pelage lorsque au moins l'un des matériaux est souple.
- Des contraintes de clivage qui résultent de l'application de la force à l'extrémité d'un assemblage de matériaux rigides [1].

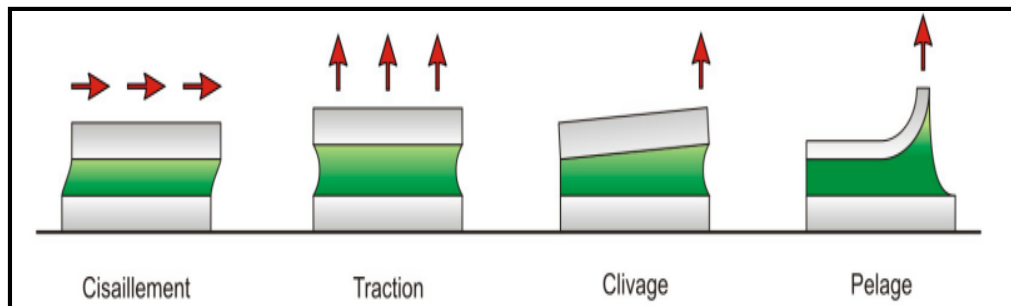


Figure I-23: Différents modes de sollicitations mécaniques.

I-7. Les avantages et les inconvénients du collage

I-7.1. Avantages de collage

Le collage est une technique d'assemblage performante et les avantages sont nombreux. Cette technique est utilisée par de nombreuses industries : automobile, bâtiment, électroménager, électronique, loisirs, aéronautique, mécanique ...

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

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

- Le collage permet d'assembler entre eux des matériaux différents sans précaution particulière (corrosion).

I-7.2. Inconvénients de collage

Les colles ont une tenue limitée en température. Dans le cas de l'aéronautique, l'intervalle de température de travail est -50°C $+70^{\circ}\text{C}$; par conséquent, cela ne semble pas être un problème.

- Le collage résiste mal au vieillissement humide. L'humidité diminue l'adhésion en s'infiltrant aux interfaces ; elle dégrade aussi la résine et diminue ses performances mécaniques. Il convient donc d'isoler la zone collée par un joint étanche.
- Le collage exige une préparation des surfaces soignée et précise, ce qui peut être contraignant dans une chaîne d'assemblage.
- Le temps de prise des colles peut être incompatible avec les cadences industrielles.
- Le collage ne permet pas un démontage aisé des structures assemblées. Les techniques utilisées (chauffage, refroidissement, utilisation de solvant, cisaillement) peuvent altérer les substrats.
- Les colles possèdent une mauvaise conductivité électrique pour évacuer les courants de Foucault sur avion.
- De plus, l'épaisseur de colle doit être maîtrisée au niveau de l'assemblage, afin de prédire la tenue de l'assemblage obtenu. Cette maîtrise de l'épaisseur représente une contrainte industrielle supplémentaire.

I-8. Références

[1]. Thèse Frédéric Simon, Endommagement et rupture des joints colles sollicités en traction ou cisaillement application au collage du bois (2001).

[2]. Céline GROS, Durabilité de joints adhésifs silicone sous conditions environnementales sévères : application au packaging en électronique de puissance(2006).

[3]. Thèse Eric Paroissien, Contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés)-application aux jonctions aéronautiques (2006).

Chapitre I : Généralités sur les assemblages collés

- [4]. Shih-Chuan Her. L'analyse des contraintes de joint adhésif à simple recouvrement, *Structures Composite* 47 (1999) 673–678.
- [5]. Thèse Romain LEGER. Contribution à l'étude de la durabilité des structures collées soumises à des efforts mécaniques après vieillissement humide (2010).
- [6]. Thèse Popineau, S, Ecole des Mines de Paris, 2005.
- [7]. Thèse Raul H. Andruet, Éléments finis géométriquement non linéaires de 2-D et 3-D pour l'analyse des joints adhésif collés(1998).
- [8]. Lucas F.M. da Silva, Paulo J.C. das Neves, R.D. Adams, J.K. Spelt, Modèles analytiques des joints adhésif collés Part I: Recherche bibliographique, *Journal international d'adhérence et d'adhésifs* 29 (2009) 319–330.
- [9]. Quantian Luo, Liyong Tong, L'analyse non linéaire Plein-couplée de joint d'adhésif à simple recouvrement. *Journal international des solides et des structures* 44 (2007) 2349-2370.
- [10]. Hyonny Kim et Keith T. Kedward. Analyse des contraintes des joints adhésifs collés sous le chargement de cisaillement plane (2001).
- [11]. J.P.M. Gonçalves, M.F.S.F. de Moura, P.M.S.T. de Castro, Un modèle d'élément fini tridimensionnel pour l'analyse des contraintes des joints adhésifs, *Journal international d'adhérence et d'adhésifs* 22 (2002) 357–365.
- [12]. Jun Cui. Modélisation d'élément fini de l'échec d'adhésif avec le rendement d'adhérent (2001).
- [13]. P.C. Pandey, H. Shankaragouda, Arbind Kr. Singh, L'analyse non linéaire de joint à simple recouvrement considérer le visco-plasticity en adhésifs, *Ordinateurs et Structures* 70 (1999) 387-413.
- [14]. E. Oterkus, A. Barut, E. Madenci, S.S. Smeltzer, D.R. Ambur, le joint adhésif à simple recouvrement des stratifiés composite avec les bords coniques, *Journal international des solides et des structures* 43 (2006) 1459-1489.
- [15]. L.D.R. Grant, R.D.Adams, Lucas F.M. da Silva, L'analyse expérimentale et numérique de joint adhésif à simple recouvrement pour l'industrie automotrice, *Journal international d'adhérence et d'adhésifs* 29 (2009) 405–413.
- [16]. Jae-Hyun Park, Jin-Ho Choi, Jin-Hwe Kweon, Évaluant les forces du joint l'aluminium-à-aluminium épais, avec différentes longueurs et épaisseurs adhésives, *Les structures composites* 92 (2010) 2226-2235.
- [17]. D. Fersini, A. Pirondi, L'analyse et la modélisation de la défaillance de fatigue du stir de frottement ont soudé d'un joint adhésif à simple recouvrement d'alliage d'aluminium, *Mécanique de rupture de technologie* 75(2008) 790-803.
- [18]. Z. Chen a, R.D. Adams, Lucas F.M. da Silva, La prévision du déclenchement et de la propagation crack de joint à simple recouvrement avec un critère d'échec d'énergie, *Mécanique de rupture de technologie* 78 (2011) 990–1007.
- [19]. B. Kilic, E. Madenci, D.R. Ambur, L'influence de l'adhésif se répandent dans le joint à simple recouvrement, *Energie Mécanique de rupture de technologie* 73 (2006) 1472–1490.

Chapitre II



Optimisation du joint à simple
recouvrement

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

II-1. Introduction

Dans un contexte d'optimisation des structures, il est intéressant de connaître précisément l'état de contrainte en tout point de la structure lors d'une sollicitation. En effet, cette information offre la possibilité d'agir localement sur la géométrie ou sur le matériau pour diminuer une sur-contrainte, retarder la rupture et par conséquent augmenter la durée de vie, on parle de dimensionnement et d'optimisation.

Depuis le début du 20^{ème} siècle de nombreuses techniques expérimentales ont été proposées par des industriels ou des laboratoires de recherche afin de déterminer la résistance d'un assemblage collé à différents types de sollicitations. Pour des raisons de coût, il est très contraignant, même pour un industriel, de réaliser des essais sur des structures complètes. Aussi, il est très courant d'étudier des échantillons de petites tailles afin de dégager les principales propriétés qui pourront être appliquées aux grandes structures. Mais la question est de savoir si les résultats obtenus sur échantillons de laboratoire sont représentatifs du comportement réel d'une structure industrielle particulièrement complexe [1].

Les méthodes analytiques et numériques se sont alors rapidement révélées être un outil indispensable pour aider au dépouillement des essais expérimentaux, mais aussi pour permettre d'en limiter le nombre. On peut, en effet, pour un moindre coût réaliser un grand nombre de calculs pour évaluer les points sensibles d'une structure et ainsi proposer des corrections en modifiant certains paramètres. On peut également réaliser des études paramétriques pour évaluer l'impact des variations de géométrie et/ou des propriétés des matériaux sur l'état de contraintes dans l'assemblage et ainsi limiter le nombre d'essais mécaniques à réaliser pour caractériser la structure [2].

Dans ce chapitre, une analyse numérique par la méthode des éléments finis bidimensionnels et tridimensionnels d'un joint adhésif collé à simple recouvrement est présentée, cette modélisation est effectuée avec les codes de calcul ABAQUS et FRANC2D/L. L'objectif de ce chapitre est d'optimiser les paramètres géométriques du joint à simple recouvrement. Plusieurs paramètres géométriques ont été pris en considération à savoir les types du maillage, le nombre des éléments utilisés, les conditions aux limites, le chargement, l'épaisseur de l'adhésif, la longueur de recouvrement et le module de cisaillement de l'adhésif.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

II-2. La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une technique pour rapprocher les équations différentielles régissant pour un système avec un ensemble d'équations algébriques concernant un nombre limité de variables. Ces méthodes sont populaires parce qu'ils peuvent facilement être programmés. Les techniques des éléments finis ont été initialement développées pour des problèmes structurels, mais ils ont été étendus à de nombreux problèmes du terrain. Le solide est décomposé en éléments de forme géométrique simple ayant des côtés communs et dont les sommets ou nœuds sont les points d'articulation de plusieurs éléments entre eux. Ces nœuds seront les points d'application des forces intérieures ou extérieures. L'opération de décomposition est le maillage.

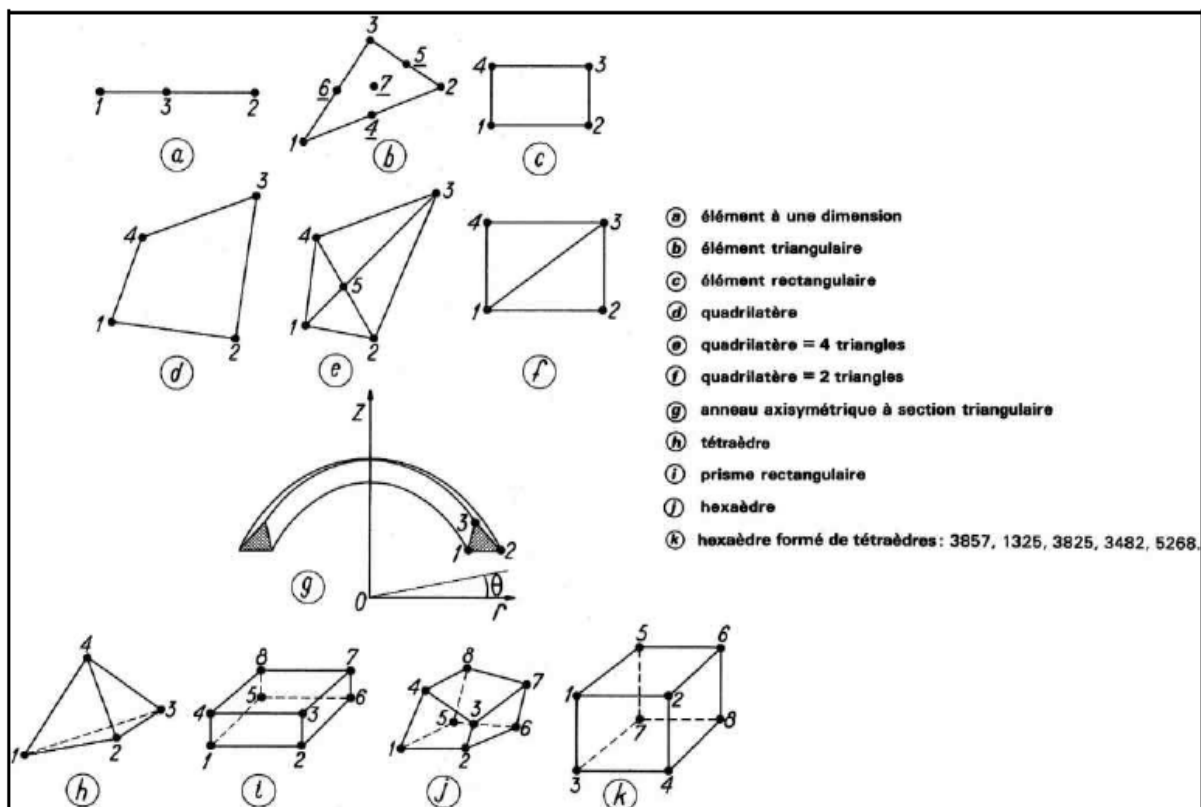


Figure II-1: Les éléments les plus fréquemment utilisés [2].

Parmi les éléments volumiques qui sont généralement utilisés dans la méthode des éléments finis tridimensionnelle (3D), l'élément tétraédrique et l'élément hexagonal. Chaque nœud de l'élément aura trois degrés de liberté de translation. L'élément peut déformer ainsi dans chacune des trois directions dans l'espace.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

Les trois composantes du déplacement $U(x, y, z)$, $V(x, y, z)$ et $W(x, y, z)$ seront données par les trois équations :

$$\begin{aligned}U(x,y,z) &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \\V(x,y,z) &= \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y + \beta_4 z \\W(x,y,z) &= \gamma_1 + \gamma_2 x + \gamma_3 y + \gamma_4 z\end{aligned}\tag{II-1}$$

Les n équations régissant l'équilibre statique d'un système mécanique ou d'une pièce se mettent sous la forme :

$$[K] \{u\} = \{F\}\tag{II-2}$$

Ou :

- $[K]$ est la matrice de rigidité symétrique de dimensions n caractérisant la rigidité du système. Elle est formée par l'assemblage des matrices de rigidité élémentaires associées à chaque sous domaine. La dimension n est égale au produit du nombre de nœuds par le nombre de déplacements élémentaires associés à chacun.
- $\{u\}$ est le vecteur, de dimension n , des déplacements des nœuds de la structure.
- $\{F\}$ est le vecteur de dimension n des efforts ponctuels appliqués sur les nœuds de la structure.

Les déplacements en tous points du milieu continu sont alors déduits du vecteur $\{u\}$ et des fonctions de forme. Les tenseurs de déformation et de contraintes en tous points en découlent également grâce aux lois de comportement du matériau.

Les matrices de rigidité des éléments non linéaires dépendent des nœuds de connexion et sont assemblés aux matrices issues de la méthode des éléments finis pour donner un système caractérisant le comportement statique du mécanisme complet en contact du type :

$$[K(\{u\})]\{u\} = \{F\}\tag{II-3}$$

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

La géométrie, la position des nœuds, et le système de coordonnées pour cet élément sont indiqués dans la figure II-2.

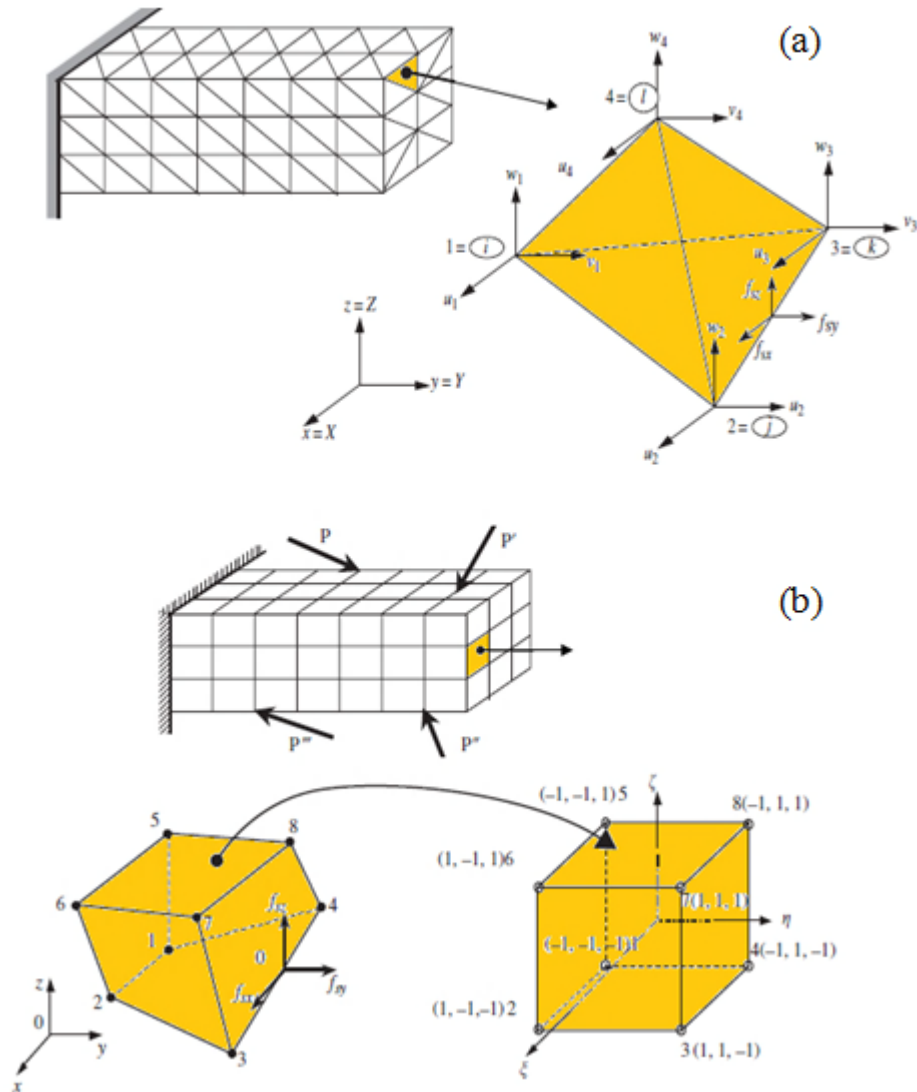


Figure II-2: Un élément, (a)- tétraèdre de quatre nœuds, (b)- hexaèdre de huit nœuds.

- **Le maillage**

Le maillage est exécuté pour discrétiser la géométrie créée dans de petits morceaux appelés des éléments ou les cellules. La solution pour qu'un problème peut être divisé en petits éléments ou cellules utilisé un ensemble de grilles ou de nœuds. La génération de maillage est une tâche très importante du prétraitement. Le domaine doit être engrené correctement dans des éléments des formes spécifiques telles que des triangles et des quadrilatères. La triangulation est la manière la plus flexible et la plus bien établie pour créer des maillages

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

avec les éléments triangulaires. Elle peut être faite presque automatiquement pour la méthode bidimensionnelle, et même la méthode tridimensionnelle. Par conséquent, elle est généralement disponible dans la plupart des préprocesseurs. L'avantage additionnel d'employer des triangles est la flexibilité de modéliser la géométrie complexe et ses frontières. L'inconvénient est que l'exactitude des résultats de simulation basés sur les éléments triangulaires est souvent inférieure à cela obtenue par les éléments quadrilatéraux. Quelques exemples des maillages sont donnés sur la figure II-3.

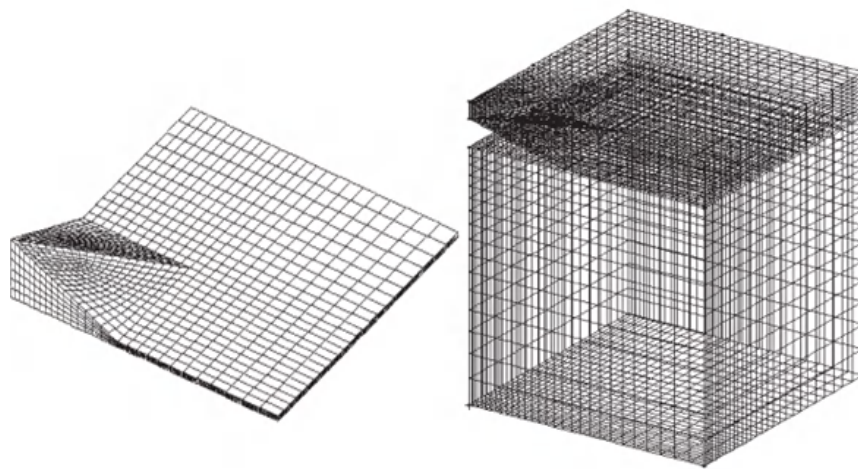


Figure II-3: Maillage avec la méthode d'éléments finis tridimensionnelle.

- **Les propriétés des matériaux**

Beaucoup de systèmes de technologie se composent de plus d'un matériau. La propriété des matériaux peut être définie pour un groupe des éléments ou de chaque élément individuel, si nécessaire. Pour différents phénomènes à simuler, différents ensembles de propriétés des matériaux sont exigés. Par exemple, le module de Young et le module de cisaillement sont exigés pour l'analyse des contraintes des solides et des structures, alors que le coefficient de conductivité thermique sera exigé pour une analyse thermique. Cependant, l'obtention de ces propriétés n'est pas toujours facile. Il y a les bases de données des matériaux qui sont disponibles, et habituellement des expériences sont exigées pour déterminer exactement la propriété des matériaux à employer dans le système utilisé.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

- **Les conditions aux limites et de frontière**

Les conditions aux limites et de frontière jouent un rôle décisif en résolvant la simulation. L'entrée de ces conditions est habituellement faite facilement par les préprocesseurs commerciaux, et elle est souvent connectée avec des graphiques. Les utilisateurs peuvent spécifier ces conditions aux identités géométriques (points, lignes ou courbes, surfaces, et solides) ou aux éléments ou aux grilles. Encore, pour simuler exactement ces conditions pour les systèmes de technologie réels exige l'expérience, la connaissance et les jugements appropriés de technologie. Les conditions aux limites et de frontière sont différentes du problème au problème [3].

II-3. Géométries des joints

Les joints peuvent exister sous différentes formes : en bout à bout, en forme de T, en recouvrement simple ou double, en tubes emboîtées l'une sur l'autre, etc. Mais en production, le recouvrement simple est la configuration la plus répandue, probablement pour des raisons de facilité de mise en œuvre. Afin de répondre aux besoins de production, nous ne considérerons que le recouvrement simple dans le cadre de cette étude. La figure II-4 présente un exemple typique de joint à recouvrement simple et permet de définir les dimensions permettant de décrire de tels joints. La figure II-4 présente le modèle géométrique pour le joint à simple recouvrement.

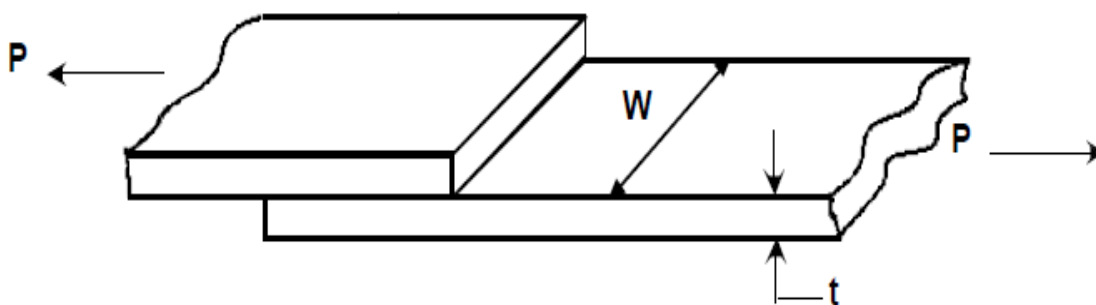


Figure II-4 : Le joint adhésif collé à simple recouvrement.

L'équilibre de force de l'adhérent supérieur et inférieur dans la figure II-5, nous prenons les équations de gouvernement fondamentales suivantes :

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

Pour l'adhérent supérieur et inférieur, les équations d'équilibre sont :

$$\frac{dN_1}{dx} + \tau = 0; \quad \frac{dQ_1}{dx} + \sigma = 0; \quad \frac{dM_1}{dx} + \frac{t_1}{2} \tau - Q_1 = 0, \quad (\text{II-4})$$

$$\frac{dN_2}{dx} - \tau = 0; \quad \frac{dQ_2}{dx} - \sigma = 0; \quad \frac{dM_2}{dx} + \frac{t_1}{2} \tau - Q_2 = 0. \quad (\text{II-5})$$

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

Les équations différentielles (II-4) et (II-5) peuvent être combinées ensemble par la contrainte de cisaillement tangentielle dans la couche d'adhésif comme suit :

$$\tau = G_a \gamma = \frac{G_a}{\eta} (u_i - u_o) \quad (\text{II-6})$$

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

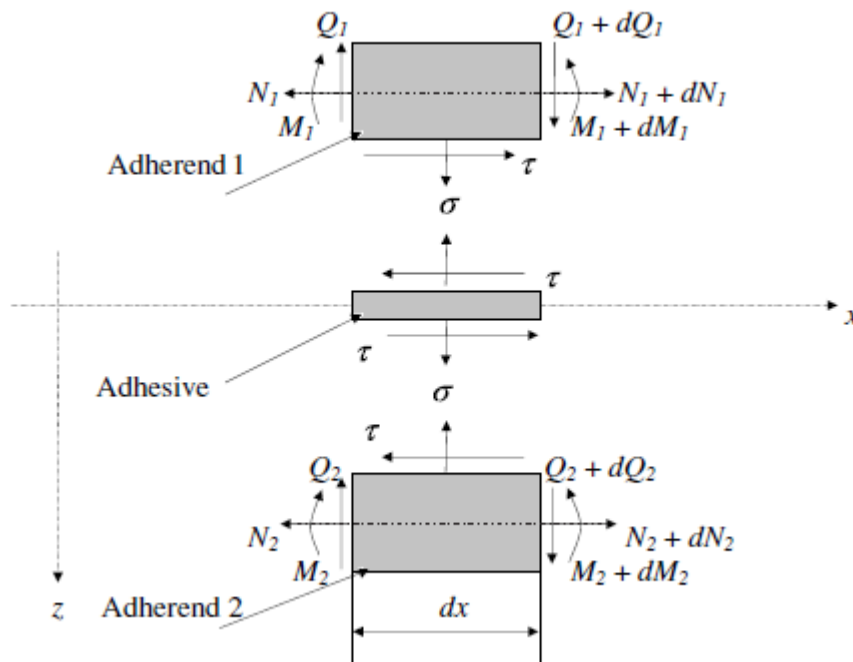


Figure II-5: Les contraintes dans un joint à simple recouvrement [4].

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

II-3.1. Détermination des contraintes dans un joint à simple recouvrement

Le dimensionnement d'une structure collée est l'étape majeure de la conception. Un bon dimensionnement permettra d'obtenir une durée de vie meilleure, une transmission des efforts plus importante et une masse plus faible par exemple. Le travail du concepteur est de traduire ces impératifs à l'échelle de chaque matériau constituant le collage. Connaissant très précisément les caractéristiques mécaniques des substrats et de l'adhésif, les sollicitations imposées et la géométrie, le dimensionnement d'un assemblage consiste à déterminer l'état de contrainte en tout point afin de s'assurer du bon respect des consignes. Si les limites mécaniques des matériaux sont dépassées, le concepteur peut alors proposer de modifier la configuration matériau/géométrie afin de supporter les sollicitations imposées et les exigences de l'industriel.

- **Définition d'une contrainte équivalente : Critère de Von Mises**

Flom et Wang [5] ont déterminé une contrainte équivalente de Von Mises pour définir un critère de rupture dans les joints brasés à recouvrement. En considérant un système élastoplastique en déformation plane, ils ont obtenu par modélisation la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises (Figure II-6) dans les joints d'aciers brasés avec de l'argent pur.

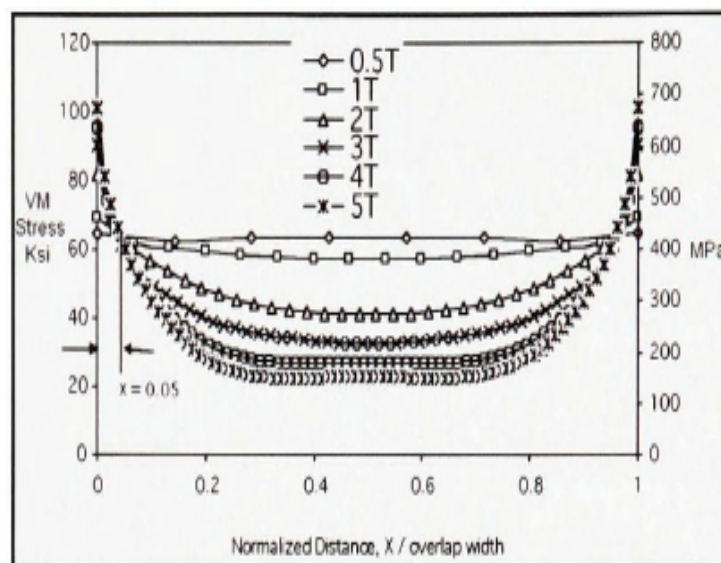


Figure II-6: La distribution des contraintes de Von Misés (adaptée de Flom et Wang [1]).

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

On remarque en analysant les courbes (Figure II-6) obtenues pour différents recouvrements que la contrainte de Von Mises est quasiment constante et uniforme sur toute l'étendue des joints très courts (joints avec des recouvrements de 0.5T et 1T) alors que pour des joints plus longs, la contrainte de Von Mises demeure constante et uniforme au centre, mais augmente brutalement pour atteindre des valeurs maximales aux bords des joints. Le fait que les valeurs de contraintes soient maximales aux bords des joints expliquent pourquoi les fissures y sont toujours amorcées. Flom et Wang ont constaté que toutes les courbes de contrainte équivalente de Von Mises modélisées se croisaient en un même point. Sur une échelle normalisée (Figure II-6), ce point se situe à 5% de la longueur totale du joint à partir de chaque extrémité. Ils ont alors proposé la valeur de contrainte obtenue pour ce point comme valeur critique de rupture des joints brasés testés.

S'il est validé, ce critère de défaillance pourrait s'appliquer à tous les joints quelles que soient leurs caractéristiques géométriques, mais ces hypothèses n'ont pas été validées par d'autres travaux. L'effet des microstructures reste inconnu, les joints brasés testés par Flom et Wang étaient dépourvus de tous défauts (brasage à l'argent pur).

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}{2}} \quad (\text{II-7})$$

Ou :

- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Sont les contraintes suivant les trois directions.
 - τ_{xy} : Le cisaillement dans le plan xy.
 - τ_{yz} : Le cisaillement dans le plan yz.
 - τ_{xz} : Le cisaillement dans le plan xz.
- **Définition des contraintes de tension et de cisaillement**

Un joint à recouvrement, soumis à un essai de traction, est soumis à deux types de contraintes la tension (σ) et le cisaillement (τ). En réalité, les contraintes sont complexes et peuvent difficilement être décrites par une valeur moyenne. La figure II-3, illustre la

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

distribution hétérogène de ces deux contraintes le long du joint. En effet, si on considère un petit élément de volume au centre du joint, celui-ci n'est sollicité qu'en cisaillement, alors qu'un autre petit élément de volume situé au bord du joint, quant à lui, subit l'effet de deux contraintes, une contrainte de tension, l'autre de cisaillement. L'effet géométrique provoque également un effet de triaxialité qui rend encore plus complexe la description des contraintes. La superposition de ces deux contraintes aux bords du joint provoque une concentration de contrainte, laquelle tend à expliquer que les fissures y soient quasi systématiquement initiées. Les courbes de contraintes de tension et cisaillement moyennes (Figure II-7) sont obtenues de façon classique en fonction du recouvrement ou plus exactement en fonction du ratio du recouvrement par rapport à l'épaisseur du métal de base. C'est une façon de normaliser et de s'affranchir de la géométrie de ces joints. Ce graphique met en évidence deux conditions de tests complètement différentes. Lorsque le recouvrement est grand, l'essai s'apparente à la tension pure du métal de base et le comportement du joint tend vers celui du métal de base. Pour des petits recouvrements, la rupture a tendance à se produire en cisaillement dans le joint. Pour des recouvrements intermédiaires, il se produit généralement des ruptures mixtes, à la fois dans le métal de base et dans le joint.

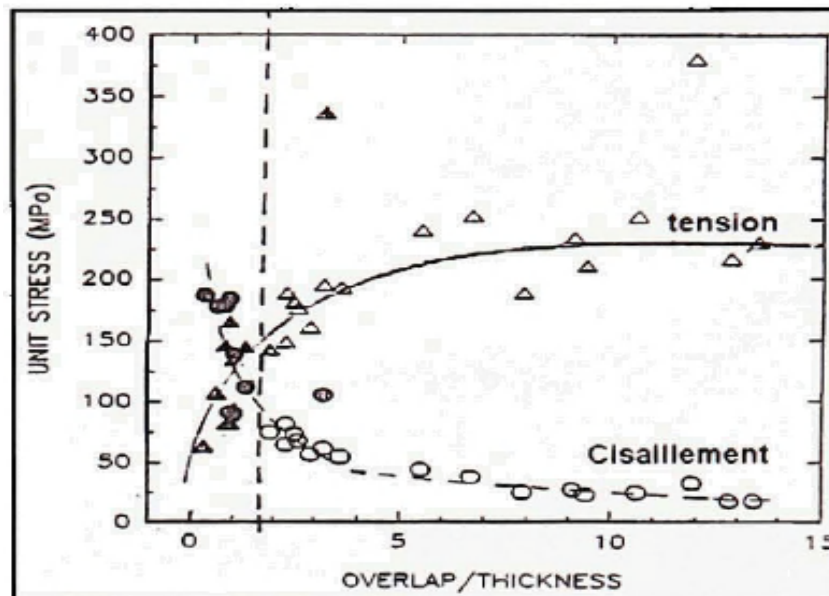


Figure II-7: Présentation des contraintes de tension et cisaillement dans un joint à simple recouvrement [1].

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

II-4. Présentation des matériaux utilisés dans notre étude

II-4.1. Alliage d'aluminium 2024-T3

L'élément aluminium a été découvert en 1825. C'est l'élément métallique le plus présent à la surface de la terre. En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2 % environ de celle des aciers. Cependant, ce métal (et ses alliages) arrive en seconde position lorsque l'on parle de l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. Sa masse volumique de $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$ en fait un matériau léger et de ce fait très intéressant, notamment pour des applications dans le secteur de l'aéronautique. Néanmoins, l'utilisation de l'aluminium pur reste limitée en raison de ses propriétés mécaniques médiocres [5].

Matériau	σ_R (MPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	E(MPa)	A(%)	ν
Al 2024-T3	452	230	68800	2.4	0.33

Tableau II-1: Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 2024-T3.

Le module d'Young calculé dans la partie linéaire de la courbe est de 68800 MPa , le coefficient de Poisson est égal à 0,33 selon la fiche technique du fournisseur. Le module de cisaillement de l'aluminium est égale à:

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

II-4.2. Adhésif Adekit A140

Les adhésifs ont été choisis ont basé sur leur utilisation dans la construction et la réparation des structures aérospatiales. On a choisis pour les joints adhésifs collés une couche d'adhésif époxyde bi-composant type Adekit A140 fait par la compagnie d'AXSON. Adhésif époxy bi-composant permettant la réalisation d'assemblages structuraux devant posséder une bonne tenue au pelage et une bonne résistance aux vieillissements. Les applications de l'adhésif Adekit A140 sont:

- Collages de pièces de carrosserie.
- Collages des structures métalliques (véhicules de compétition, collage en aéronautique).

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

- Collages d'inserts, de structures composites.

Il est recommandé d'utiliser le produit dans une plage de température comprise entre +18°C et +35°C. Il est indispensable lors de la manipulation d'observer strictement les mesures d'hygiène de travail appropriées:

- locaux ventilés
- port de gants et de lunettes
- port de vêtements étanches

Les propriétés mécaniques de l'adhésif Adekit A140 sont présentes dans le tableau II-2.

Matériau	E(MPa)	G(MPa)	A(%)	ν
Adekit A140	2692	1	5	0.3

Tableau II-2: Propriétés mécaniques de l'adhésif Adekit A140.

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

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

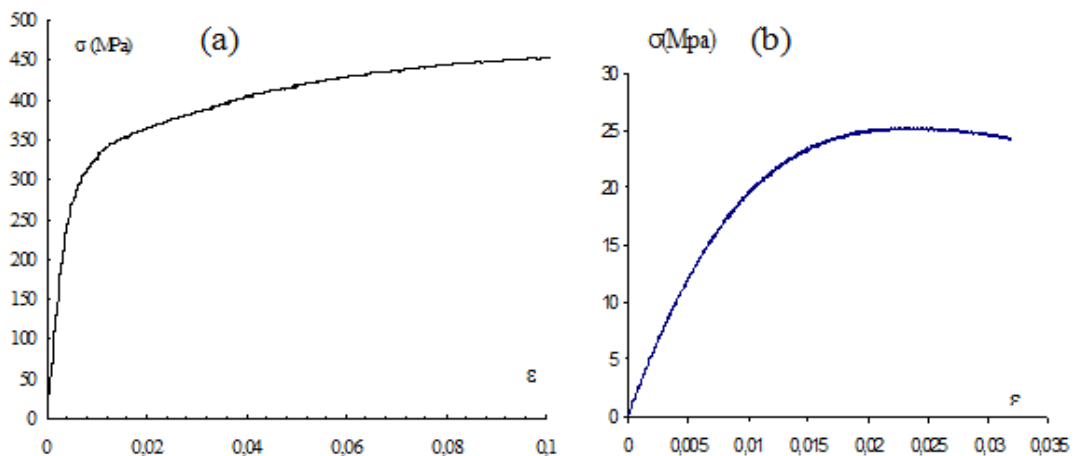


Figure II-8: Courbe contrainte-déformation, -a) de l'aluminium 2024-T3, -b) de l'adhésif Adekit A140.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

II-4.3. Model géométrique

Le modèle géométrique pour le joint adhésif collé à simple recouvrement utilisé dans l'analyse par éléments finis est effectué sur deux plaques minces en aluminium 2024-T3 assemblées par l'adhésif époxyde Adekit structural A140 (Figure II-9). Les dimensions associées sont comme suit, la longueur $H=120\text{mm}$ des adhérents supérieurs et inférieurs, avec une largeur de $W=25\text{mm}$, l'épaisseur des adhérents $e_t=2\text{mm}$, l'épaisseur de l'adhésif $e_a=0.2\text{mm}$.

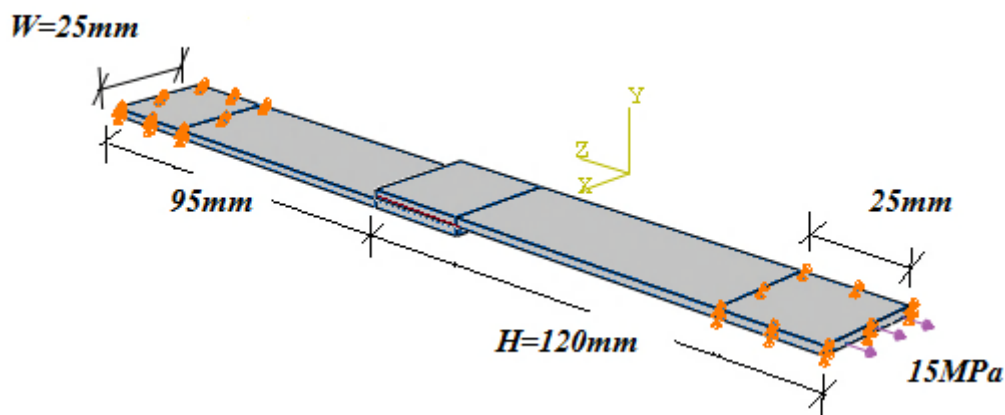


Figure II-9: Modèle géométrique de joint adhésif collé à simple recouvrement.

- **Chargement et conditions aux limites:**

- Contrainte de traction « $\sigma=15\text{MPa}$ » appliquée normalement à la section transversale du structure et parallèlement à l'axe « z ».

- Coté fixe, la face supérieure et la face inférieure de la plaque:

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

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

- Coté mobile, la face supérieure et la face inférieure de la plaque:

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

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

II-4.4. Le maillage

Le maillage est automatiquement généré à partir de la construction de domaines correspondant aux zones géométriques. D'habitude on choisit un maillage carré ou

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

triangulaire mais rien n'interdit de choisir des maillages plus complexes. Il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier et l'on a tendance à resserrer le maillage près des endroits d'intérêts (par exemple aux endroits où l'on pense que la solution va beaucoup varier). Plus ce maillage est resserré plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie » solution [2].

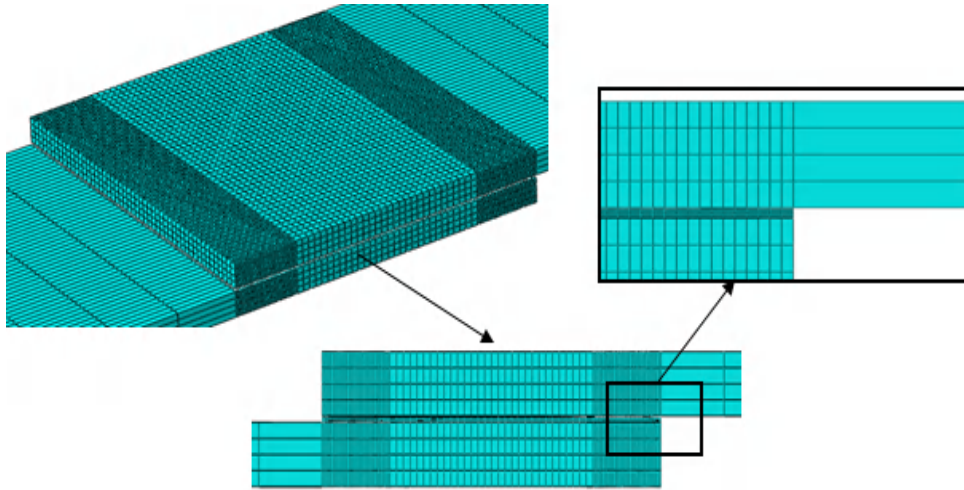


Figure II-10: Maillage du joint adhésif collé à simple recouvrement utilisée.

L'adhésif et les zones extrêmes de la longueur de recouvrement doivent comporter un maillage très fin par rapport aux autres zones qui doivent comporter un maillage grossier pour éviter d'avoir un nombre volumineux de degrés de liberté inutilement. La figure II-10 montre le maillage des différentes composantes de joint à simple recouvrement avec un raffinement de maillage de la zone de recouvrement.

II-5. Analyse et résultats

II-5. 1. Optimisation par la méthode des éléments finis tridimensionnels (3D)

- **Influence des différents types du maillage sur la distribution des contraintes**

La simulation numérique a été réalisée par la méthode des éléments finis tridimensionnels, en utilisant le code de calcul ABAQUS. Le maillage est raffiné dans la partie de collage dans la zone de recouvrement. La fiabilité des résultats obtenus nécessite un maillage très raffiné. En effet, le raffinement de maillage de l'adhésif est d'une grande importance pour analyser les contraintes. Le tableau II-3, représente les différents types de maillage de l'adhésif utilisé et les valeurs maximales des contraintes de, Von Mises, de cisaillement et de pelage.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

Les différents types du maillage										
Les contraintes maximales (MPa)	ST-Q					ST-L				
	Tet (C3D10:A10)	Hex-dom(C3D20R:A20)		Hex (C3D20R:A20)		Hex (C3D8R:An8)		Hex-dom(C3D8R:An8)		Tet (C3D4:A4)
	M1: Free	M2: Stru	M3: Swep	M4: Stru	M5: Swep	M6: Stru	M7: Swep	M8: Stru	M9: Swep	M10: Free
Von Mises	21.19	17.67	17.67	17.67	17.67	<u>12.68</u>	12.75	<u>12.68</u>	12.78	16.89
Cisaillement	10.66	8.87	8.90	8.87	8.90	<u>6.76</u>	6.82	<u>6.76</u>	6.84	8.34
Pelage	22.69	17.27	17.40	17.27	17.40	<u>9.61</u>	9.66	<u>6.76</u>	9.70	14.65

Tableau II-3: Valeurs maximales des contraintes de, Von mises, de cisaillement et de pelage dans l'adhésif pour différents types du maillage.

Dans le tableau II-3, les résultats de l'analyse numérique de l'effet du type de maillage sur la valeur maximale des contraintes montre que le choix des éléments de type Hex (C3D8R: An8) et Hex dom (C3D8R: An8) donnent des résultats presque identiques.

La détermination de l'état de contrainte pour le maillage (M6) est également satisfaisante aux extrémités de recouvrement par rapport au maillage (M8). Les contraintes de Von Mises obtenues grâce au maillage (M8) sont un peu plus faibles que pour le maillage (M6). Cependant comme on s'intéresse peu à cette zone dans l'assemblage, on décide de conserver le maillage (M6) pour notre modèle. Également, Le maillage (M8) extrêmement fin pourra être proposé pour notre modèle.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

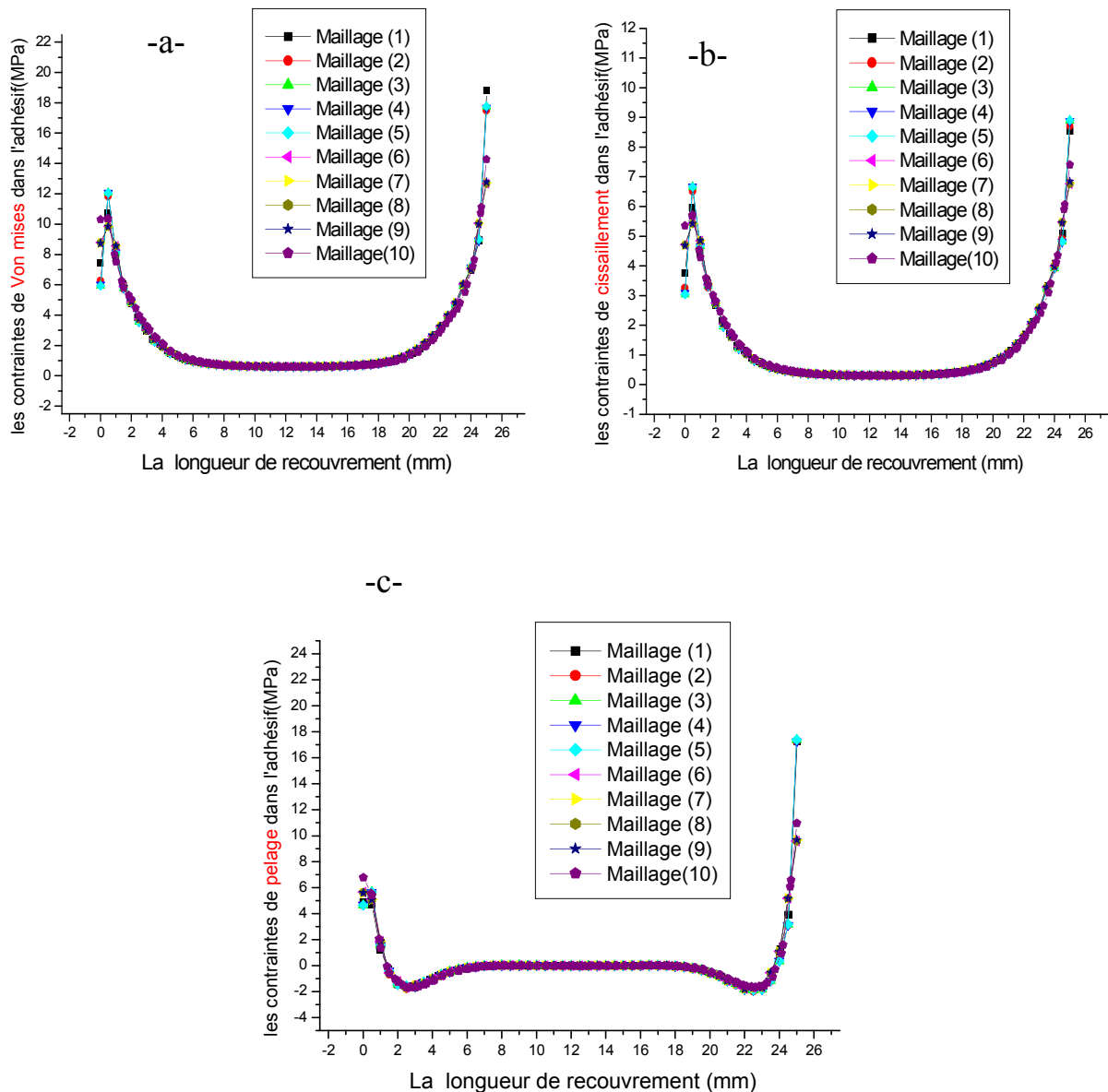


Figure II-11: Distribution des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage dans l'adhésif pour les différents types du maillage.

Le maillage (M6) sera conservé pour la suite de l'étude puisqu'il permet de décrire les changements d'état de contraintes aux extrémités de recouvrement que ne captent pas les maillages plus grossiers (Figure II-11) tout en conservant un nombre raisonnable d'éléments et des temps de calculs acceptables. Ce maillage permet également de trouver une contrainte de cisaillement minimale sans appliquer de conditions de bords particulières.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

- **Influence du nombre des éléments sur la distribution des contraintes**

Plusieurs calculs ont été entrepris pour définir le maillage au niveau du recouvrement et le type d'élément le mieux adapté à cette étude.

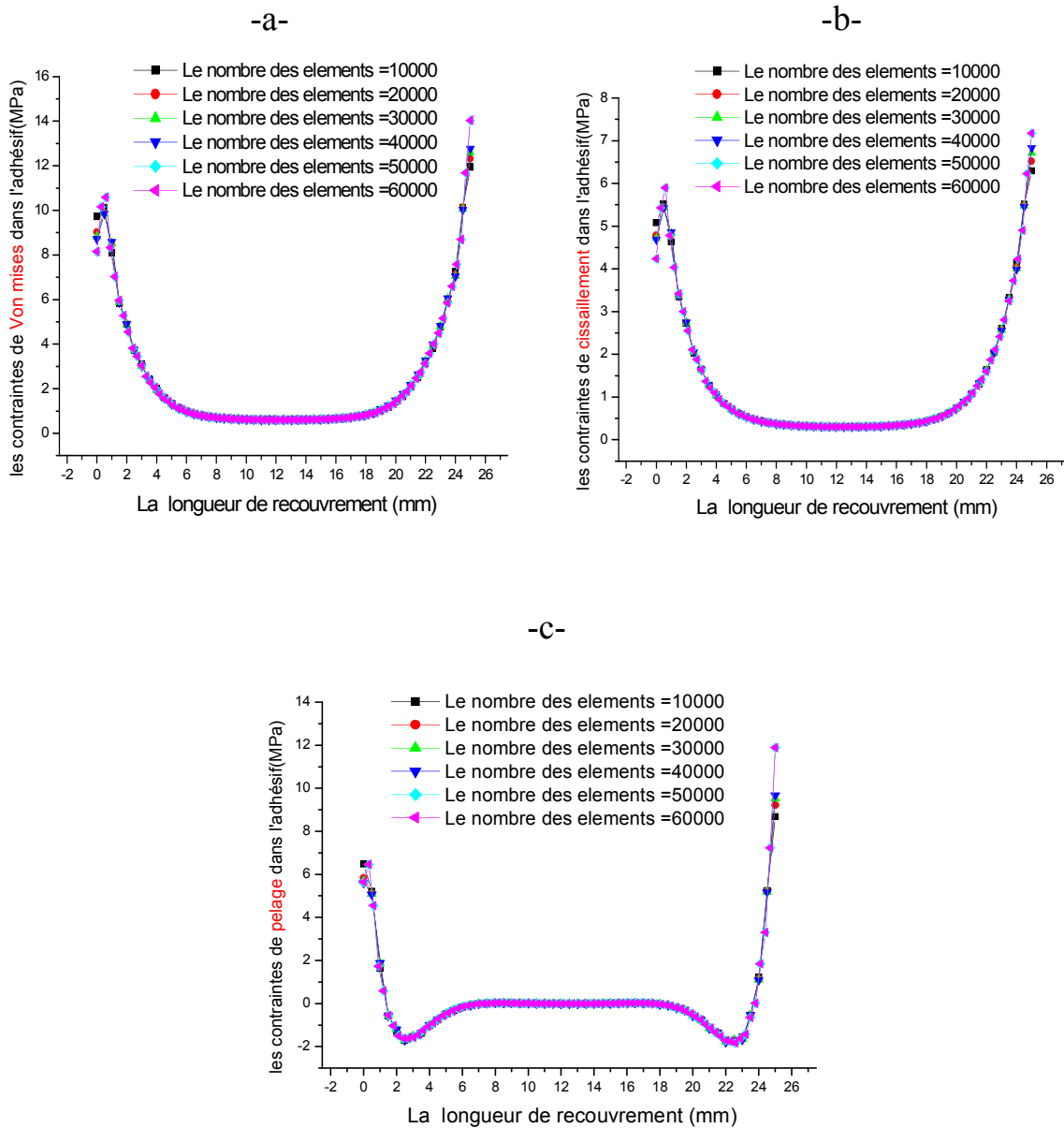


Figure II-12: Distribution des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage suivant la longueur de recouvrement en fonction du nombre des éléments du maillage.

A chaque simulation, la finesse du maillage a été augmentée voir la figures II-12, et on cherche à obtenir une description la plus précise possible de l'état de contrainte dans la couche d'adhésif pour autant générer trop d'éléments ce qui causerait des temps de calculs

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

trop important. Le critère nécessaire à une bonne taille de maillage est la valeur minimale de la contrainte de cisaillement aux bords de recouvrements.

Afin d'opter un choix pour le nombre d'élément de maillage dans notre modèle géométrique on a essayé d'augmenter le nombre d'élément uniquement dans la zone de recouvrement suivant l'épaisseur et la longueur de l'adhésif, pour chaque nombre de maillage on a déterminé les contraintes maximales et on a tracer les courbes représentées dans les figures II-13 et II-14, on a augmenté le nombre d'éléments jusqu'à ce qu'on arrive à une stabilité des contraintes.

1^{ère} cas : suivant l'épaisseur de l'adhésif

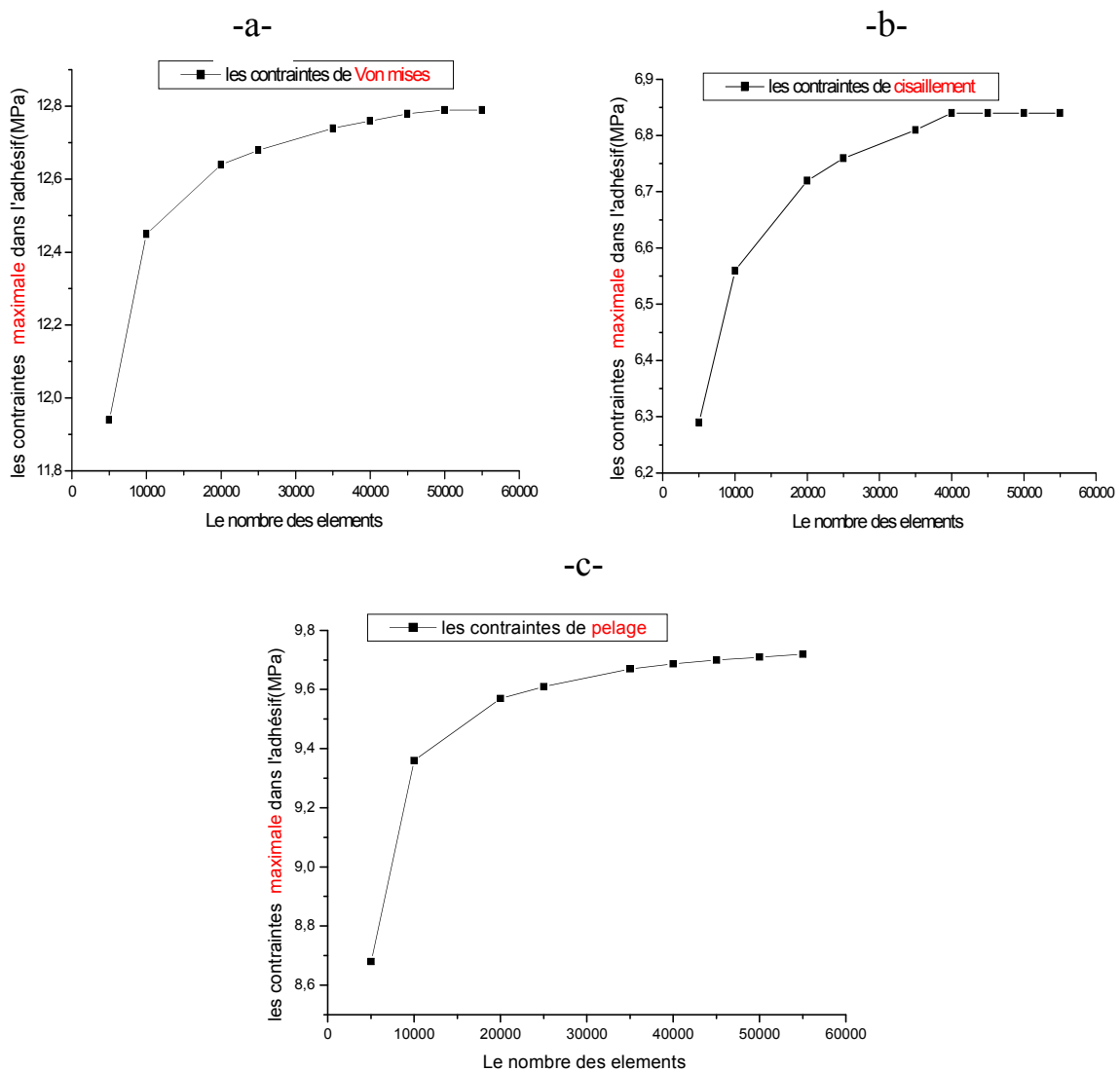


Figure II-13: Variation des contraintes maximales de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage dans l'adhésif.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

2^{ème} cas : suivant la longueur de l'adhésif

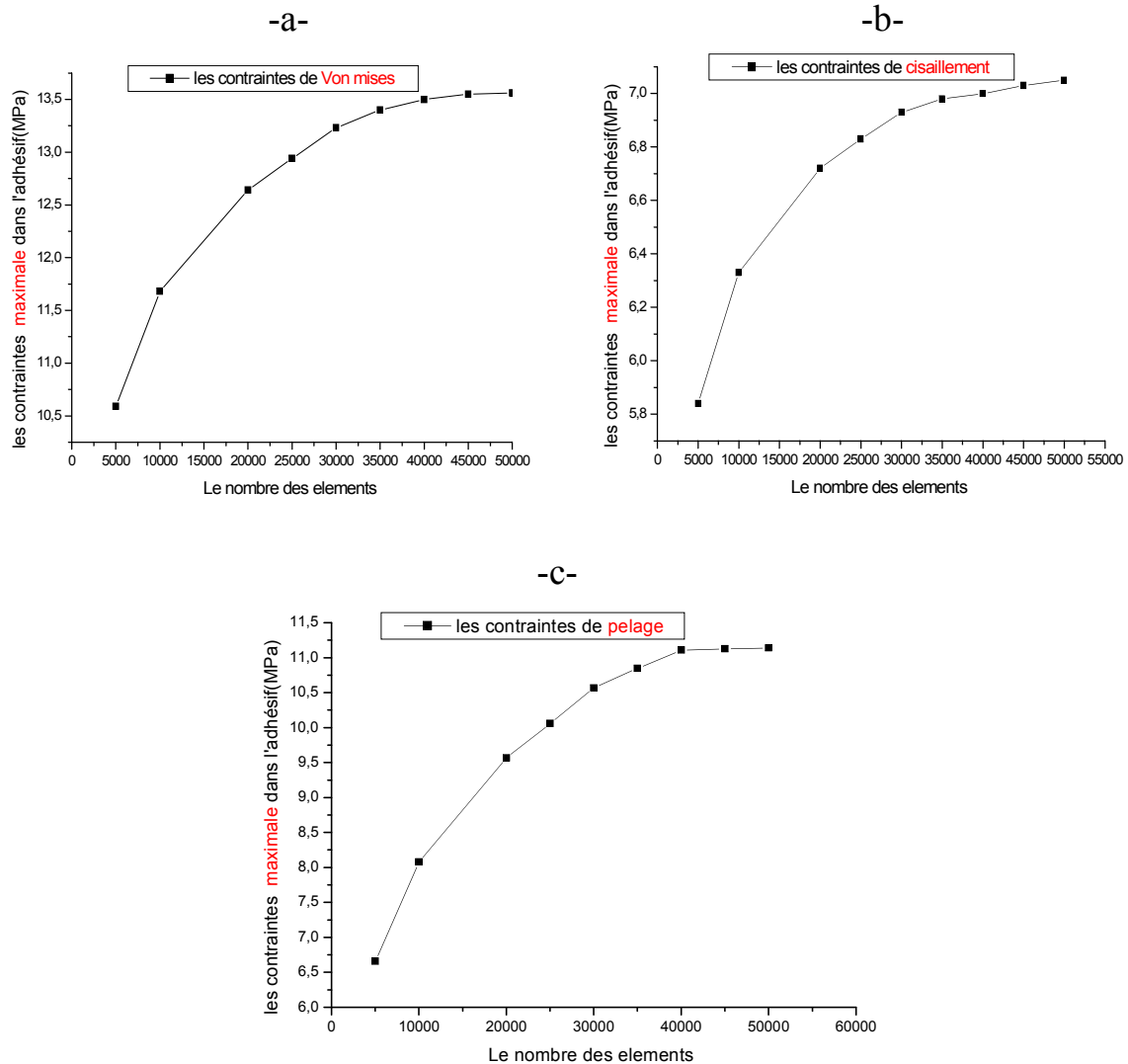


Figure II-14: Variation des contraintes maximales de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage dans l'adhésif.

Les maillages des figures (II-13, II-14) sont obtenus en modifiant le nombre des éléments suivant l'épaisseur et suivant la longueur de l'adhésif jusqu'à une taille qui permet d'obtenir un maillage régulier. Pour ces maillages, l'option « biased » disponible sous Abaqus est employée pour créer un maillage se raffinant essentiellement vers les extrémités de recouvrement où de forts gradients de contraintes sont attendus. En utilisant cette technique, on modifie le nombre d'éléments, tout en affinant la description des contraintes dans les zones intéressantes grâce à des éléments de plus petite taille.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

• Influence de la charge «P » sur la distribution des contraintes

Afin d'étudier l'effet de la variation de la charge sur la distribution des contraintes dans l'adhésif. On a introduit plusieurs niveaux de charge appliquée normalement à la section transversale du substrat. Les résultats de cette simulation obtenus sont illustrés dans la figure II-15. L'objectif principal est d'éviter des contraintes maximales qui dépassent la limite à la rupture dans la couche d'adhésif et de ramener l'adhésif à travailler dans le domaine plastique qui est bénéfique puisque l'adhésif travaille plus en cisaillement.

On constate d'après la figure II-15 que la contrainte de Von Mises est toujours très importante aux extrémités de recouvrement et aux coins formés par ces extrémités et les bords libres de la plaque, pour un chargement de 40 MPa on a une contrainte maximale de 22.93MPa qui est une contrainte en dessous de la limite de la rupture.

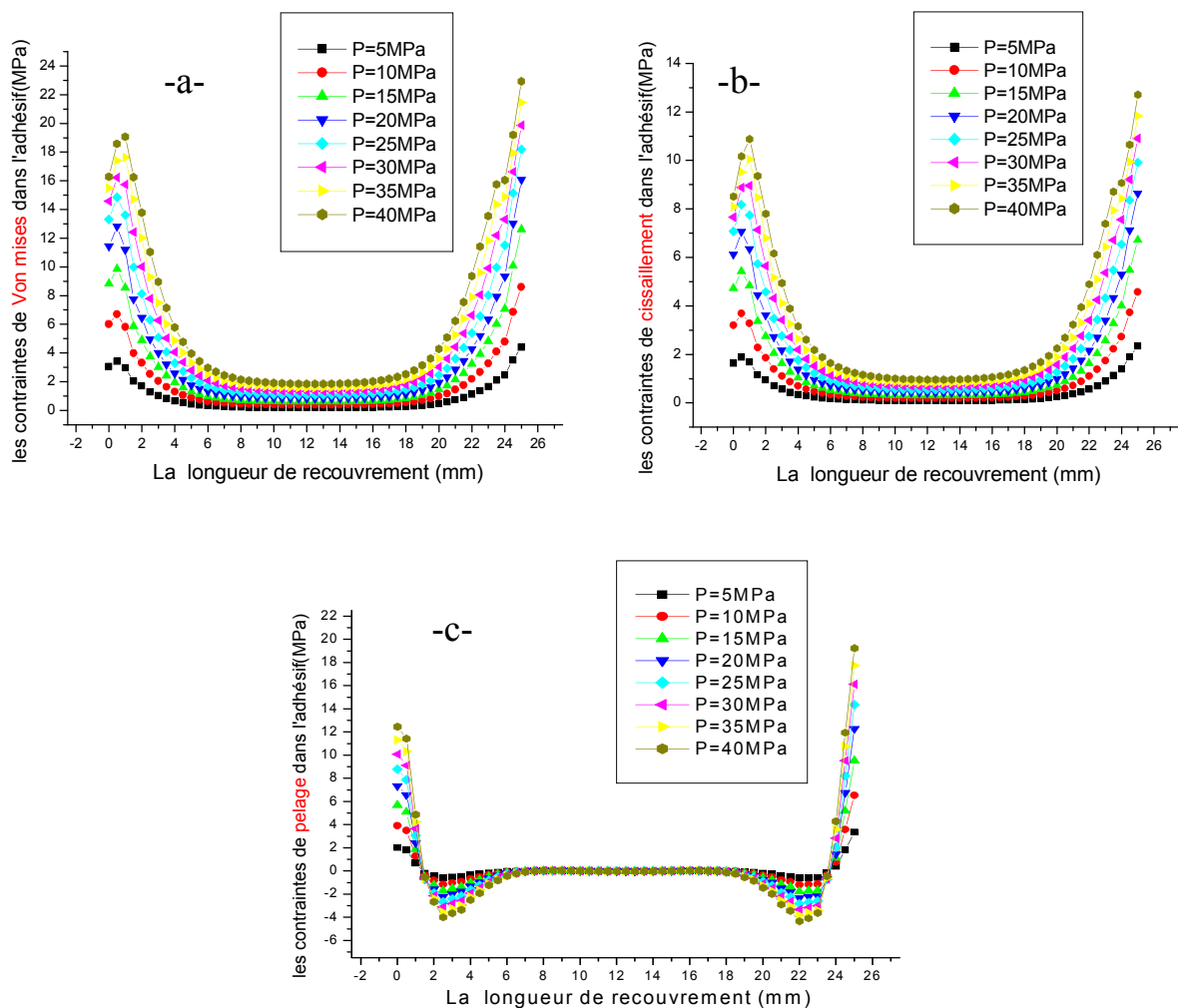


Figure II-15: Distribution des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement et c)- de pelage dans l'adhésif.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

D'une part, on note une augmentation des contraintes de cisaillement du fait de la forte déformation transversale des substrats (Figure II-15), d'autre part, on remarque, que dans ces zones, une contrainte de pelage importante qui se forment à cause de la déformation longitudinale et latérale importante des substrats. On rappelle que pour des grandes charges, les substrats sont très fortement plastifiés et qu'une petite variation de charge provoque une déformation substantielle qui est transmise à l'adhésif. Les valeurs maximales des contraintes pour différentes charges sont présentes dans le tableau II-4.

Les contraintes maximales	P ₁ = 5MPa	P ₂ = 10MPa	P ₃ = 15MPa	P ₄ = 20MPa	P ₅ = 25MPa	P ₆ = 30MPa	P ₇ = 35MPa	P ₈ = 40MPa
Von Mises	4.40	8.60	12.64	16.12	18.25	19.86	21.46	22.93
Cisaillement	2.33	4.57	6.72	8.65	9.91	10.90	11.83	12.70
Pelage	3.37	6.55	9.57	12.35	14.45	16.10	17.73	19.22

Tableau II-4: Les valeurs maximales des contraintes de, Von mises, cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour différentes charges.

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

- **Influence des conditions aux limites sur la distribution des contraintes**

Notre étude est basée sur les travaux effectués par plusieurs auteurs [6, 7, 8, 9, 10, 11]. Les configurations du joint son représentées dans la figure II-13. Les joints sont soumis à une charge de « $\sigma=15\text{MPa}$ » appliquée normalement à la section transversale du joint et fixe pour tous les modèles étudiés. Dans cette partie d'analyse on a pris comme référence un maillage de type " hexagonale structured " et nombre d'éléments de 28000 pour les deux plaques et de 32000 d'éléments pour l'adhésif.

1^{er} cas:

- Coté fixe, la face latérale, la face supérieure et la face inférieure de la plaque:

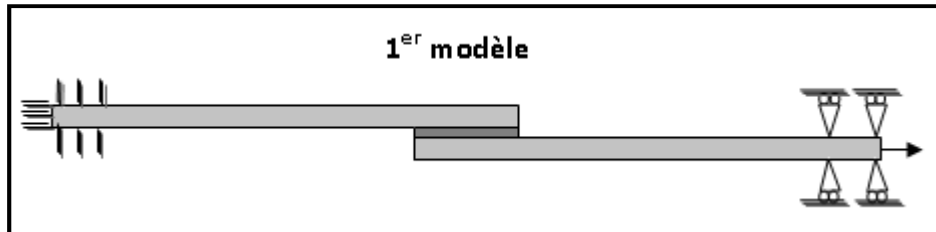
$$u_1 = u_2 = u_3 = 0.$$

$$R_1 = 0 ; R_2 = 0 ; R_3 = 0$$

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

- Côté mobile, la face supérieure et la face inférieure de la plaque:

$$u_1 = u_2 = 0; u_3 \neq 0;$$
$$R_1 \neq 0; R_2 \neq 0; R_3 \neq 0.$$



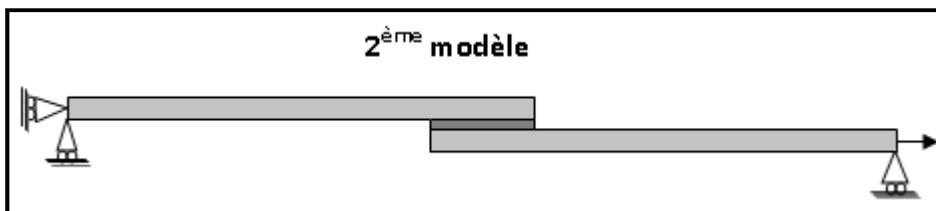
2^{eme} cas:

- Côté fixe, la face latérale et la face inférieure de la plaque:

$$u_1 = u_2 = 0; u_3 \neq 0;$$
$$R_1 \neq 0; R_2 \neq 0; R_3 \neq 0.$$

- Côté mobile, la face inférieure de la plaque:

$$u_1 = u_2 = 0; u_3 \neq 0;$$
$$R_1 \neq 0; R_2 \neq 0; R_3 \neq 0.$$



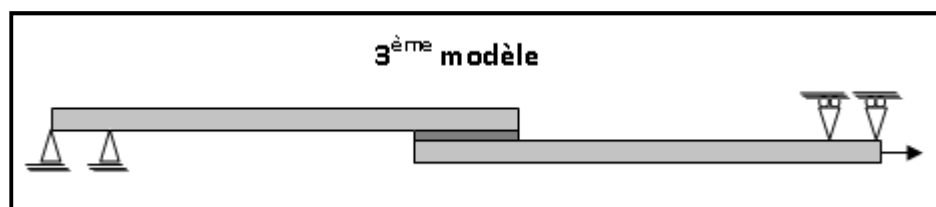
3^{eme} cas:

- Côté fixe, la face supérieure de la plaque:

$$u_1 = u_2 = u_3 = 0.$$
$$R_1 \neq 0; R_2 \neq 0; R_3 \neq 0$$

- Côté mobile, la face inférieure de la plaque:

$$u_1 = u_2 = 0; u_3 \neq 0;$$
$$R_1 \neq 0; R_2 \neq 0; R_3 \neq 0.$$



4^{eme} cas:

- Côté fixe, la face latérale et la face inférieure de la plaque:

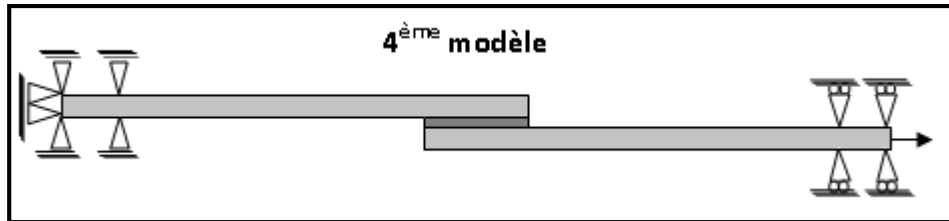
$$u_1 = u_2 = u_3 = 0.$$
$$R_1 \neq 0; R_2 \neq 0; R_3 \neq 0$$

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

- Coté mobile, la face supérieure et la face inférieure de la plaque:

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

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



5^{ème} cas:

- Coté fixe, la face supérieure et la face inférieure de la plaque:

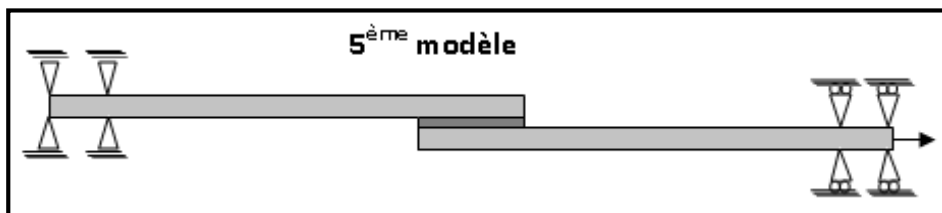
$$u_1 = u_2 = u_3 = 0.$$

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

- Coté mobile, la face supérieure et la face inférieure de la plaque:

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

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



6^{ème} cas:

- Coté fixe, la face latérale, de la plaque:

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

$$R_1 = 0; R_2 = 0; R_3 = 0$$

- Coté mobile, la face inférieure de la plaque:

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

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

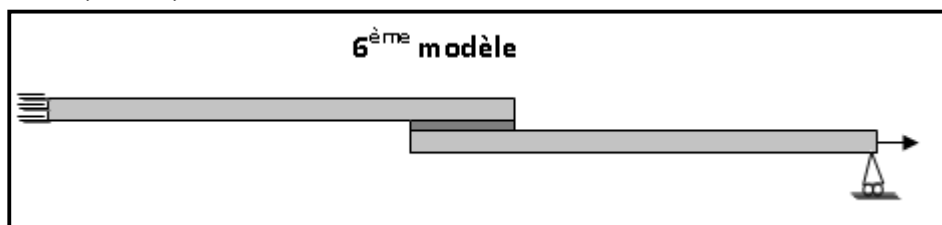


Figure II-16: Les configurations du joints avec les différentes conditions aux limites étudié [6, 7, 8, 9, 10, 11].

L'analyse des résultats de la distribution des contraintes dans le joint d'adhésif en fonction des différentes conditions aux limites est représentée dans la figure II-17.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

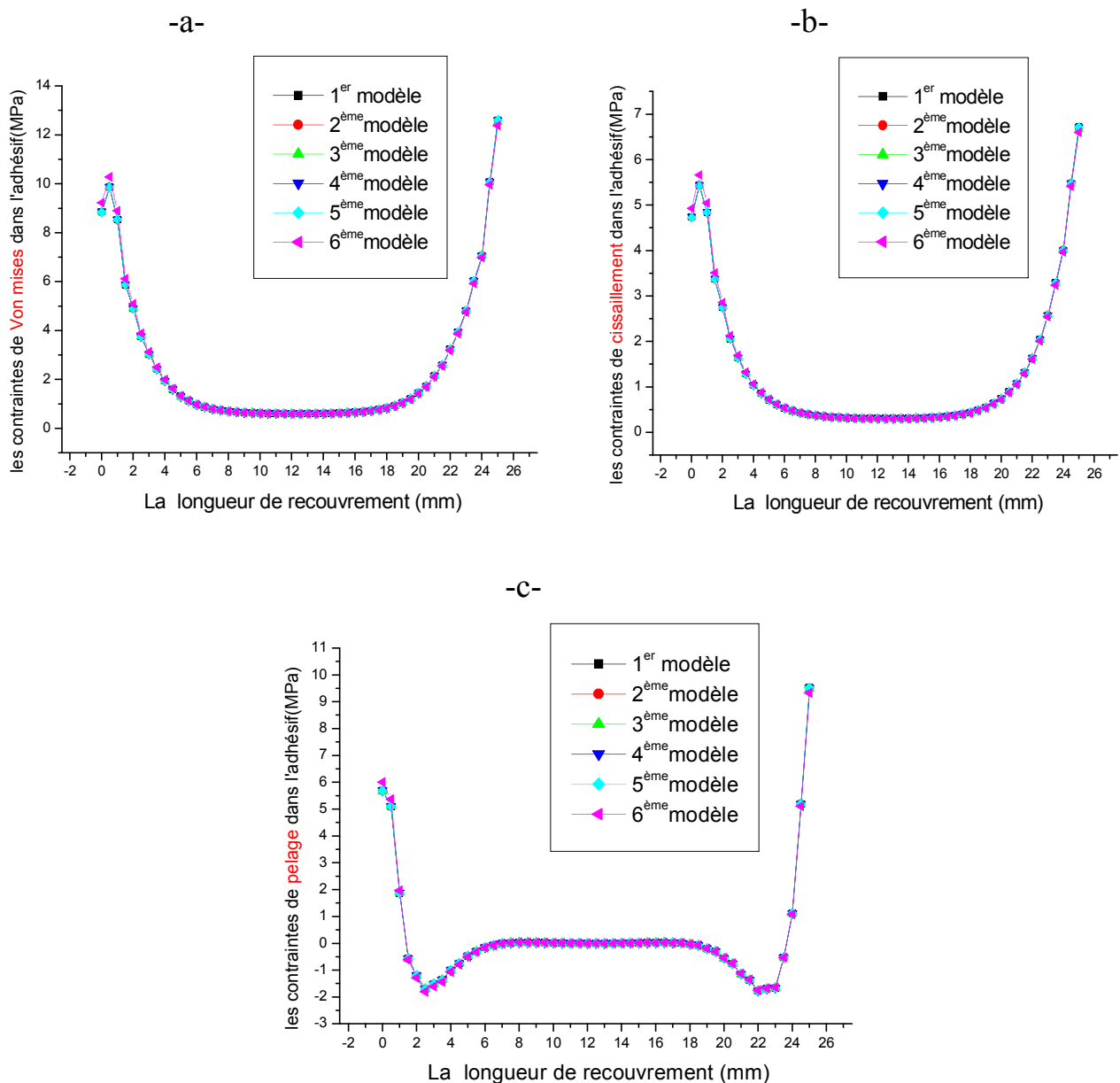


Figure II-17: Distribution des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage dans l'adhésif.

Les résultats de l'analyse numérique de l'effet des conditions aux limites sur la distribution des contraintes Von mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif sont représentés dans la figure II-17. On remarque clairement que la distribution des contraintes est presque identique quelque soit les conditions aux limites choisies, toujours on a des contraintes maximales au niveau des deux bords de l'adhésif est un cœur inactif.

Pour montrer clairement l'effet des différentes conditions aux limites sur les valeurs maximales des différentes contraintes on a présenté le tableau II-5, juste les valeurs

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

maximales des différentes contraintes. On remarque que les valeurs maximales des contraintes pour différents modèles sont presque identiques avec un pourcentage d'erreur entre 1% et 6%.

Les contraintes maximales	1 ^{er} modèle	2 ^{ème} modèle	3 ^{ème} modèle	4 ^{ème} modèle	5 ^{ème} modèle	6 ^{ème} modèle
Von Mises	12.60	12.55	12.53	12.59	12.60	12.38
Cisaillement	6.72	6.68	6.67	6.71	6.70	6.60
Pelage	9.52	9.49	9.47	9.51	9.50	9.32

Tableau II-5: Les valeurs maximales des contraintes de, Von mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour chaque modèle.

II-5.2. Optimisation des paramètres géométrique par les méthodes d'éléments finis (2D et 3D)

Le comportement des joints dépendent de la distribution des contraintes. Cette distribution des contraintes est influencée par la géométrie et les propriétés mécaniques de l'adhésif et des adhérents. Les paramètres les plus significatifs sont: la longueur de recouvrement, l'épaisseur d'adhérent, l'épaisseur de l'adhésif et le module de cisaillement de l'adhésif. Dans cette section nous examinons l'effet de divers paramètres sur la distribution des contraintes de cisaillement le long de la ligne centrale dans la couche d'adhésif pour l'assemblage à simple recouvrement.

- **Le modèle géométrique et le maillage du joint à simple recouvrement utilisé en (2D)**

Le modèle géométrique pour le joint à simple recouvrement utilisé dans l'analyse par éléments finis bidimensionnelle est effectué sur deux plaques minces en aluminium 2024-T3 avec l'adhésif époxyde Adegit structural A140. Les dimensions du modèle et les propriétés mécaniques sont les mêmes représentées dans le chapitre II. Le modèle et le maillage de joint utilisée dans notre étude est représenté dans la figure II-18.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

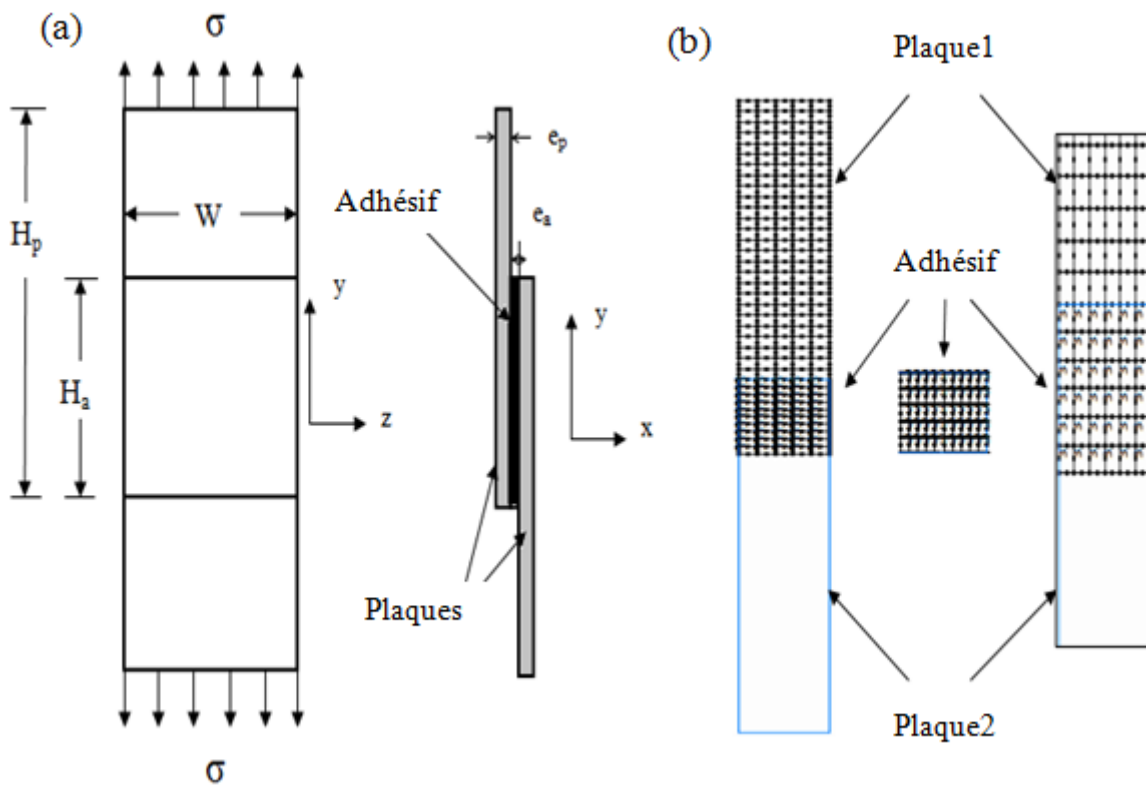


Figure II-18: Le modèle géométrique et le maillage de joint à simple recouvrement.

Le code de calcul utilisé dans notre étude est le FRANC2D/L (Fracture Analysis Code) à deux dimensions, développé par le groupe de recherche en mécanique de la rupture (CFG) à l'université Cornell aux Etats Unis d'Amérique sous la direction du professeur A.INGRAFFEA [12].

- **Influence de l'épaisseur de l'adhésif**

L'épaisseur de l'adhésif représente un paramètre géométrique important. Giraud a réalisé des essais sur les assemblages à simple recouvrement et montre que la rupture devient de plus en plus adhésive lorsque l'épaisseur de l'adhésive augmente. Halioui [13] a étudié expérimentalement l'influence de l'épaisseur adhésive sur la résistance du joint à simple recouvrement, et a montré qu'elle diminue lorsque l'épaisseur de l'adhésif augmente. Cinq valeurs différentes de l'épaisseur ont été choisies: 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, et 0.30 mm.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

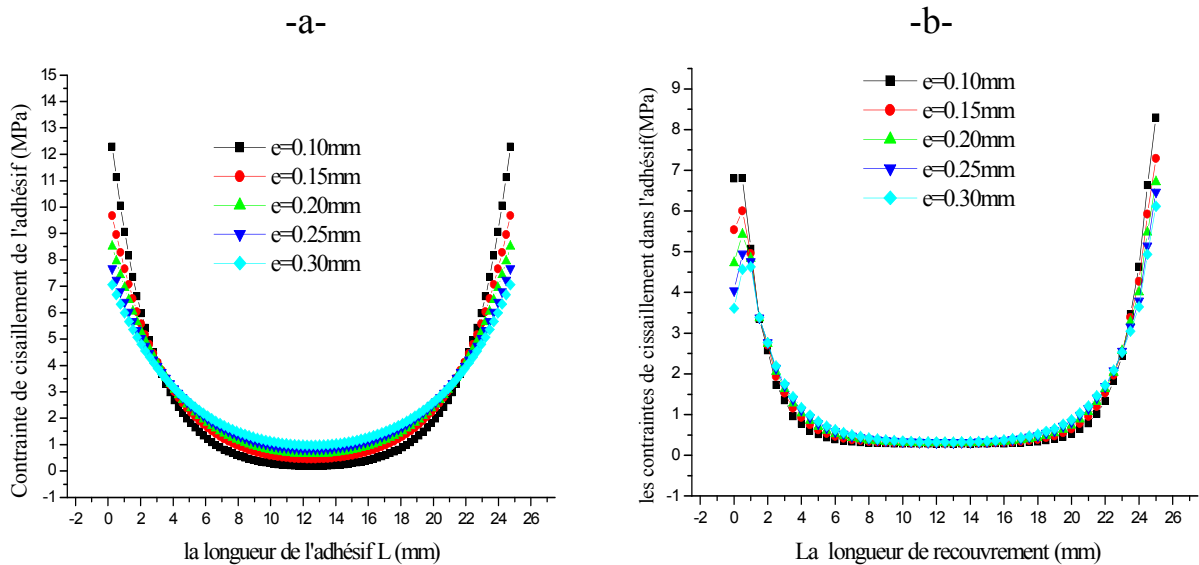


Figure II-19: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différentes épaisseurs a)- avec (2D), et b)- avec (3D), suivant la longueur de recouvrement.

La figure II-19 montre la distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif (τ_{zx}) pour différentes épaisseur de l'adhésif. Il peut noter qu'une augmentation de l'épaisseur de l'adhésif provoque une réduction des contraintes de cisaillement. Par conséquent, l'adhésion est meilleure lorsqu'on augmente l'épaisseur de l'adhésif. Les faibles l'épaisseur conduisent à une mauvaise adhérence. Il est préférable d'augmenter l'épaisseur de l'adhésif pour améliorer la résistance de l'adhésion mais si on augmente indéfiniment l'épaisseur, l'adhésif devient très résistant et se comporte comme un troisième matériel. En outre, la rupture devient de plus en plus adhésive.

Ce résultat mène à la conclusion que le choix de l'épaisseur de l'adhésif doit être optimisé. Beaucoup de recherche prouvé que l'influence de l'épaisseur de l'adhésif varie selon les matériaux assemblés et le passage par un optimum ne peut pas toujours être accentué. Généralement, on localise ceci épaisseur optimale entre 0.1 et 0.2 millimètre. Ces phénomènes ont été expliqués par Giraud [14].

En comparant entre les résultats numérique de l'étude en 2D et 3D, on remarque qu'il ya une légère différence dans les valeurs des contraintes cette différences est dû à ce que dans la modélisation en 2D il ya plusieurs hypothèse à prendre en considération:

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

- Chaque plaque considéré comme une plaque bidimensionnelle élastique linéaire individuelle dans un état de contrainte plane. La contrainte dans la plaque est uniforme à travers l'épaisseur.
- La couche de l'adhésif est homogène, élastique linéaire et isotrope.
- L'adhésif se déforme en cisaillement et que cette déformation est uniforme sur toute l'épaisseur de l'adhésif.
- La surface de cisaillement transmise par l'adhésif fait office de traction de surface sur les surfaces à coller.
- Les contraintes de cisaillement dans l'adhésif sont données par l'équation (II-6).

Par contre en 3D, l'analyse par éléments finis est fait en utilisant le code ABAQUS. Dans cette étude, nous faisons des hypothèses qui comprennent :

- Chaque couche est considérée comme une structure tridimensionnelle un individuelle dans un état de contrainte plane.
 - Les couches individuelles peuvent être reliées par des liaisons adhésives.
 - La couche de l'adhésif est homogène, élasto-plastique et isotrope
 - L'adhésif se déforme en cisaillement et en pelage.
 - L'adhésif est modélisée comme une troisième couche. Dans le modèle d'éléments finis les nœuds sont communs entre les couches et l'adhésif pour qu'il y ait une continuité de la déformation et de contrainte.
- **Influence de la longueur de l'adhésif**

Nous avons étudié l'effet du dimensionnement d'un assemblage collé sur la distribution des contraintes de cisaillement dans le joint à simple recouvrement. On a varié la longueur de recouvrement, et en gardant la même épaisseur de l'adhésif ($e=0.25\text{mm}$). Des valeurs différentes des longueurs de recouvrement, (20, 25, 30, 35, 40, 50, et 55 mm), ont été examinées.

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

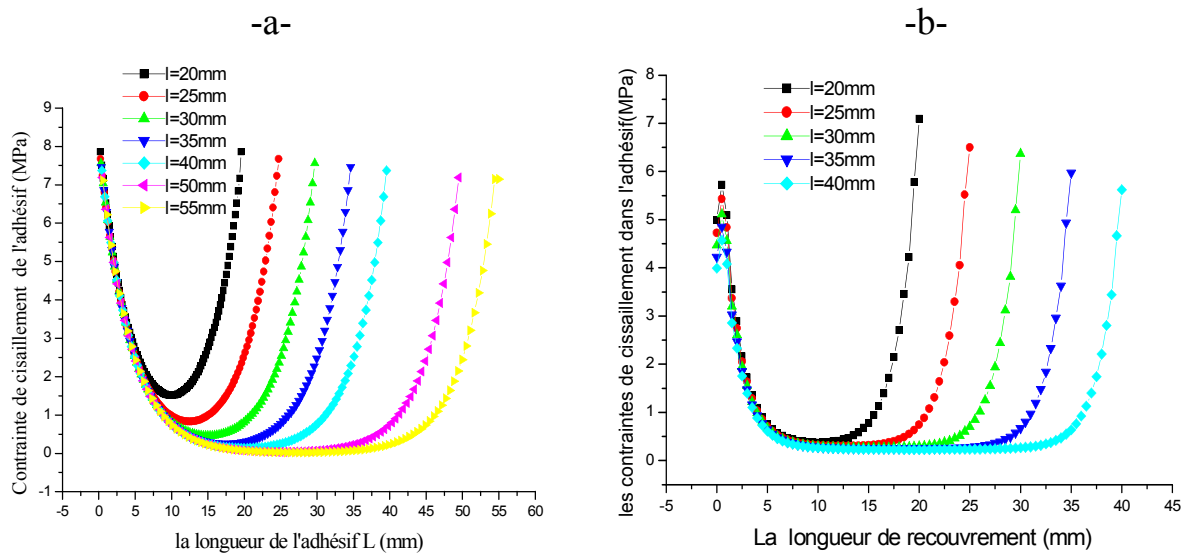


Figure II-20: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différentes longueurs de recouvrement a)- avec (2D), et b)- avec (3D).

La figure II-20 montre la distribution des contraintes de cisaillement d'adhésifs selon la longueur de recouvrement pour différentes valeurs. On peut noter que les contraintes de cisaillement diminuent si la longueur de recouvrement augmente. Nous avons vu que les contraintes de cisaillement se trouvent aux extrémités de la surface de recouvrement, lorsque la longueur augmente les contraintes se déplacent de plus vers l'extrémité chargée, conduisant à une surface de contact plus grand. Au milieu de la surface de recouvrement les contraintes de cisaillement tendent à une valeur nulle.

Lorsqu' il y a augmentation de la longueur de recouvrement (l'augmentation de surface de contact) ceci engendre une diminution de la contrainte moyenne et une augmentation de la charge de la rupture. Cependant Schmit et Fraisse [15] ont déterminé une longueur de recouvrement critique pour un assemblage métallique correspondant au passage d'une rupture par écoulement plastique à une rupture par fissuration de la jonction.

- **Influence de module de cisaillement de l'adhésif**

Dans cette section nous examinons l'effet de module de cisaillement (G) sur la distribution des contraintes de cisaillement, pour une longueur de recouvrement $L_r=25\text{mm}$. Des essais de traction effectués sur des adhésifs massique après chaque durée d'immersion trouvés par Mr K. MADANI, ont donné les courbes de contrainte-déformation de l'adhésif présentés sur la figure II-21. On détermine le module de cisaillement de l'adhésif pour les différentes durées

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

d'immersion (Tableau II-6). Et à partir des courbes de traction pour les différentes durées d'immersion, on pourra déterminer le module d'Young de l'adhésif dégradé, en appliquant la relation suivantes:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{II-8})$$

Module d'Young E (Mpa)	2680	1450	1000	750	625	500
Module de cisaillement G	1030.77	557.70	384.61	288.46	240.38	192.31
Taux d'absorption $\Delta M/M_0$	0.000	0.010	0.0125	0.0175	0.020	0.040

Tableau II-6 : Les différents Propriété mécanique utilisés dans les calculs.

Les résultats obtenus du module de cisaillement ont été introduit dans le code de calcul Franc 2D/L pour déterminer l'influence de module de cisaillement sur la distribution des contraintes de cisaillement dans le joint d'adhésif (Figure II-21).

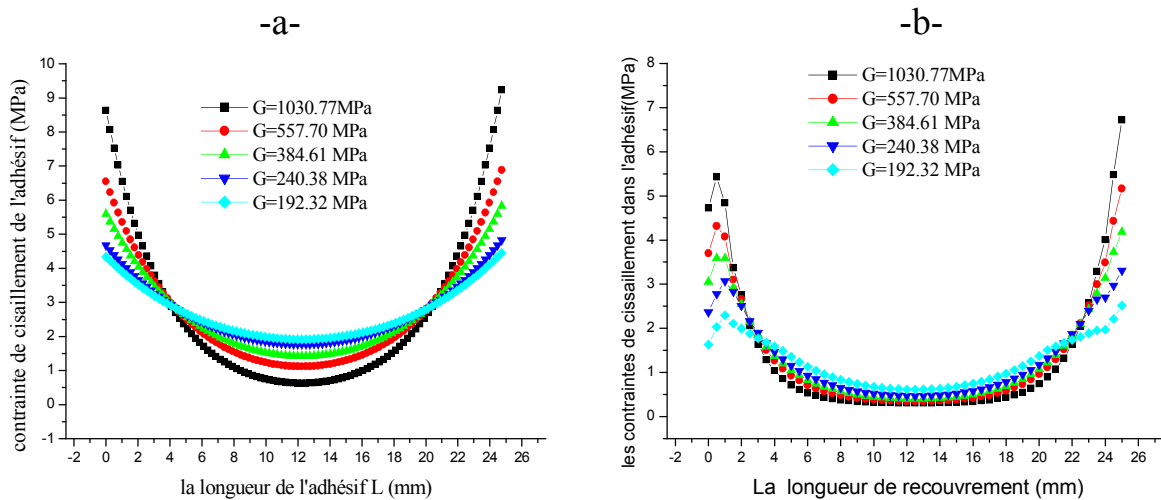


Figure II-21: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différents module de cisaillement (G), a)- avec (2D), et b)- avec (3D), pour une longueur de l'adhésive $L_r=25mm$.

Nous avons étudié la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche d'adhésive, sur une ligne horizontale, pour différents module de cisaillement (G). Nous remarquons qu'un adhésif ayant un module élevé conduit à des contraintes de cisaillement trop importantes. Autrement dit un adhésif est moins résistant s'il présente un module de cisaillement élevé. Les recherches actuelles tentent d'améliorer cette propriété qui est une caractéristique essentielle de la résistance de l'adhésif. D'une part le vieillissement de

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

l'adhésif provoque une dégradation de son module de cisaillement ce qui donne par la suite une bonne résistance au cisaillement par contre une mauvaise résistance au pelage .

II- 6. Conclusion

Le choix d'un modèle spécifique tient compte de trois critères, la bonne description de l'état de contrainte et du comportement global, la facilité à modifier les paramètres géométriques d'une simulation à l'autre et enfin le temps de calcul. A cet effet, on a procédé à des simulations numériques par la méthode des éléments finis à l'aide des codes de calcul Abaqus et Franc2d/l. Les effets des paramètres géométriques des éléments d'assemblage ont été mis en évidence. A travers les études numériques nous avons pu comprendre plus clairement le fonctionnement mécanique où transfert des efforts à travers le joint à simple recouvrement et par suite de mettre en exergue les paramètres fondamentaux essentiels aux différentes analyses notamment les contraintes équivalentes, de pelage et de cisaillement.

- L'optimisation des joints collés est obtenue en variant les dimensions du joint tel que la variation de différents types de maillage, le nombre des éléments utilisés, les conditions aux limites, le chargement, l'épaisseur de l'adhésif, la longueur de recouvrement et le module de cisaillement.
- Le maillage constitue aussi un facteur déterminant sur la précision des résultats. A cet effet le nombre de mailles minimal préconisé pour l'épaisseur de l'adhésif est de trois.
- Concernant les bords du joint, ils doivent comporter un maillage nettement plus fin par rapport aux autres endroits car les contraintes maximales se situent exclusivement aux extrémités de la longueur de recouvrement.
- L'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif comporte une réduction de contrainte de cisaillement, mais le choix de cette épaisseur doit être optimisé afin d'éviter l'émergence d'un troisième matériau de faibles propriétés mécaniques;
- L'augmentation de la longueur de recouvrement mène à une diminution des contraintes de cisaillement de l'adhésif;
- Si la longueur devient significative, les valeurs des contraintes de cisaillement tendent vers zéro vers le cœur de l'adhésif, seulement les bords de l'adhésif qui subissent la charge appliquée;
- L'analyse des dimensions de la longueur de recouvrement et l'épaisseur des adhésifs constituent les principaux paramètres à modifier pour optimiser la géométrie de

Chapitre II : Optimisation du joint à simple recouvrement

l'assemblage c'est-à-dire une augmentation de la résistance du joint accompagné d'un choix économique.

II-7. Références

- [1]. Thèse Félix TSOUNGUI. Caractérisation Mécanique Et Microstructurale Des Joints Brasés D'alliages Aéronautiques Avec Du Bni-2 Comme Métal D'apport. Montréal, Le 6 Mai 2010.
- [2]. Mémoire, Modélisation du comportement à la fatigue d'une roue de train ferroviaire, Université MENTOURI Constantine, Série : /GM/2010.
- [3]. G. R. Liu, S. S. Quek, La méthode d'élément fini : Un cours pratique, Département de la construction mécanique, université nationale de Singapour ISBN : 0 7506 5866 5 (2003).
- [4]. Félix. Tsoungui, Caractérisation Mécanique Et Microstructurale Des Joints Brasés D'alliages Aéronautiques Avec Du Bni-2 Comme Métal D'apport. MONTREAL, LE 6 MAI 2010.
- [5]. Eric Paroissien, Thèse contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés), application aux jonctions aéronautiques université Toulouse III – Paul Sabatier (2006).
- [6]. G. Fessel, J.G. Broughton, N.A. Fellows, J.F. Durodola, A.R. Hutchinson. Evaluation of different lap-shear joint geometries for automotive applications. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 27 (2007) 574–583
- [7]. E. Oterkus, A. Barut, E. Madenci, S.S. Smeltzer III, D.R. Ambur. Bonded lap joints of composite laminates with tapered edges. *International Journal of Solids and Structures* 43 (2006) 1459–1489
- [8]. M. Imanaka, K. Ishii, H. Nakayama. Evaluation of fatigue strength of adhesively bonded single and single step double lap joints based on stress singularity parameters. *Engineering Fracture Mechanics* 62 (1999) 409–424
- [9]. J.P.M. Gonçalves, M.F.S.F. de Moura*, P.M.S.T. de Castro. A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 22 (2002) 357–365
- [10]. P.N.B. Reis, F.J.V. Antunes, J.A.M. Ferreira. Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints. *Composite Structures* 67 (2005) 125–133.
- [11]. Xiacong He. Influence of boundary conditions on stress distributions in a single-lap adhesively bonded joint. *International Journal of Adhesion & Adhesives*.
- [12]. Swenson D, James M. (1998), FRANC2D/L: Un simulateur de propagation des fissures pour les structures planes. Le guide de l'utilisateur de la version 1.4.
- [13]. A. Roy. "Comportement mécanique en sollicitation monotone et cyclique d'assemblage collés composite/composite et composite/acier", Thèse, Université de Poitiers. (1994).
- [14]. K. Madani, S. Touzain, X. Feugas, A. Roy et S. Cohendoz. Analyse de l'effet d'entaille sur la distribution des contraintes dans la couche adhésive entre deux plaques en aluminium 2024-T3.
- [15]. F. Schmit et P. Fraisse, Analyse par la mécanique de rupture de la tenue des jonctions collés. *Matériaux et techniques*, 1992, pp.55-59.

Chapitre III



Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

III-1. Introduction

Bien que les joints collés soient des moyens primaires de transfert la charge dans la construction des structures aérospatiales et marines, ils sont des emplacements d'échec potentiel dû à la présence des discontinuités géométriques et matérielles qui causent des concentrations de contrainte élevées. Par conséquent, la réduction de contrainte de cisaillement et les contrainte normales le long des bords de l'adhésif dans les joints collés est importante [1].

Différents défauts sont susceptibles d'être créés au niveau des différentes zones de l'assemblage. La présence de porosités au sein du joint résulte du départ de produits volatils et l'existence de bulles d'air au cours de la réticulation. La mise sous pression de l'adhésif au cours du cycle de cuisson est censée réduire ce phénomène. La concentration, en une région donnée, de porosités peut conduire à la création de trous ou cavités. Ces trous peuvent aussi s'expliquer par une quantité insuffisante d'adhésif. Si elles sont localisées à l'interface, les cavités créent des interfaces non liées qui peuvent aussi s'expliquer par une mauvaise préparation de surface du substrat. Les fissures au sein de l'adhésif sont dues à l'action de contraintes thermiques au cours de la réticulation. Enfin, les zones de mauvaise réticulation peuvent s'expliquer soit par un temps de réticulation insuffisant, soit par une composition inhomogène de l'adhésif (Figure III-1) [2].

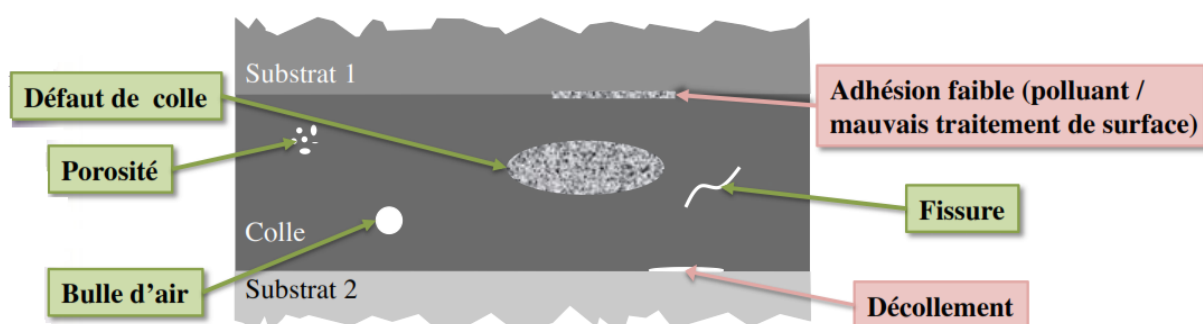


Figure III-1: Type de défauts / dommages cohésifs ou adhésifs

Typiquement, trois modes des défauts des joints adhésifs collés existent:

- Défaut cohésif : Un échec cohésif est caractérisé par l'échec de l'adhésif lui-même.

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

- Défaut adhésif : Un échec adhésif est caractérisé par un échec du joint à l'interface d'adhésif/adhérent. Ceci est typiquement provoqué par la préparation extérieure insatisfaisante, chimiquement et/ou mécaniquement.
- Défaut d'adhérent: Un échec d'adhérent se produit quand l'adhérent échoue au lieu de l'adhésif. En métaux, ceci se produit quand l'adhérent rapporte. Dans les composites, le stratifié échoue typiquement par l'échec interlaminaire, c.-à-d, la matrice entre des échouer de plis. Un échec de substrat indique que l'adhésif est plus fort que l'adhérent (Figure III-2) [3].

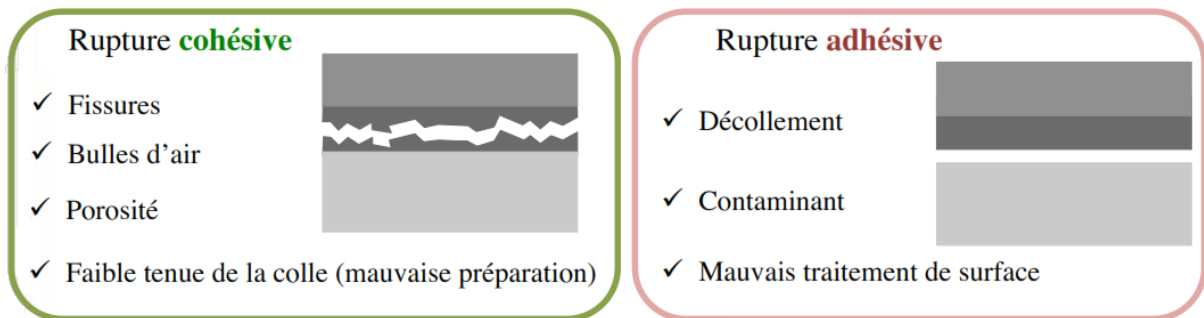


Figure III-2: Les modes des défauts (cohésif et adhésif).

III-2. Les méthodes des contrôles non destructifs

Les contrôles non destructifs sont utilisés la plupart de temps pour vérifier la qualité du collage. Avec ce type de contrôles il est possible de détecter des défauts de collage, comme des fissures et des bulles, ou bien la présence d'un corps étranger dans la couche de colle.

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

Le secteur aéronautique reste l'utilisateur le plus important. Toutes les techniques sont employées à un stade ou à un autre, suivant le degré de criticité des composants. Concernant

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

les défauts de collage tels que l'absence de colle, des défauts d'adhésion ou une fissuration de la colle au sein de joints de recouvrements. Plusieurs modes de sollicitation permettent d'adapter la méthode choisie en fonction du type de défaut à déceler et du matériau à contrôler:

III-2. 1. Sollicitation quasi-statique

- **Contraintes mécanique statiques**

La pièce est placée dans un montage qui permet d'appliquer une sollicitation réglable. On enregistre une image de référence. En appliquant la contrainte, on visualise la déformée de la pièce en temps réel sur un écran. Une fissuration ou un défaut se traduit par un accident dans le réseau de franges observé au droit du défaut (rupture de pente, accumulation de franges).

- **Contraintes thermiques**

Elles s'appliquent à des structures de type sandwich, composées de plusieurs types de matériaux ayant des coefficients de dilatation différents. On enregistre une image de référence sur la pièce préalablement chauffée de quelques degrés. Lors du refroidissement de la pièce, on localise facilement les défauts éventuels en visualisant la déformation de la pièce en temps réel.

- **Dépression**

La pièce est placée dans une chambre à dépression munie d'un hublot d'observation. On enregistre une vue de référence de l'objet à une pression donnée. On visualise la déformée de la pièce en temps réel en appliquant une légère dépression. Un défaut apparaît sous la forme de franges concentriques (déformation superficielle de la pièce). Cette technique est particulièrement bien adaptée à la détection de défauts de collage dans les composites.

- **Radiographie**

Le contrôle par radiographie consiste à utiliser de rayons X permet de mettre en évidence les zones présentant des manques de colle. On applique aussi cette méthode pour la détection de très petits défauts cohésifs et de décollements, mais cette technique est coûteuse (matériel, local sécurisé), et le rayonnement dangereux pour la santé.

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

III-2. 2. Sollicitation dynamique :

- **Vibrations**

La méthode consiste à comparer un ou plusieurs modes propres d'une pièce de référence (pièce sans défauts) à ceux d'une pièce à contrôler. La présence de défauts de fabrication ou résultants de l'usure modifie l'allure de ces modes. Dans certains cas, l'interprétation se fait immédiatement, sans pièce de référence.

- **Chocs**

Cette méthode est bien adaptée à des contrôles sur site car facile d'utilisation. On applique sur la pièce un choc de faible amplitude qui génère un spectre de vibration sur celle-ci. Une double prise de vue permet de visualiser des modes de vibrations particuliers dus à la présence de défauts. Sur matériaux composites, ces derniers sont aisément détectés par cette technique.

- **Ultrasons**

Concernant les contrôles par ultrasons, une nouvelle technique à couplage d'air permet le contrôle sans le recours habituel aux liquides ou aux gels de couplage entre le transducteur d'ultrasons et l'éprouvette. La figure III-3, compare les balayages d'un joint à recouvrement collé en aluminium au moyen de transducteurs plongeurs classiques (c.à.d. couplés à l'éprouvette par l'intermédiaire de l'eau) à celui obtenu au moyen de transducteurs à condensateurs micro-usinés couplés dans l'air. Cette méthode est basée sur l'interférence causée par les défauts de collage au passage d'une onde envoyée. Dans les essais d'ultrasons, par exemple, toute discontinuité de la matière est une source de réflexion. Une inclusion ou une fissure va donc produire une perturbation du signal lors du passage de l'onde ultrasonique.

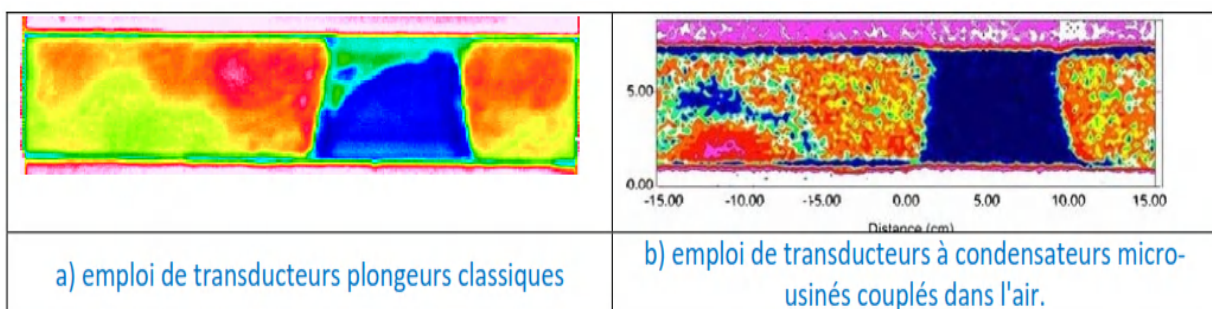


Figure III-3: Balayage aux ultrasons d'un joint à recouvrement collé en aluminium.

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

III-3. Modélisation par la méthode des éléments finis bidimensionnels (2D)

Le comportement des joints dépend de la distribution des contraintes. Cette distribution des contraintes est influencée par la géométrie et les propriétés mécaniques de l'adhésif. Dans cette partie nous avons étudié l'influence de la présence des défauts dans l'adhésif pour un joints à simple recouvrement sur la distribution des contraintes de cisaillement le long de la ligne centrale de la couche d'adhésif, par la méthode d'élément fini bidimensionnelle avec le code de calcul est FRANC2D/L. la géométrie de modèle utilisé, dimensions, conditions aux limites, et le maillage sont les mêmes du chapitre II (Figure III-4).

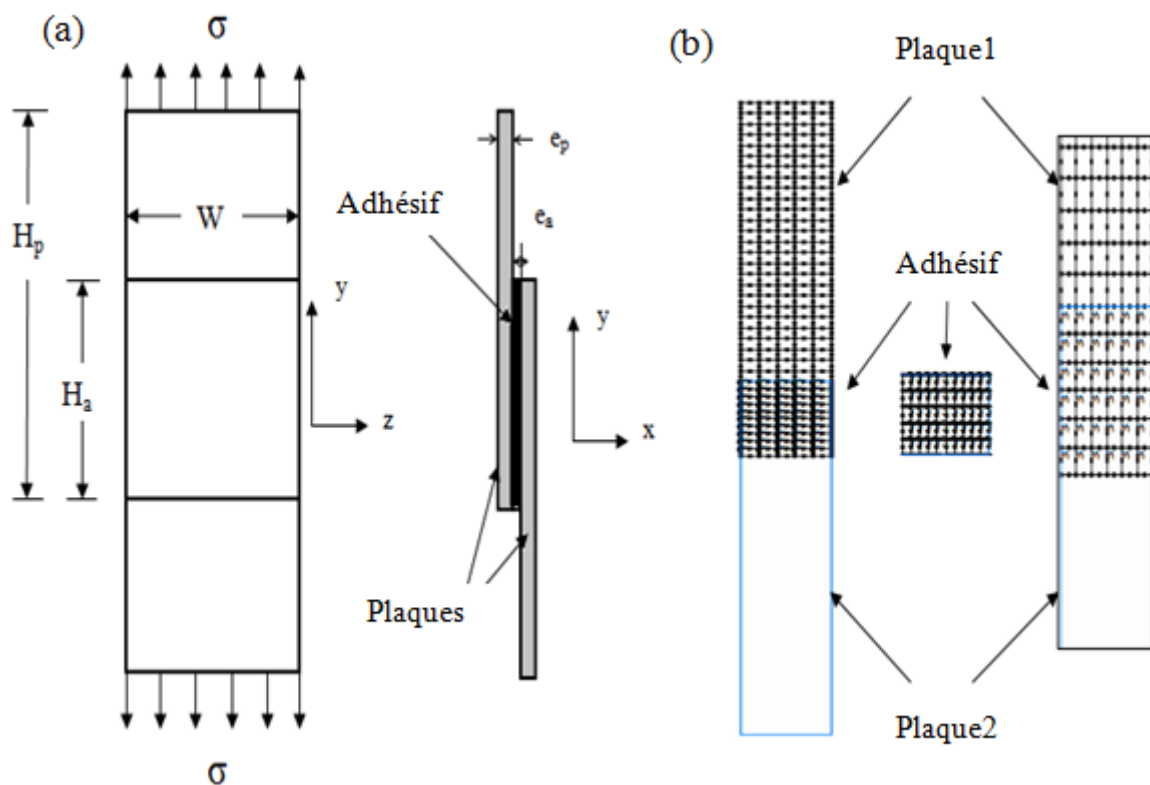


Figure III-4: Le modèle géométrique et le maillage de joint à simple recouvrement.

- **Influence de la présence des défauts dans l'adhésif sur la distribution des contraintes de cisaillement**

Pour examiner l'effet de nombre et de position des défauts dans l'adhésif sur la distribution des contraintes de cisaillement pour différents paramètres telle que l'épaisseur de l'adhésif, la longueur de recouvrement et le module de cisaillement de l'adhésif, plusieurs modèles de

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

l'adhésif avec différents nombres et de positions ont été choisies, (Figure III-5). Les résultats sont montrés clairement dans les figures suivantes.

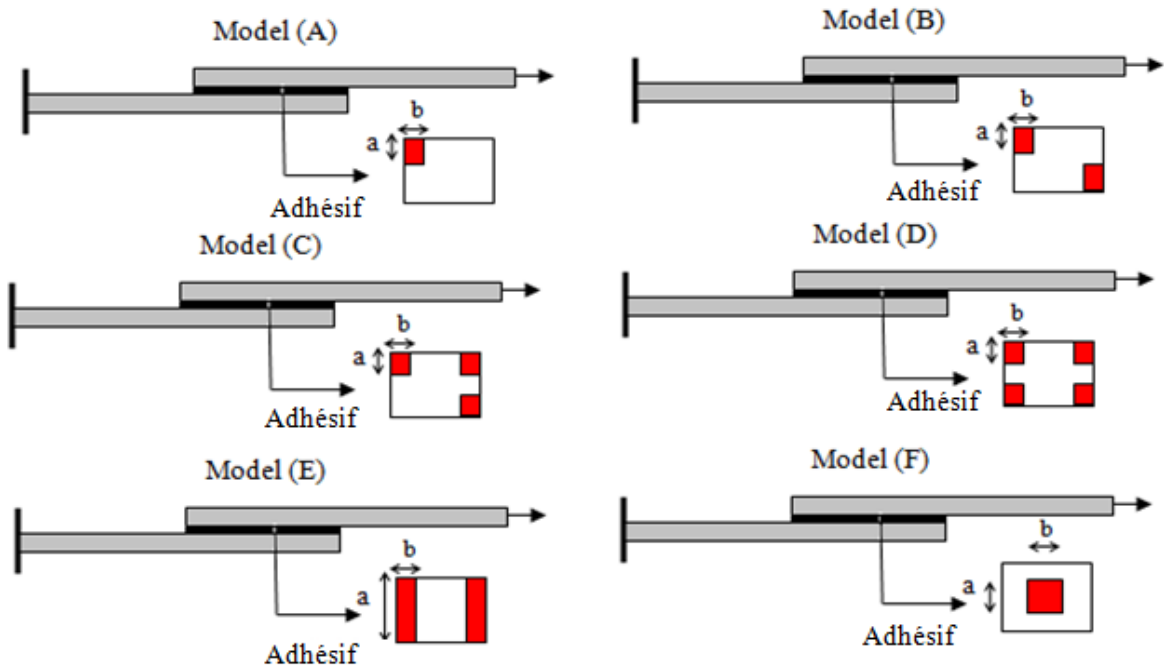


Figure III-5: Les modèles géométriques des joints adhésifs collés à simple recouvrement avec les défauts.

Modèles	A	B	C	D	E	F
	Un défaut	Deux défauts	Trois défauts	Quatre défauts	Défauts latérales	Défauts centrales
a (mm)	5	5	5	5	25	15
b (mm)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	10

Tableau III-1: Dimensions détaillées des défauts.

III-4. Analyse et résultats

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

III-4. 1. Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur la distribution des contraintes

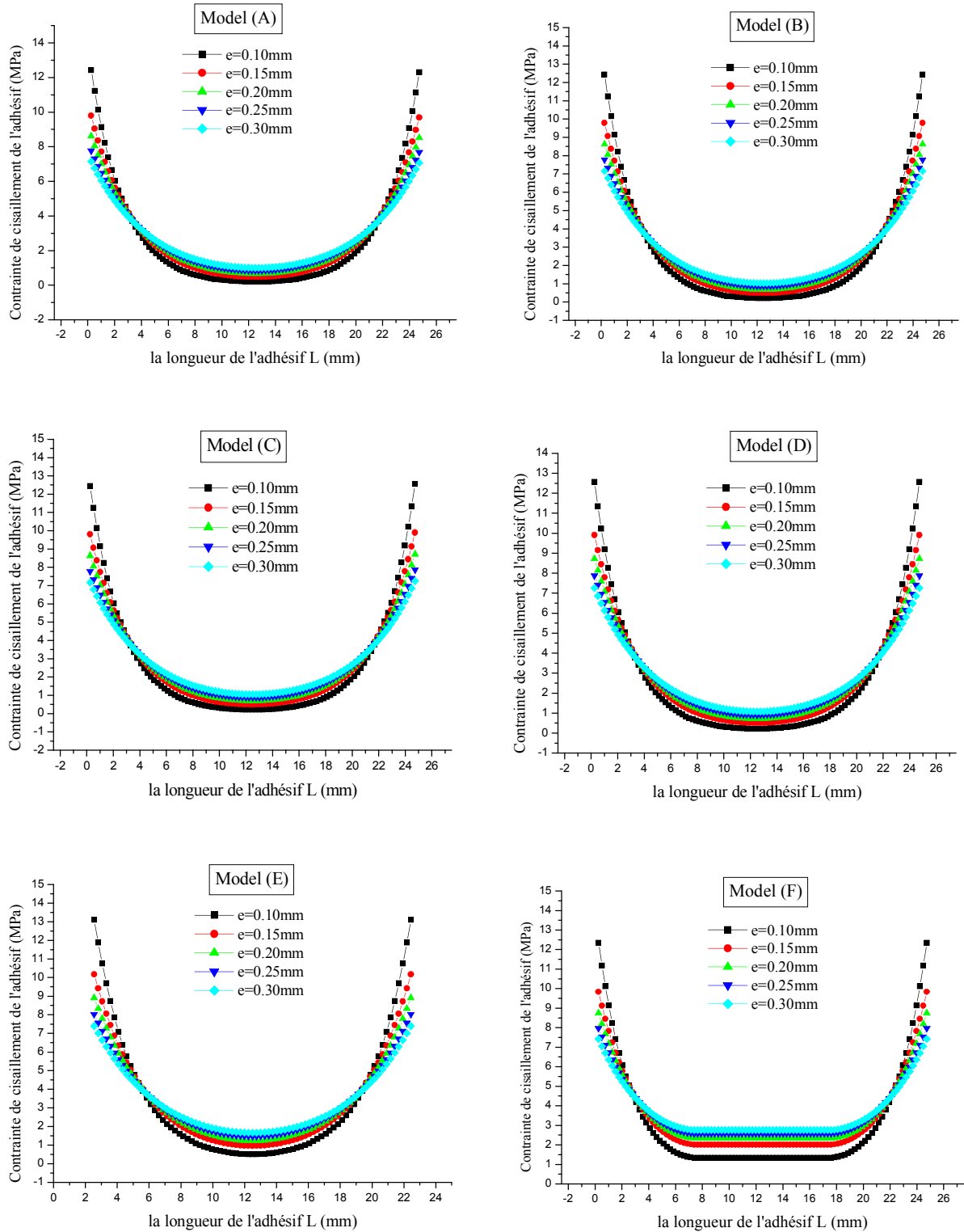


Figure III-6: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différentes épaisseurs suivant longueurs de recouvrement.

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

III-4. 2. Influence de la longueur de l'adhésif sur la distribution des contraintes

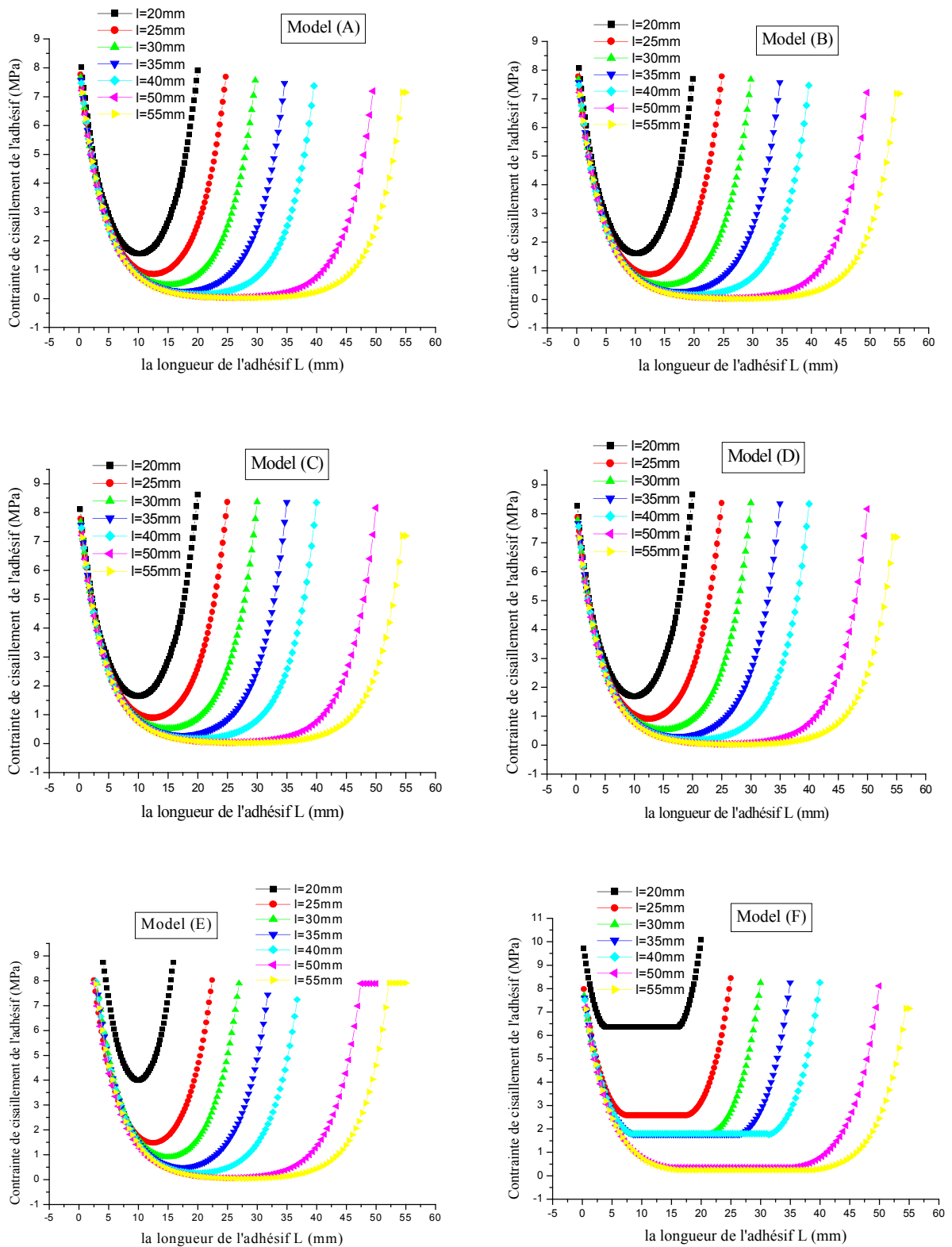


Figure III-7: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différentes longueurs de recouvrement.

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

III-4. 3. Influence de la longueur et l'épaisseur de l'adhésif sur la distribution des contraintes

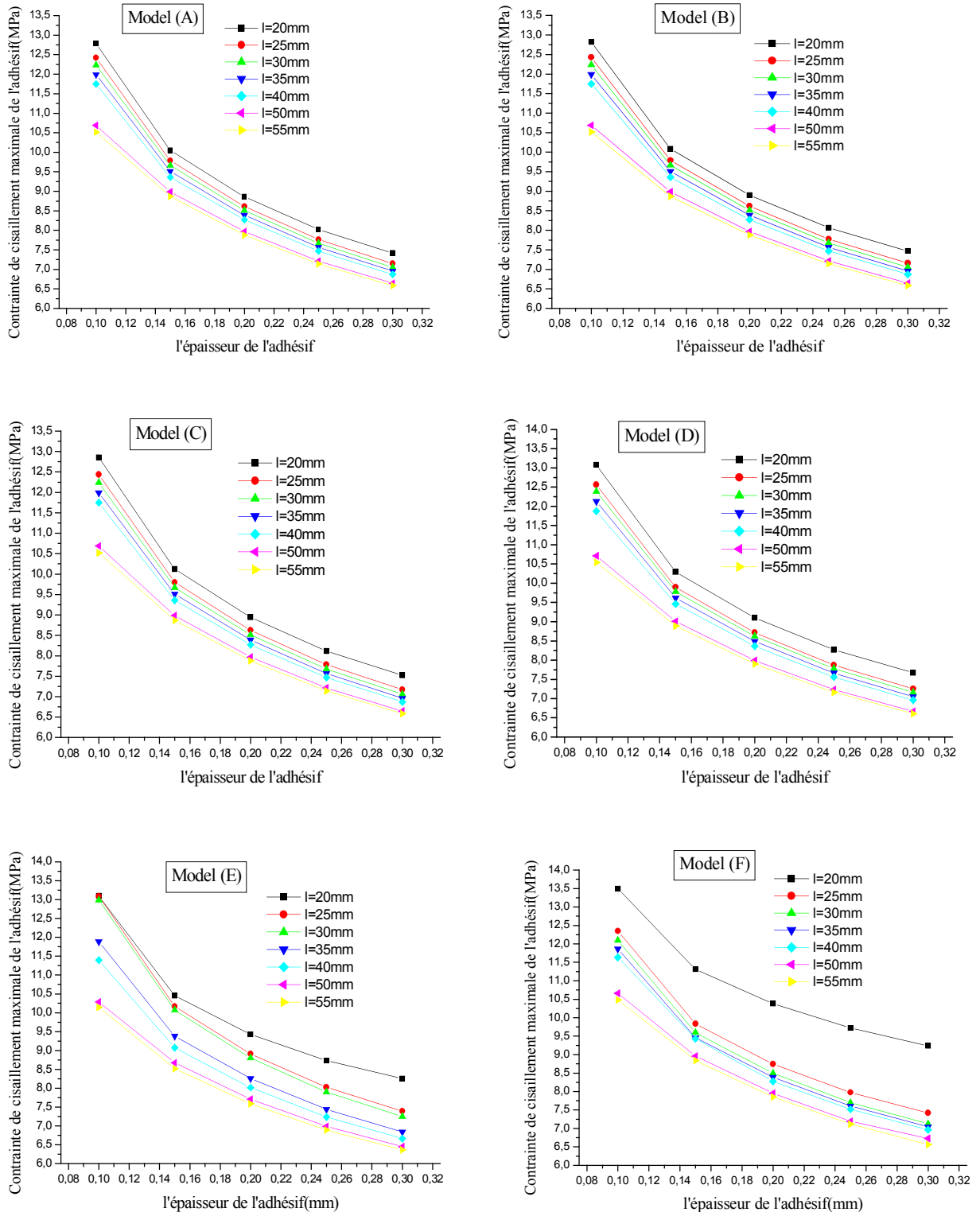


Figure III-8: Distribution des contraintes de cisaillement maximale de l'adhésif pour différentes longueurs de recouvrement et différentes épaisseurs d'adhésif.

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

III-4. 4. Influence de module de cisaillement de l'adhésif sur la distribution des contraintes

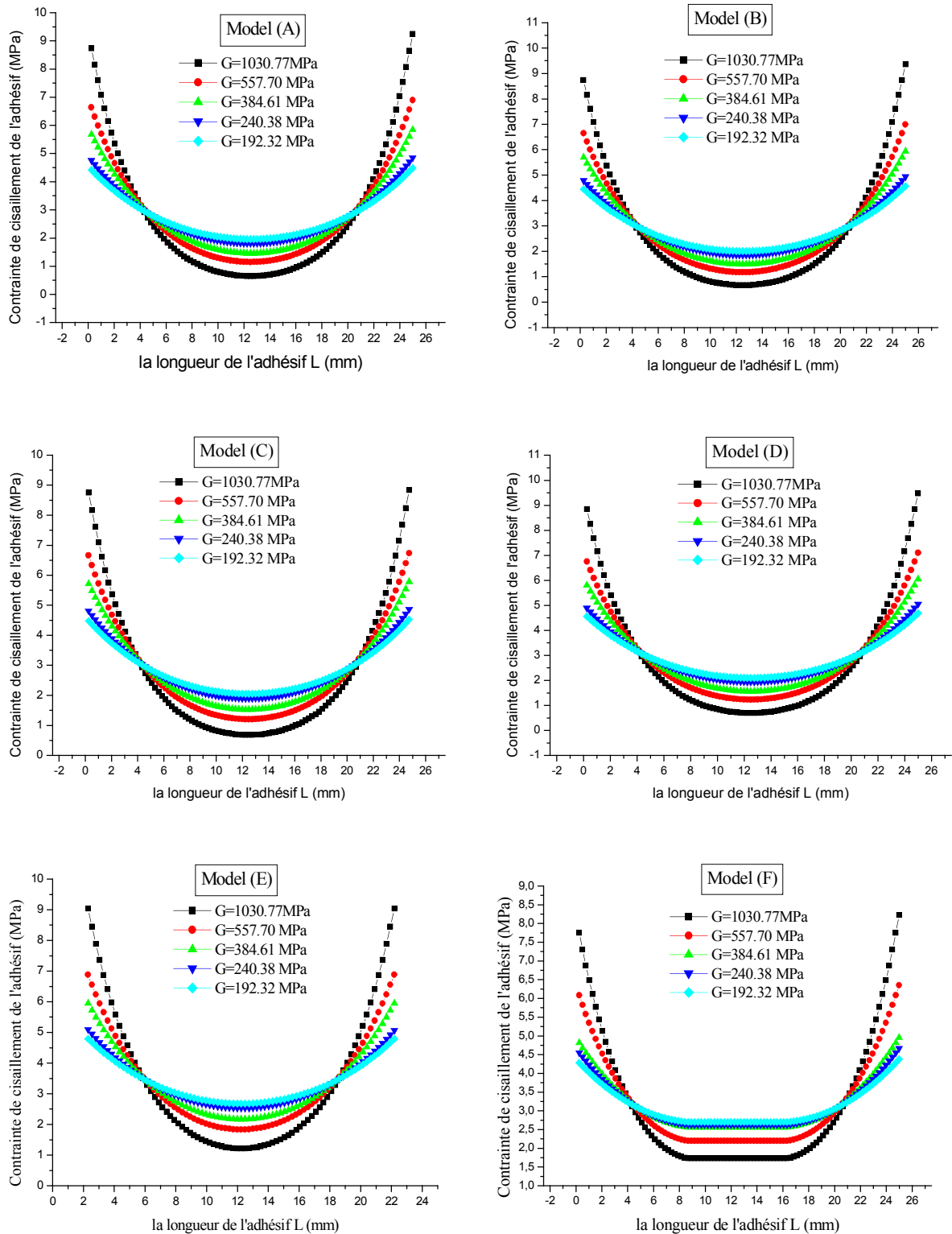


Figure III-9: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésif pour différentes module de cisaillement (G).

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

En présence du défaut de collage (figures III-7, III-8, III-9), la distribution de contraintes est pratiquement la même que pour le cas sans défauts. Tant que la taille du défaut est moins importante devant la longueur de l'adhésif, la valeur de la contrainte est constante.

Si le défaut se trouve loin du bord de l'adhésif, il ne présente aucun effet sur la valeur de la contrainte à un point où on peut même éliminer une grande partie de l'adhésif de la zone centrale puisque dans la plupart des cas dans les assemblages collés seuls les bords de l'adhésif résistent au chargement, alors que le cœur reste inactif.

Il faut noter aussi que l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif minimise l'effet de la présence du défaut, il faut éviter de prendre un adhésif plus épais, dans ce cas l'adhésif se comporte comme étant un matériau rigide et dans ce cas le défaut devient comme une entaille. La longueur de recouvrement peut aussi minimiser l'effet du défaut sur la distribution des contraintes, pour des longueurs de recouvrement minimales le défaut peut influencer sur la valeur de la contrainte à un point où le cœur d'adhésif devient actif. Pour des longueurs importantes l'influence de la présence du défaut est pratiquement négligeable sauf pour des défauts importants.

III-4. 5. Comparaison de la distribution des contraintes de cisaillement maximales de l'adhésif pour la longueur de recouvrement $L_r=25\text{mm}$ avec et sans défaut.

Pour voir clairement et comparer facilement les résultats de l'influence des différents paramètres sur la distribution des contraintes de cisaillement on a tracé les figures III-10.

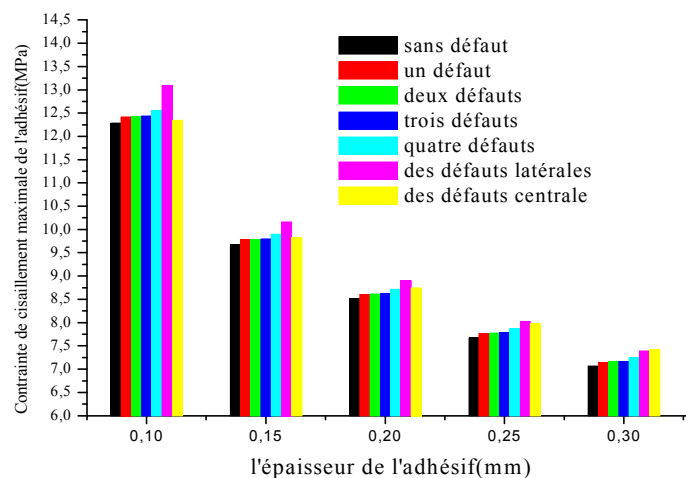


Figure III-10: Distribution des contraintes de cisaillement maximales de l'adhésif pour différentes épaisseurs de l'adhésif avec et sans défaut.

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

A partir de cette figure III-10, on remarque que la présence de défaut provoque une augmentation des contraintes de cisaillement maximales c'est-à-dire que les contraintes soient plus hautes pour les divers cas de défaut et sont situés sur les extrémités de la région de collage, et la zone centrale de l'adhésif toujours avec des valeurs moins que ceux situés sur les extrémités, car la concentration de contrainte élevée se produit sur les bords libres de la région de fixation par collage.

III-4. 6. Comparaison de la distribution des contraintes de cisaillement maximale de l'adhésif pour une épaisseur $e=0.25\text{mm}$ avec et sans défaut.

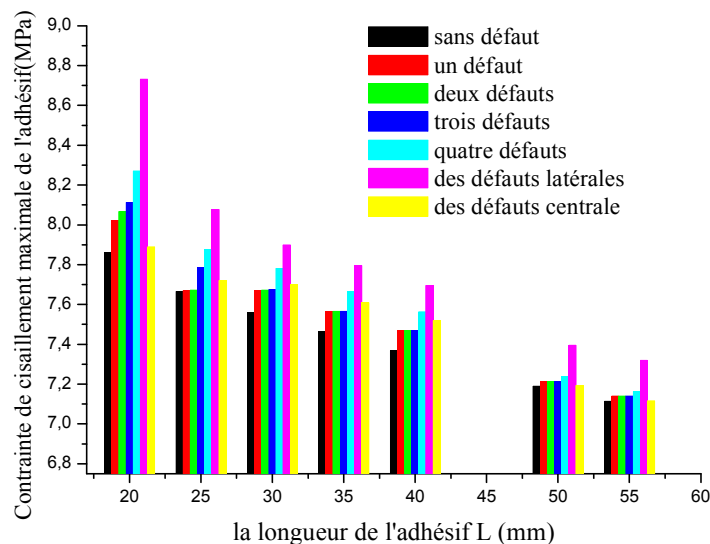


Figure III-11: Distribution des contraintes de cisaillement maximales de l'adhésif pour différentes longueurs de recouvrement avec et sans défaut.

En comparant l'effet de la longueur de recouvrement pour différents modèles avec et sans défaut, on peut voir que les modèles ou la position de défaut dans le coin du recouvrement les contraintes sont plus élevée par rapport les autres modèles ou la position de défaut aux milieux, il y a seulement petit différence avec un modèle sans défaut, En conséquence, les contraintes de cisaillement maximum se produisent encore à l'extrémité du recourbement et atteignent des valeurs maximales à l'extrémité également de la zone de défaut. Cette position aux extrémités du recouvrement reste inchangée quand les paramètres varient c.-à-d., pour la longueur et l'épaisseur de l'adhésif différentes à la présence des zones de défaut.

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

III-5. Modélisation par la méthode des éléments finis tridimensionnels (3D)

Dans cette section les premiers calculs par éléments finis (EF) ont été réalisés en 2D avec la présence des défauts dans l'adhésif de formes très simples (rectangulaire et carré) et pour des comportements purement élastiques. Pour l'amélioration des formes des défauts dans l'adhésif, on utilise la modélisation en 3D, ils ont également modélisé des défauts des formes plus complexes (elliptiques et circulaires) dans l'adhésif, toujours avec les conditions décrites précédemment. Donc nous examinons l'effet de la présence des défauts dans l'adhésif sur la distribution des contraintes de Von Mises, de cisaillement, et de pelage. Le modèle géométrique pour le joint adhésif à simple recouvrement utilisé dans l'analyse par éléments finis est le même du chapitre II, (mêmes dimension, mêmes propriétés). Pour l'adhésif on a chois six modèles de l'adhésif avec des défauts pour examiner l'effet du défaut sur la distribution des contraintes de Von Mises, de cisaillement, et de pelage. Les modèles son représentés dans la figure III-12.

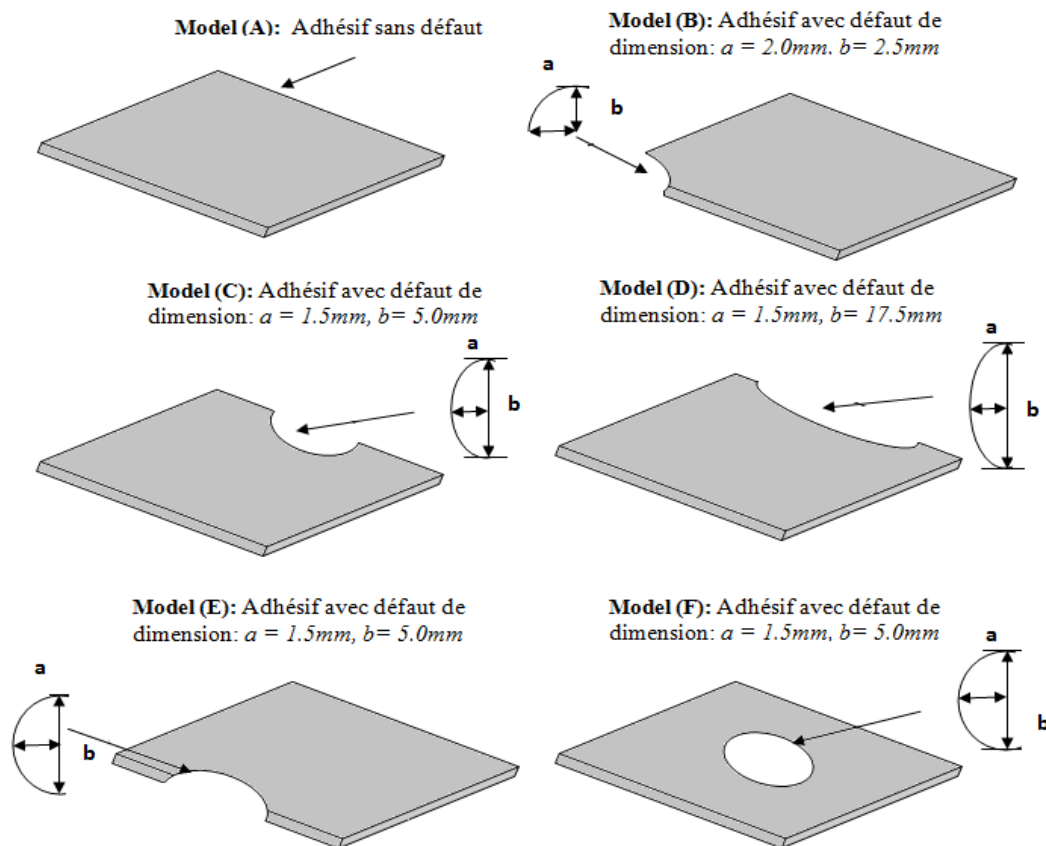


Figure III-12: Les différentes modèles géométriques de l'élément adhésif avec les dimensions des défauts.

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

- **Le maillage des défauts**

Rappelons que dans ce cas nous avons utilisé les mêmes maillages de joint à simple recouvrement que les analyses précédentes. Pour avoir une bonne évaluation des contraintes, le maillage doit être très raffiné à proximité des défauts. La figure III-13, représente un exemple de maillage de trois types des défauts.

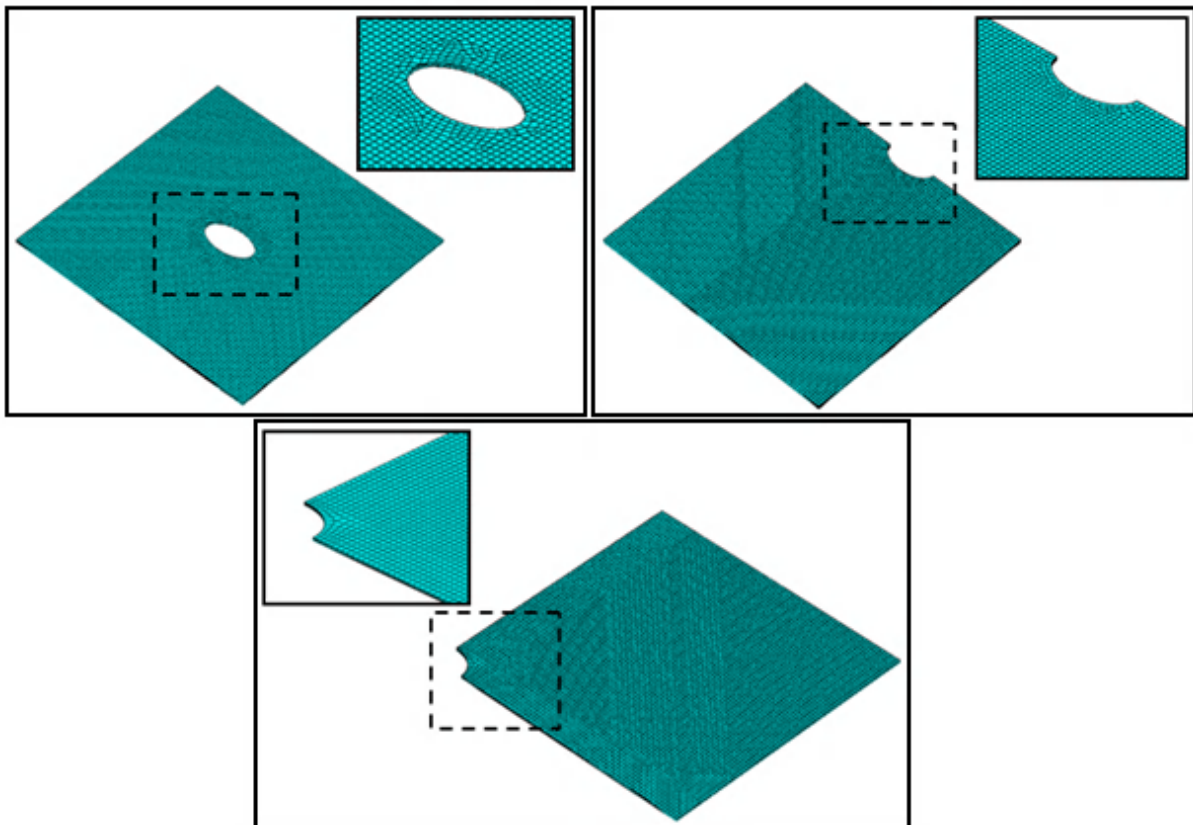


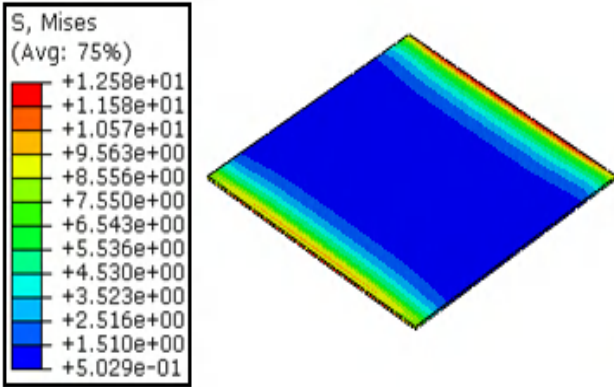
Figure III-13: Maillage de trois types des défauts dans l'adhésif.

- **Influence de la présence des défauts dans l'adhésif sur la distribution des contraintes de Von Mises, de cisaillement, et de pelage**

Influence de la présence des défauts dans l'adhésif sur la distribution des contraintes de Von Mises, de cisaillement, et de pelage pour chaque modèles sont montrées dans les figures suivantes:

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

Modèle (A)



Modèle (B)

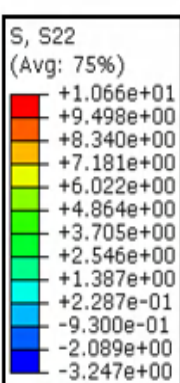
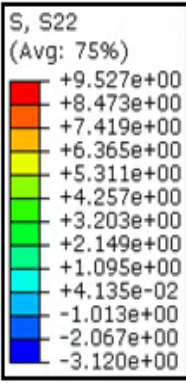
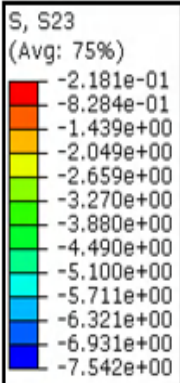
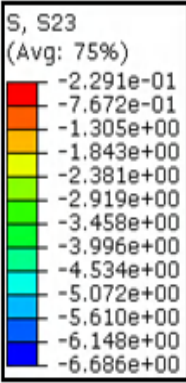
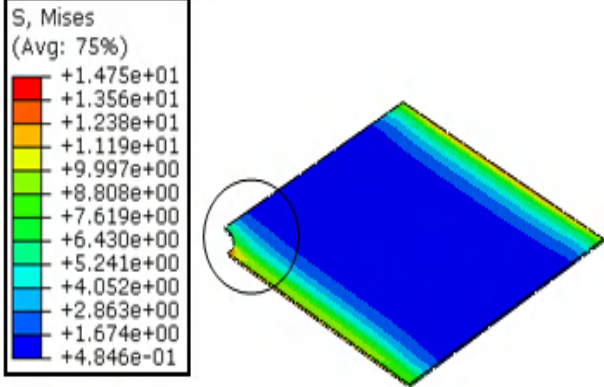
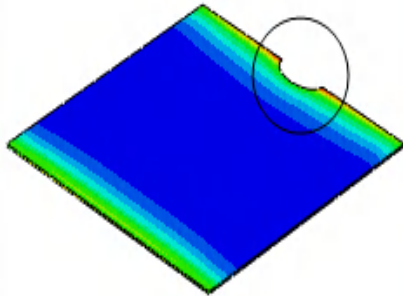
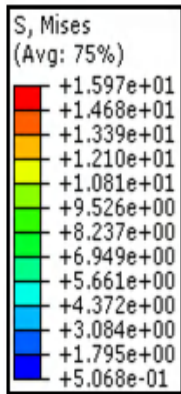


Figure III-14: Distribution des contraintes de, Von Mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour les modèles (A) et (B).

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

Modèle (C)



Modèle (D)

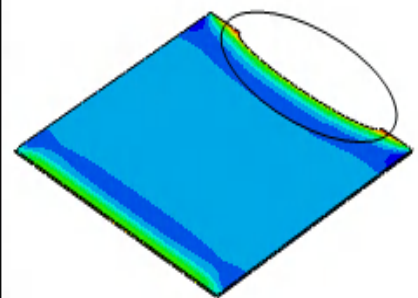
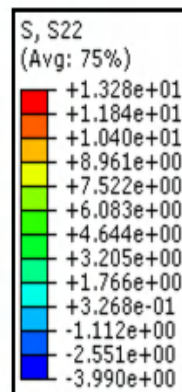
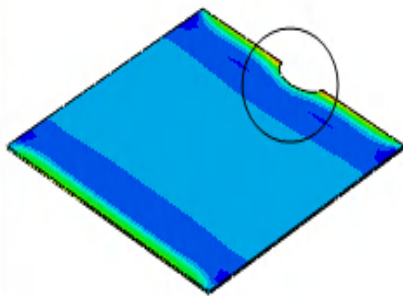
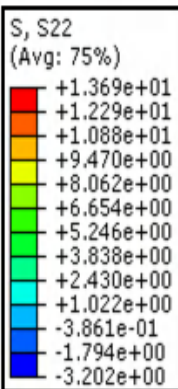
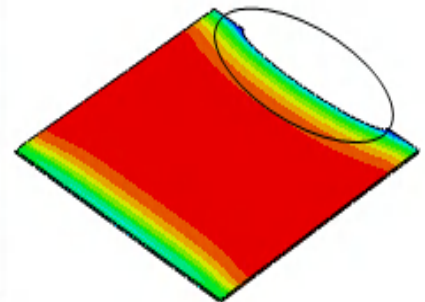
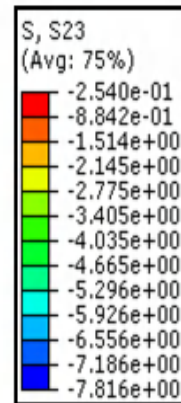
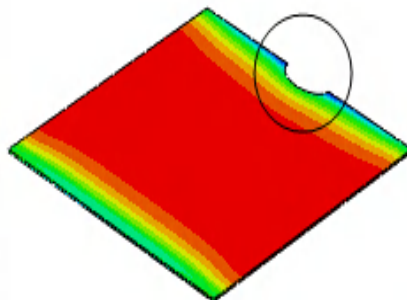
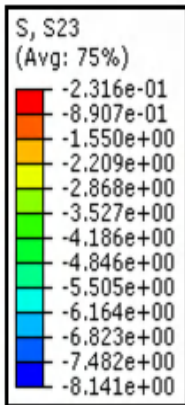
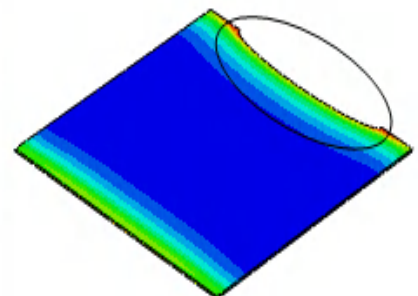
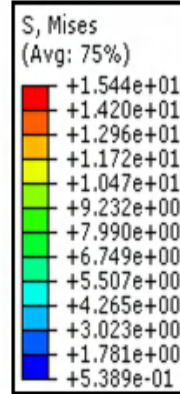


Figure III-15: Distribution des contraintes de, Von Mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour les modèles (C) et (D).

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

Modèle (E)

Modèle (F)

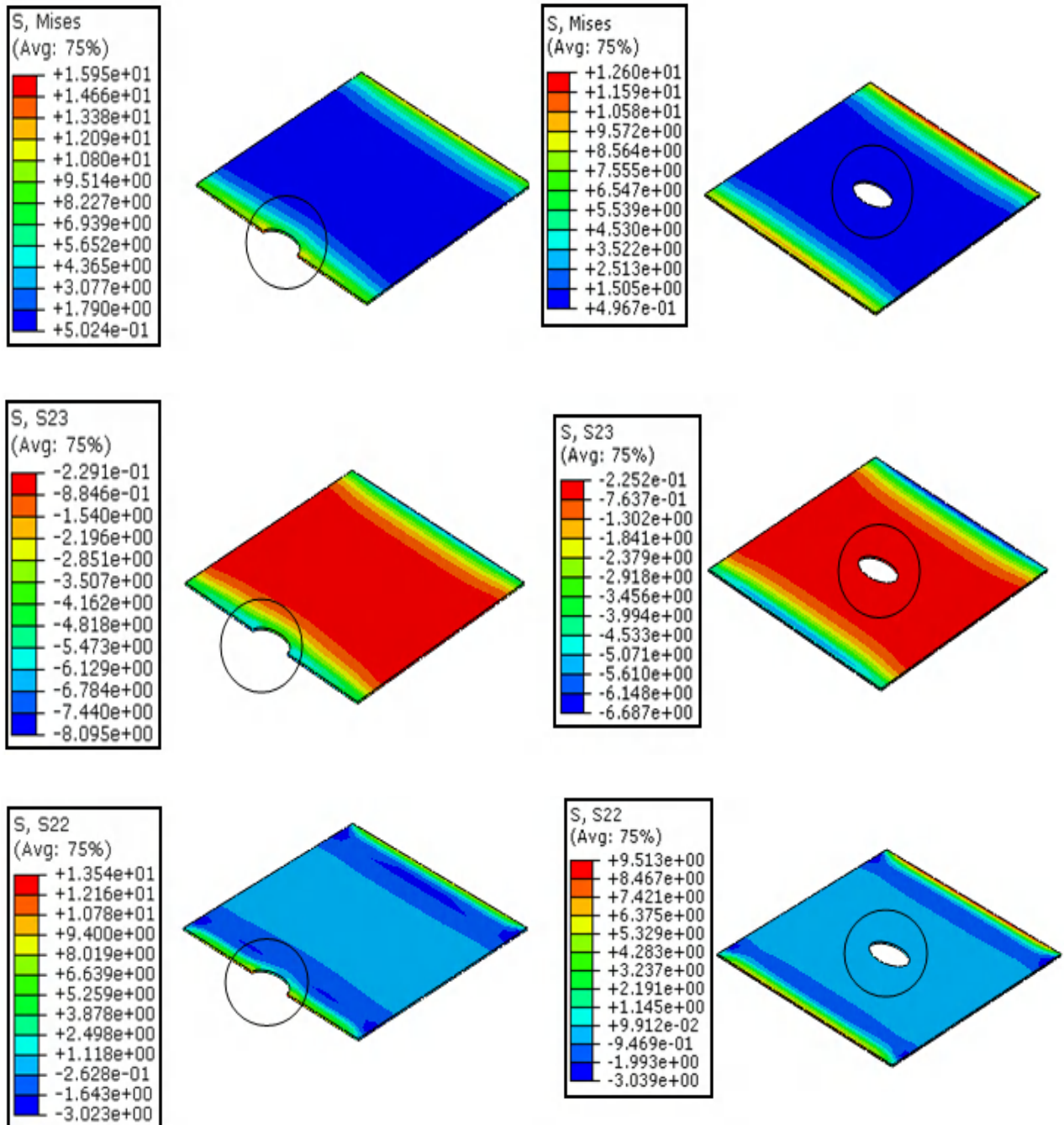


Figure III-16: Distribution des contraintes de, Von Mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour les modèles (E) et (F).

La distribution des contraintes dans l'adhésif avec et sans défaut pour le joint à simple recouvrement dimensionner par la méthode des éléments finis tridimensionnels sont montrées

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

dans les figures (III-14, III-15, III-16). On peut observer que, les distributions des contraintes de Von mises, de cisaillement et de pelage suivent les mêmes évolutions, la distribution des contraintes de cisaillement, montre une concentration forte aux deux extrémités communes dans les bords libre du recouvrement. Cependant, les valeurs absolues de ces contraintes sont négligeables relativement aux autres contraintes. Pour les contraintes de pelage sont grandes au centre du joint et diminuent aux bords. Ce comportement est dans l'accord qualitatif avec des résultats expérimentaux d'Adams et autres [6]. Ceci est provoqué par des effets de Poisson et le recourbement anti-plastique des adhérents.

Les contraintes dans l'adhésif maximales (contraintes de cisaillement et de pelage) se situent, aux extrémités du recouvrement. Cette position aux extrémités du recouvrement reste inchangée dans tous les cas de l'adhésif avec et sans défaut. Si en comparant l'effet de la présence de défaut pour différents modèles, on peut voir une augmentation des contraintes maximales c'est-à-dire que les contraintes soient plus hautes et atteignent des valeurs maximales pour les cas de défaut dans le coin, et la zone centrale de l'adhésif toujours avec des valeurs moins que ceux situés sur les extrémités, car la concentration de contrainte élevée se produit sur les bords libres de la région de fixation par collage. les contraintes de pelage maximales sont supérieures aux contraintes de cisaillement maximales.

Pour voir clairement et comparer entre les valeurs des contraintes maximales dans l'adhésif pour tous les modèles géométriques avec et sans défaut on a présenté le tableau III-2.

Les contraintes maximales	Modèle (A)	Modèle (B)	Modèle (C)	Modèle (D)	Modèle (E)	Modèle (F)
Von Mises	<u>12.58</u>	14.75	15.97	15.44	15.95	12.60
Cisaillement	<u>6.68</u>	7.54	8.14	7.81	8.05	6.68
Pelage	<u>9.52</u>	10.66	13.69	13.28	13.54	9.52

Tableau III-2: Les valeurs maximales des contraintes de, Von mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif avec et sans défaut.

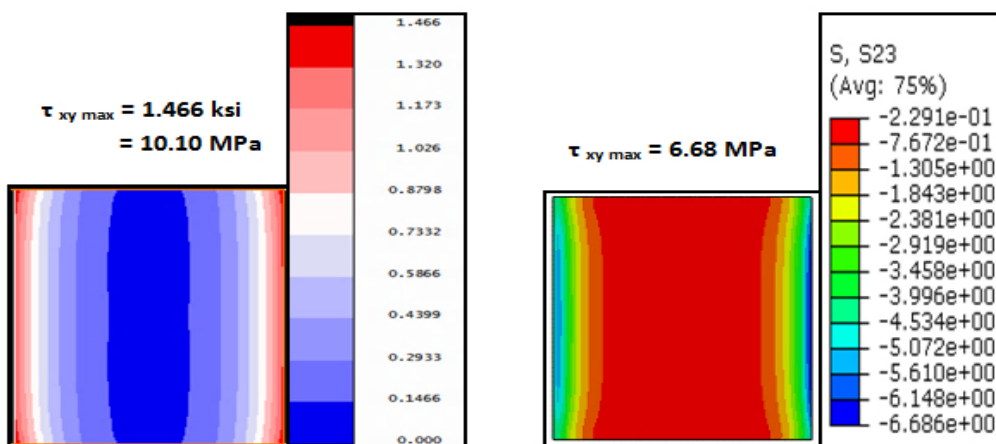
Si on compare entre les valeurs maximales des contraintes dans l'adhésif de cisaillement, de pelage, et de Mises pour différents modèles avec et sans défaut, on constate clairement que la les contraintes de cisaillement maximales est plus importante ou elle atteint la valeur presque 8.14 MPa dans la troisième cas près de la zone de défaut, même remarque pour les contraintes

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

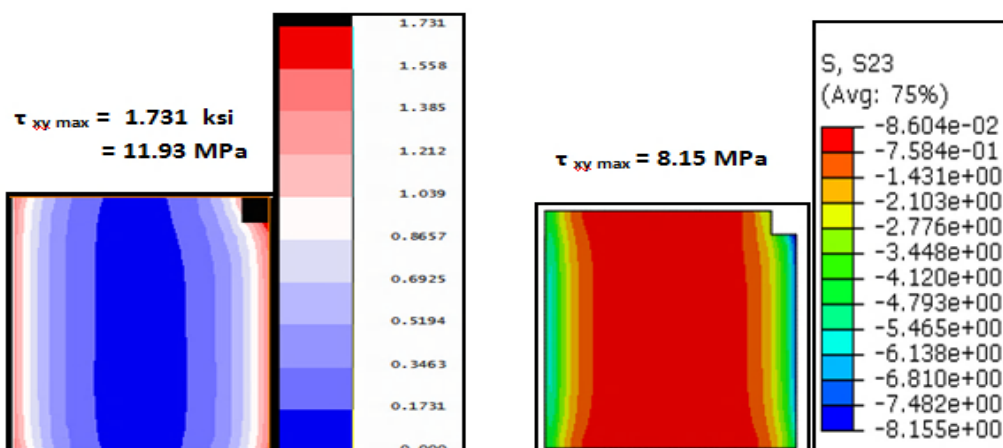
de pelage maximales est plus importante dans le troisième cas notamment dans la zone de défaut ou la valeur maximale est au environ de 13.69 MPa. Par comparaison aussi les contraintes maximales de Mises reste échantant dans tous les cas, toutes ces observations confirment que les contraintes de cisaillement se produisent à aux deux extrémités communes du recourbement et atteignent des valeurs maximales près de la zone de défaut, les contraintes de pelage sont distribués symétriquement le long du recouvrement. Il est également évident que l'importance des contraintes de cisaillement soient beaucoup inférieures que les contraintes de pelage.

- Comparaison de la distribution des contraintes de cisaillement maximale de l'adhésif avec les deux méthodes d'élément fini bidimensionnelle (2D) et tridimensionnels (3D)

-a)-

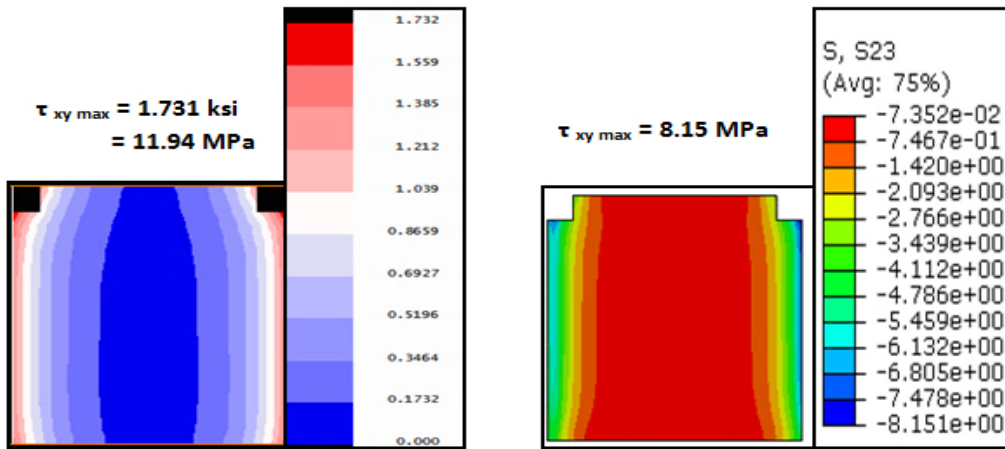


-b)-

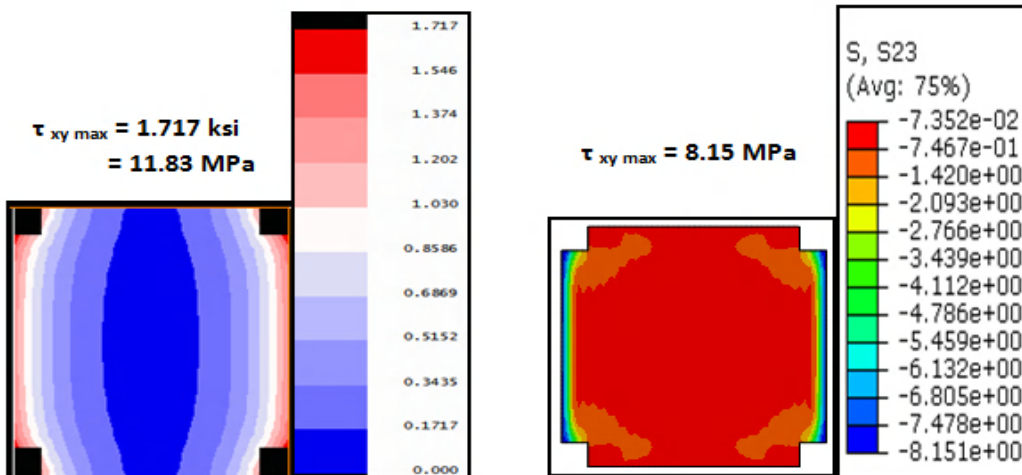


Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

-c)-



-d)-



-e)-

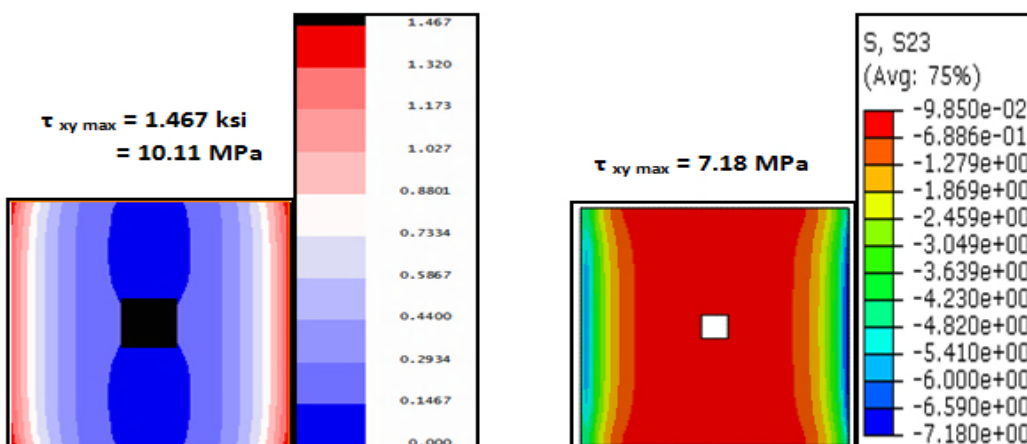


Figure III-17: Comparaison entre la modélisation numérique en (2D) et (3D), b)- adhésif avec quatre défauts, c)- adhésif avec défaut centrale.

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

Nous donnons dans la figure III-17, la comparaison de la distribution des contraintes de cisaillement maximales dans l'adhésif par la modélisation numérique bidimensionnelle avec le code de calcul est le FRANC2D/L (Fracture Analysis Code) à deux dimensions et comparés avec la méthode des éléments finis tridimensionnels avec le logiciel ABAQUS. Nous observons que, dans les deux cas de calcul bidimensionnels et tridimensionnels donnent presque les mêmes résultats avec une réduction légère dans les valeurs des contraintes de cisaillement maximales dans l'adhésif dans tous les cas avec et sans défaut.

III-6. Conclusions

Dans ce chapitre on a étudié l'influence de la présence des défauts dans l'adhésif sur la distribution des contraintes pour le joint adhésif à simple recouvrement pour différentes paramètres, tels que l'épaisseur de l'adhésif, la longueur de recouvrement, et le module de cisaillement de l'adhésif. Les résultats obtenus dans ce chapitre nous ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- L'assemblage à simple recouvrement présente une symétrie par rapport au centre du joint dans la répartition des contraintes dans tous les cas avec et sans défauts ;
- La zone centrale de l'adhésif demeure inactive pour des longueurs adhésif plus grandes ou égales à la largeur du plaque ;
- Les contraintes se produisent à l'extrémité du recouvrement et atteignent des valeurs maximales près de la zone des défauts;
- L'effet de la zone des défauts sur les contraintes au niveau des extrémités est très significatif, elles sont plus important dans le coin que des zones des défauts centrées.
- La concentration de contrainte élevée sur les bords libres de la couche de l'adhésif peut être réduite par l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif.
- L'augmentation de module de cisaillement de l'adhésif diminue la résistance de l'adhésion.
- La dégradation des proportions mécaniques de l'adhésif est provoqué une réduction des contraintes maximales.

Chapitre III: Influence de la présence des défauts de collage sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésive

III-7. Références

- [1]. B. Kilic^a, E. Madenci^{a*}, D.R. Ambur^b. Influence of adhesive spew in bonded single-lap joints. *Engineering Fracture Mechanics* 73 (2006) 1472–1490
- [2]. Thèse, Marie Pierre FOULC, durabilité des assemblages par colles : état de l'art. (2008).
- [3]. Investigation of Thick Bondline Adhesive Joints Office of Aviation Research Washington, D.C. 20591 DOT/FAA/AR-01/33(June 2001).
- [4]. FAA Bonded Structure Research Projects Peter Shyprykevich Gatwick, United Kingdom (26 October 2004).
- [5]. AÉROSPATIALE, CEA, DASSAULT, ECIA, EDF, FRAMATOME, ONERA, PSA, RENAULT. SCHLUMBERGER, SNECMA. Contrôles Non Destructif.
- [6]. P.RAPIN Méthode des éléments finis, Lauréat de l'Institut Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité. Technique de l'ingénieur.

Chapitre IV



L'effet de vieillissement de l'adhésif
avec et sans défauts sur la distribution
des contraintes

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

IV-1. Introduction

Le mot durabilité ayant la même racine que durée, étudier la durabilité ne revient pas systématiquement à estimer la durée de vie d'un système. Il s'agit en réalité de vérifier que l'assemblage assurera une fonction pérenne au cours de sa vie, et cela passe par une conservation de ses propriétés voire un abattement acceptable sous l'effet du vieillissement. Dans l'environnement ferroviaire, les contraintes auxquelles le joint est soumis sont sévères [1]. La durabilité des assemblages structuraux est un problème récurrent, d'une importance capitale pour les industriels du secteur aéronautique, en conditions de service, les assemblages collés structuraux sont généralement soumis à deux types de sollicitations qu'elles soient statiques ou périodiques : les contraintes mécaniques, les sollicitations environnementales, principalement l'humidité et la température. L'effet individuel ou combiné de ces sollicitations modifie non seulement le comportement de l'adhésif de l'assemblage mais agit également sur les interactions interfaciales et les forces d'adhésion. Ces sollicitations sont donc les facteurs de la diminution de la résistance mécanique des assemblages, de la perte de la fonction adhérence et éventuellement d'une diminution de la durée de vie des assemblages collés [2].

L'expérience de ces dernières années souligne l'importance des effets de l'environnement (humidité et température) sur les propriétés mécaniques des matériaux et la stabilité de leurs performances à long terme (vieillessement). L'eau agit à l'interface milieu extérieur/polymère, mais aussi au cœur du polymère, ce qui est possible grâce au déplacement des molécules d'eau dans la matière, appelé phénomène de diffusion. Au cours d'un vieillissement hygrothermique, la présence d'eau au sein des matériaux provoque une détérioration des propriétés mécaniques et entraîner ainsi une dégradation irréversible des propriétés des matériaux [3].

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la variation des propriétés de l'adhésif époxyde bi-composant type Adegit A140 sous l'effet de l'absorption d'eau. Ces propriétés mécaniques de l'adhésif (le module d'Young E), sont déterminées après chaque durée d'immersion ensuite utilisées dans la modélisation numérique. Cette partie sera basée sur la modélisation par éléments finis tridimensionnelle, ces modélisations permettront d'évaluer l'effet de l'absorption d'eau, et de déterminer la distribution des contraintes, de cisaillement, de pelage, et de Von Mises dans l'adhésif. Les résultats expérimentaux utilisés dans notre travail ont

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

obtenus au niveau de laboratoire (LASIE) en France dans le cadre des travaux de Thèse de Mr K. MADANI.

IV-2. Généralités sur les types de vieillissement

On distingue dans la littérature plusieurs types de vieillissement, le vieillissement étant considéré comme une évolution lente des propriétés du matériau à partir d'un état de référence, résultant de son instabilité propre ou de l'environnement. Cette évolution peut concerner la structure chimique des macromolécules, la composition du matériau (pénétration ou départ de petites molécules), ou son état physique (fraction de volume libre, contraintes internes). Il est reconnu qu'en dessous de sa température de transition vitreuse (T_g), un polymère n'est généralement pas dans un état d'équilibre thermodynamique. En effet, au cours d'un refroidissement, le matériau se fige avec un excès de volume libre et d'enthalpie au passage de la zone de transition vitreuse. Le vieillissement physique résulte alors d'une restructuration progressive des molécules dans le polymère vers une configuration plus stable. De nombreuses études dans ce domaine menées sur polymère et sur composites à matrice organique ont montré que les propriétés dépendant de la mobilité moléculaire sont significativement affectées.

Contrairement au le vieillissement physique, le vieillissement chimique se réfère à un changement irréversible dans le réseau moléculaire dû à des réactions chimiques. Aux températures considérées, les processus chimiques les plus importants concernent les réactions de coupure de chaînes, de post-réticulation ou d'oxydation. Les phénomènes de post-réticulation ou de thermolyse impliquent respectivement une augmentation ou une diminution de la densité de réticulation. Cette variation s'accompagne généralement une de la T_g et des propriétés mécaniques. Ce type de vieillissement modifie peu la forme des courbes de traction des polymères, mais joue un rôle important sur les propriétés à rupture et notamment sur l'allongement à rupture qui diminue avec le temps de vieillissement [4].

IV-3. Les facteurs influençant la durée de vie des joints collés

Même pour un joint collé présentant des propriétés optimales à l'élaboration, il est impossible de garantir le maintien de ces dernières en fonctionnement. En effet, en service les joints sont soumis à des sollicitations qui peuvent l'endommager, ce sont :

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

- La température,
- L'application d'une contrainte mécanique,
- L'environnement, l'humidité dans la plupart des cas.

Ce sont les trois facteurs d'endommagement de l'adhésif lui-même en tant que polymère, mais aussi du joint. Dans le cas du joint, les mécanismes d'endommagement sont plus complexes que dans le cas de l'adhésif massique. Une fois au sein de l'assemblage, l'eau affaiblit la tenue du joint par une combinaison de mécanismes impliquant à la fois l'interface et l'adhésif lui-même. Comme l'eau, chacun des facteurs température et contrainte a, à lui seul, une action délétère sur la résistance mécanique des assemblages et peut conduire à une perte totale de l'adhérence [2].

IV-4. Vieillissement hygrothermique

Nous avons essayé de déterminer et comprendre les effets de l'eau sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du matériau. Nous cherchons d'une part à expliquer les écarts qui peuvent être observés entre les cinétiques d'absorption obtenues pour différentes conditions de vieillissement, également identifier l'évolution de plusieurs paramètres mécaniques au cours du vieillissement.

IV-4. 1. Mécanismes d'hydrophilie

La nature plus ou moins polaire d'un polymère (selon les groupes chimiques le constituant) lui confère naturellement une sensibilité particulière pour des solvants polaires comme l'eau. Cette sensibilité se traduit par la pénétration de molécules du solvant dans le polymère ; on parle d'absorption. En raison de l'absence de toute structure cristalline, l'espace entre les chaînes moléculaires est important comparé à la taille des molécules d'eau. Ces dernières peuvent se déplacer dans les interstices.

L'hydrophilie se caractérise en pratique par la teneur massique en eau que le matériau peut atteindre à l'équilibre dans un milieu isotherme et à taux hygrométrique constant. Dans la littérature, on trouve en général deux approches du mécanisme d'hydrophilie, qui peuvent être combinées : l'approche « volumique » et l'approche mettant en jeu des interactions entre polymère et molécules d'eau grâce aux liaisons hydrogène.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

- **Approche structurale**

Suivant la polarité des groupements chimiques constituant le polymère, ce dernier sera plus ou moins susceptible d'absorber de l'eau. On peut classer les groupements suivant leur polarité :

- Les groupements très peu polaires sont les groupements hydrocarbonés comme

-CH-, -CH₂-, -CH₃, les cycles aromatiques.

- Les groupements modérément polaires sont :

-O-, O=C-, O=C-O-, -C.N.

- Les groupes polaires susceptibles de créer une liaison hydrogène avec l'eau sont :

O=C-NH-, O=C-OH-, -OH-, -NH-

Il peut y avoir une coopération de deux groupements hydrophiles pour fixer une molécule d'eau (Figure IV-1).

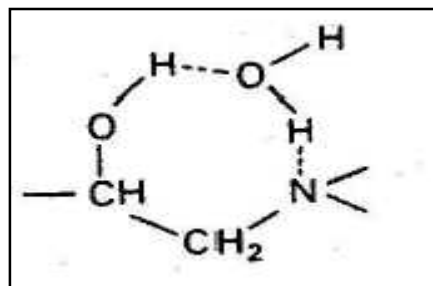


Figure IV-1: Mobilisation d'une molécule d'eau par deux groupements polaires.

- **Nature de l'eau dans la résine époxy**

Une étude portant sur des mesures d'absorption et de désorption puis de résonance magnétique (RMN) permet de connaître les caractéristiques de liaison de l'eau avec l'époxy. Il apparaît que les molécules d'eau se lient à la résine à travers des liaisons Hydrogène de deux types qui dépendent de l'énergie d'activation :

- **Type I** : Une molécule d'eau forme une liaison H simple. Elle possède une énergie d'activation faible (10 kcal/mol) et pourra se séparer facilement de la résine.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

- **Type II** : Une molécule d'eau forme des liaisons H multiples, possède une énergie d'activation plus élevée (15kcal/mol) et aura plus de mal à se séparer.

La figure IV-2 suivante illustre ces deux types de liaison. Les liaisons de type I sont les plus nombreuses. Des durées d'immersion plus longues et des températures plus élevées favorisent la formation de liaisons de type II.

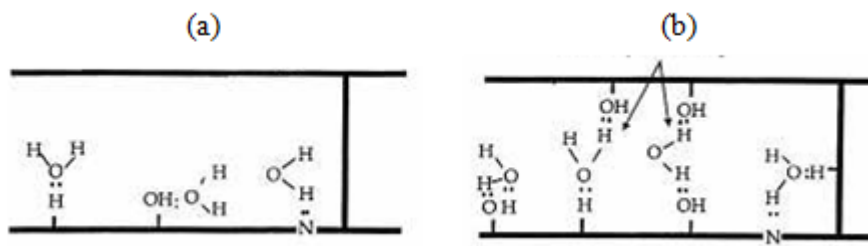


Figure IV-2: Liaisons possibles de molécules d'eau avec un réseau époxy.

- (a) : Les molécules d'eau forment une liaison Hydrogène avec la résine.
- (b) : Elles forment plus d'une liaison hydrogène et ont une énergie d'activation plus élevée.

- **Approche volumétrique**

Le « *volume libre* » est assimilé à la place laissée entre les molécules et qui n'est pas occupée par les vibrations des atomes des constituants. En simplifiant le concept de volume libre, cette approche évoque la présence possible de molécules d'eau dans les volumes disponibles entre les chaînes macromoléculaires du réseau 3D.

IV-4. 2. Propriétés mécaniques spécifiques

- **Phénomènes visqueux**

La réponse d'un polymère à une sollicitation est toujours décomposée en une partie instantanée qui peut être élastique et/ou plastique et une partie différée (Figure IV-3). On parle alors de visco-élastoplasticité. Les matériaux dits viscoélastiques ont, entre autre, la particularité de continuer à évoluer dans le temps même lorsqu'ils ne sont plus sollicités.

Plusieurs modèles rhéologiques sont employés pour décrire cette propriété, ils sont basés sur la mise en série ou en parallèle d'éléments « ressorts » et/ou « amortisseurs ». Le plus connu

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

le modèle de Maxwell permet de calculer la force nécessaire pour maintenir une déformation imposée en tenant compte du phénomène de relaxation.

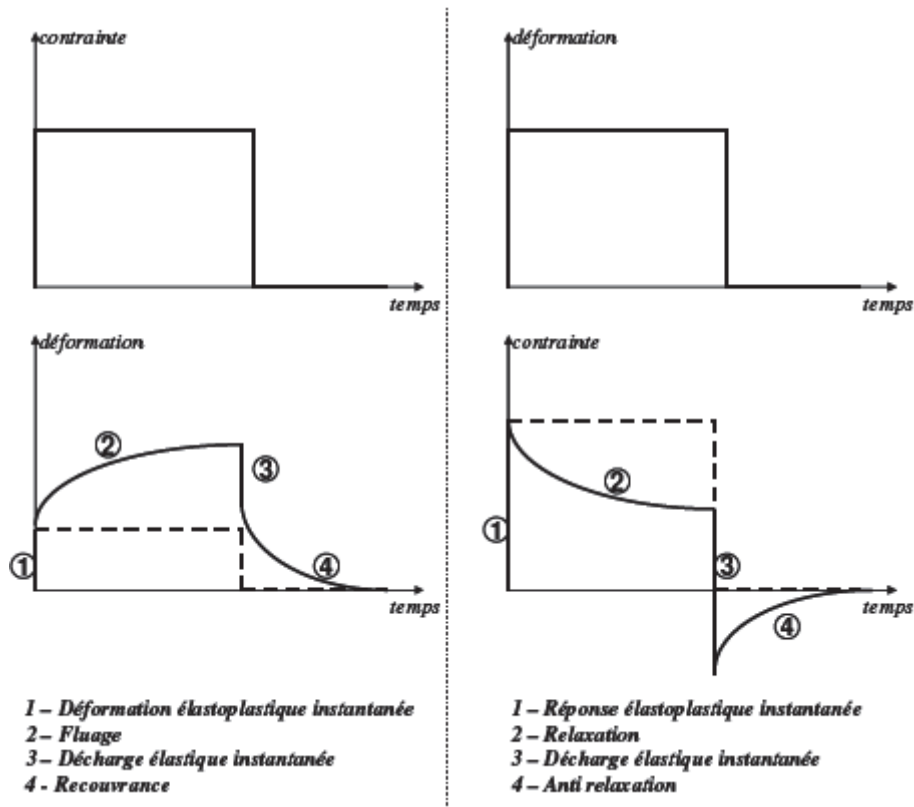


Figure IV-3: Notion de viscoélasticité (en pointillés la réponse élastique à la sollicitation, en trait plein la réponse viscoélastique).

• Plasticité

Le phénomène de plasticité se caractérise par l'apparition de déformations permanentes lorsque le niveau de sollicitation dépasse un certain seuil. Dans le cas d'une sollicitation uniaxiale, une traction par exemple, on peut définir une limite d'élasticité. En dessous de cette contrainte la déformation reste purement élastique, au-delà apparaît en plus une déformation plastique permanente. Dans un cas de sollicitation complexe, il existe un seuil de plasticité dans l'espace des contraintes ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) pour les contraintes principales).

Dans le domaine plastique, plusieurs phénomènes coexistent. L'écoulement plastique, qui s'apparente à l'évolution de ϵ_p , est stable et indépendant du temps. L'écrouissage concerne la modification du seuil de plasticité due à la charge appliquée. Enfin pour des sollicitations extrêmes, l'endommagement se caractérise par l'apparition de ruptures locales qui en

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

coalesçant vont provoquer la ruine du matériau. Ces phénomènes sont décrits par des lois parfois couplées qui permettent de décrire l'évolution du comportement du matériau.

- **Transition vitreuse**

Pour simplifier, un polymère possède deux états physiques différents, un état vitreux et un état caoutchoutique. Dans l'état caoutchoutique, les macromolécules ont une forte mobilité moléculaire et peuvent se réorganiser rapidement, suite à une sollicitation, grâce à la quantité de volume libre relativement importante. Dans l'état vitreux c'est le contraire, les molécules ont beaucoup de difficultés à trouver une position d'équilibre à cause d'une mobilité moléculaire faible et d'une petite quantité de volume libre. On dit que l'état est métastable.

Le passage d'un état à un autre est appelé transition vitreuse et se caractérise par une température de transition, un changement de module et une augmentation du volume spécifique (Figure IV-4). Quand la température diminue, cette transition s'apparente à un phénomène de remise en ordre partiel à courte distance et s'accompagne d'une diminution de volume spécifique et d'une augmentation du module d'Young. Les macromolécules s'arrangent un peu mieux entre elles et le volume libre diminue. Cette transition vitreuse est fortement dépendante des conditions environnantes du matériau.

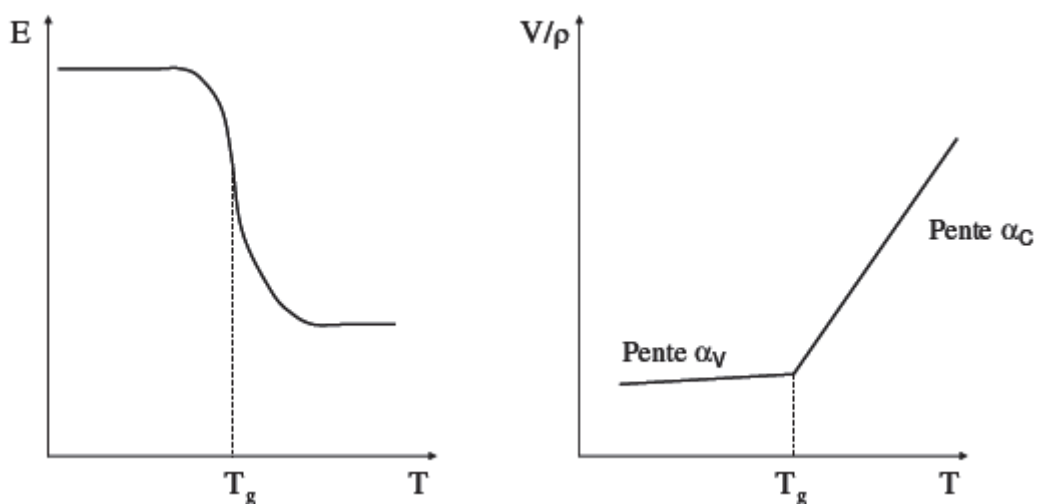


Figure IV-4: Variation du module d'Young et du volume spécifique lors de la transition vitreuse.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

- **Critère de rupture**

Dans la littérature, on trouve un grand nombre de critères de rupture adaptables aux matériaux polymères. Les notions de critère de rupture et de critère de plasticité sont proches, aussi de nombreux critères peuvent être employés pour juger de l'un ou l'autre des événements. Il suffit pour cela de bien choisir le niveau du critère. Afin de rester cohérent, seuls ceux qui sont couramment employés pour l'étude des assemblages collés seront présentés.

Il existe, de façon simple, deux types de critères qui sont basés soit sur l'état de contraintes de la couche de colle, soit sur l'état de déformation de cette dernière. Un critère de rupture peut simplement être défini par un niveau de contrainte qu'il ne faut pas dépasser. On sait que dans un assemblage collé, le pelage est à éviter, aussi on peut très simplement définir le critère comme un niveau de contrainte de pelage en bout de recouvrement à ne pas dépasser. Le critère de Von Mises, qui tient compte du cisaillement, consiste à définir une contrainte équivalente maximum et si à un endroit donné la contrainte locale dépasse cette valeur, on considère qu'il y a rupture. D'autres critères s'attachent à proposer des descriptions plus réalistes des phénomènes physiques rencontrés dans les nouveaux types d'adhésifs. On sait par exemple que pour les époxyds, la déformation volumique est très importante dès qu'on sollicite le matériau ce qui implique un effet de la pression hydrostatique non négligeable. Ainsi les ruptures en traction et en compression n'interviennent pas au même moment [5].

IV-5. L'eau et ses mécanismes de diffusion

L'eau est un des facteurs principaux agissant sur le vieillissement des adhésifs, d'une part parce que l'eau présente une grande permittivité (fortes paires d'ions contribuent aux forces interfaciales) mais aussi parce qu'elle a une grande tension de surface (ceci agit sur la formation de liaisons faibles entre l'adhésif et le substrat métallique). Le principal effet macroscopique de la pénétration de l'eau dans un assemblage collé est la chute importante des propriétés mécaniques, c'est-à-dire des contraintes à la rupture et des modules d'élasticité en cisaillement et en traction.

IV-5.1. Diffusion de l'eau dans un adhésif

L'évaluation de l'affaiblissement de l'assemblage nécessite tout d'abord l'étude du comportement au vieillissement de l'adhésif massif, à travers la détermination des

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

cinétiques d'absorption d'eau et la caractérisation des effets physiques et chimiques de l'eau sur le polymère. Le modèle le plus simple pour la diffusion d'un solvant (espèce diffusante) dans un solide est donné par la loi de Fick (1855). Le gradient de concentration du solvant induit un flux ϕ qui lui est proportionnel. C'est donc le moteur de la diffusion. La vitesse de diffusion est caractérisée par le coefficient de diffusion D . La première loi de Fick donnée par l'équation (IV-1) suivante :

$$\vec{\phi} = -D \overrightarrow{\text{grad}C} \quad (\text{IV-1})$$

Où

D : coefficient de diffusion du milieu en mm^2/s ,

C : concentration du solvant au sein du milieu.

Le signe négatif indique que le flux est dirigé des zones à concentration élevée vers celles à concentration plus faible. La quantité de matière diffusant dans la direction x au travers d'une unité de surface par unité de temps, est appelée le flux et est relié au gradient de concentration ($\partial c / \partial x$) par la première loi de Fick.

La seconde loi de Fick fait intervenir le temps, On considère que l'eau pénètre librement et sans interaction avec les composants. C'est alors la seconde loi de Fick qui s'applique, et s'écrit :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (\text{IV-2})$$

Si la diffusion est unidirectionnelle dans la direction x , comme par exemple lors du phénomène de sorption dans un film fin, la seconde loi de Fick s'écrit plus simplement

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{IV-3})$$

Ces équations ont des solutions appropriées à des conditions aux limites données. La cinétique de diffusion est donnée par la résolution de l'équation (V-3). Aux temps courts, cette solution s'écrit:

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{l} \left(\frac{Dt}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{IV-4})$$

Où M_t est la masse d'eau absorbée au temps t , M_∞ la masse d'eau absorbée à saturation et l l'épaisseur de l'échantillon. Le coefficient de diffusion peut être déterminé expérimentalement, si la prise en diffusant ne dépasse pas 60% (partie linéaire de la courbe), par la tangente de la courbe

$$\frac{M_t}{M_\infty} = f \left(\frac{\sqrt{t}}{l} \right) \quad \text{On en déduit le coefficient de diffusion } D \text{ par la relation}$$

$$D = \frac{\pi a^2}{16M_\infty^2} \quad (\text{IV-5})$$

La courbe c'est une fonction linéaire en début d'absorption et qui s'incurve au moment de la saturation, quand le matériau se met en équilibre avec l'environnement [6].

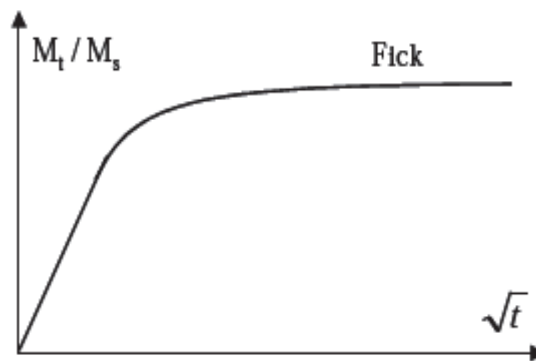


Figure IV-5: Courbe de diffusion de type Fick.

Où a : est la pente de la tangente à la courbe.

IV-5.2. Conséquences de l'absorption d'eau

La pénétration des molécules d'eau dans le réseau peut induire simultanément plusieurs phénomènes, qui constituent globalement le vieillissement humide:

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

- Une plastification du réseau (diminution de la température de transition vitreuse). En effet, l'eau va se fixer sur les sites hydrophiles du polymère et rompre des liaisons physiques inter ou intra-macromoléculaires. Il en résulte une augmentation de la mobilité des chaînes, qui se traduit naturellement par un décalage de la température de transition vitreuse vers les basses températures. Le phénomène de plastification s'accompagne généralement d'une diminution importante des propriétés mécaniques de l'adhésif (contrainte à la rupture, module d'élasticité), mais aussi d'une augmentation notable de la ductilité.
- Un gonflement du réseau: la rupture des liaisons physiques conduit également à un relâchement général des mailles du réseau qui favorise encore l'insertion de nouvelles molécules d'eau et le gonflement global du polymère. Dans les joints adhésifs, ce gonflement n'est pas homogène et génère des contraintes mécaniques supplémentaires [7].

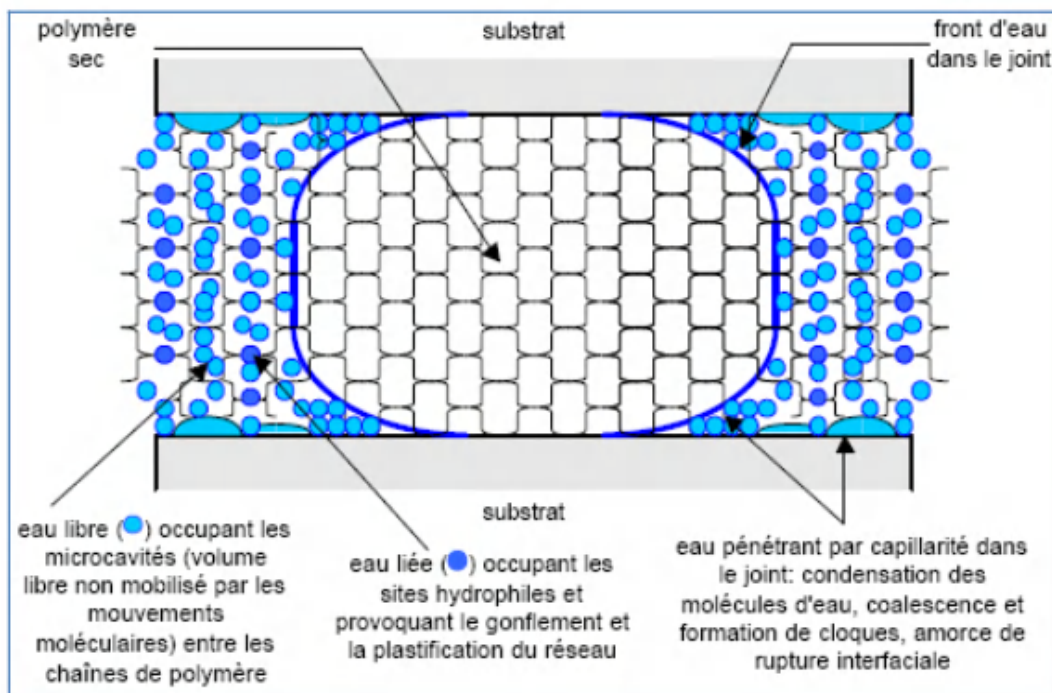


Figure IV-6: Schéma récapitulatif des différents modes de pénétration de l'eau dans un assemblage collé [2].

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

Ces différents phénomènes devront être pris en compte dans l'étude du vieillissement des assemblages collés. Le tableau IV-1 résume l'ensemble des actions que l'eau peut avoir sur un polymère, une fois qu'elle a pénétré le réseau.

	Effet	Causes	Conséquences	Schématisation
Réversible	Plastification	<ul style="list-style-type: none"> • Pénétration de l'eau dans le réseau tridimensionnel • Rupture de liaisons secondaires responsables de la cohésion du matériau 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution du module d'Young • Diminution de la limite d'élasticité • Augmentation de la déformation à rupture 	<p>polymère + eau → polymère plastifié par l'eau Zones hachurées : groupements polaires.</p> <p>Rupture par l'eau des liaisons secondaires dans le polymère, d'après [Verdu, 1990]</p>
	Evolution de la température de transition vitreuse T_v	<ul style="list-style-type: none"> • L'effet plastifiant entraîne une augmentation de la mobilité moléculaire • Changements de conformation pour des températures inférieures 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la T_v • Loi des mélanges applicable pour calculer nouvelle T_v $\frac{1}{T_V} = \frac{w_1}{T_{V1}} + \frac{w_2}{T_{V2}}$ <p>avec T_{V1} la T_V des composants et w_i le pourcentage massique des composants.</p>	<p>Etat initial (1) Pénétration du solvant (2) Etat final (3)</p> <p>○ ○ ○ molécule de solvant ~~~~~ chaîne macromoléculaire (dans la réalité, les chaînes ne sont pas parallèles)</p> <p>Plastification par un solvant, d'après [Colombini, 2002]</p>
	Réticulation secondaire	Mouvements des petites molécules facilité	Les molécules n'ayant pas réagi se combinent	
	Gonflement	<ul style="list-style-type: none"> • Dans un premier temps, les molécules d'eau se placent dans le volume libre • Puis une fraction d'eau se lie au polymère par liaisons hydrogène 	<p>Désenchevêtrement des chaînes</p> <p>Possibilité d'endommagement physique irréversible</p>	
Irréversible	Hydrolyse	L'eau réagit avec certains groupements du réseau Soit latéraux (rare) Soit au sein même de la chaîne	Coupage du squelette perte, à terme, des propriétés mécaniques	$\sim X-Y \sim + H_2O \longrightarrow \sim X-OH + HY \sim$ <p>Equation générale de l'hydrolyse, d'après [Verdu, 1990]</p>
	Lessivage	départ des molécules d'adjuvants présentes à la surface puis diffusion des molécules du cœur vers la surface.		<p>Exemples de mécanismes de lessivage ou d'exsudation, d'après [Verdu, 1990]</p>

Tableau IV-1: Différentes actions de l'eau sur un polymère [1].

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

IV-5. 3. Méthodes d'étude du vieillissement

La méthode d'étude du vieillissement utilisée pour déterminer l'évolution des propriétés mécaniques de l'adhésif au cours de la durée de vieillissement, en immersion dans l'eau. Pour déterminer le comportement en d'une structure collé exposé à l'eau, il est primordial de connaître l'évolution des propriétés mécaniques de ce structure au cours de la durée de vieillissement afin de prévoir le comportement de l'assemblage en vieillissement. Donc il est nécessaire de connaître et comprendre le comportement des assemblages collés en vieillissement.

- **Vieillessement de l'adhésif en immersion de l'eau :**

Pour déterminer les propriétés mécaniques après le vieillissement d'une structure collé par adhésif, il est primordial de connaître l'évolution des propriétés mécaniques des substrats et de l'adhésif au cours de la durée de vieillissement afin de prévoir le comportement de l'assemblage en vieillissement.

Les adhésifs ont été choisis ont basé sur leur utilisation dans la construction et la réparation des structures aérospatiales. On a choisis pour les joints adhésifs collés une couche d'adhésif époxyde bi-composant type ADEKIT A140 fait par la compagnie d'AXSON, et pour suivre le processus de diffusion de l'eau dans ce matériau et l'évolution de ces caractéristiques mécaniques.

On a supposé que seul l'adhésif qui se manifeste en présence des molécules d'eau et qui absorbe l'eau puisque l'aluminium dans les cas générale sera revêtus avec une peinture.

Les spécimens de l'adhésif ont été pesés avant et après l'immersion pour déterminer la masse d'eau absorbée par l'adhésif après chaque temps d'immersion. Les mesures de masse effectuées sur l'adhésif ont été réalisées sur une balance numérique et les résultats sont représentés dans la figure IV-7. Le taux d'absorption d'eau est donné par l'expression suivante :

$$A(\%) = \frac{M_t - M_0}{M_t} \quad (IV-6)$$

M_t : la masse de l'échantillon après l'immersion

M_0 : la masse de l'échantillon avant l'immersion.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

Les essais de traction effectués sur les adhésifs massique après chaque durée d'immersion trouvés par Mr K. MADANI, ont donné les courbes de contrainte-déformation de l'adhésif présentés sur la figure IV-7. Le module d'Young a été calculé suite à ces essais, et les résultats trouvés sont montrés dans le tableau IV-2.

Module d'Young E (Mpa)	2680	1450	1000	750	625	500
Module de cisaillement G	1030.77	557.70	384.61	288.46	240.38	192.31
Taux d'absorption $\Delta M/M_0$	0.000	0.010	0.0125	0.0175	0.020	0.040

Tableau IV-2 : Les différentes propriétés mécaniques utilisées dans les calculs.

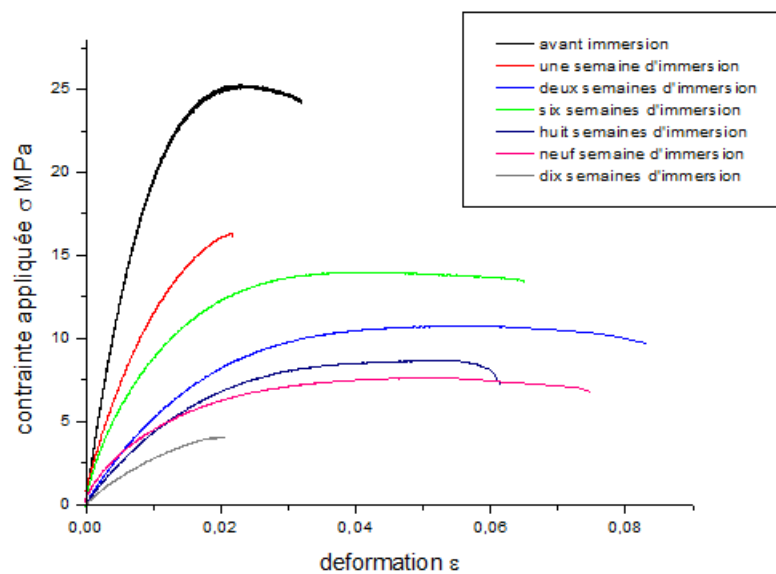


Figure IV-7: Courbes caractéristiques contrainte-déformation de l'adhésif courbe moyen pour différents temps d'immersion [8].

Et à partir de ces résultats (Tableau IV-2) on a tracé la courbe qui représente la variation des modules d'Young en fonction de taux d'absorption d'eau, pour expliquer l'effet de la présence des molécules d'eau sur la rigidité de l'adhésif.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

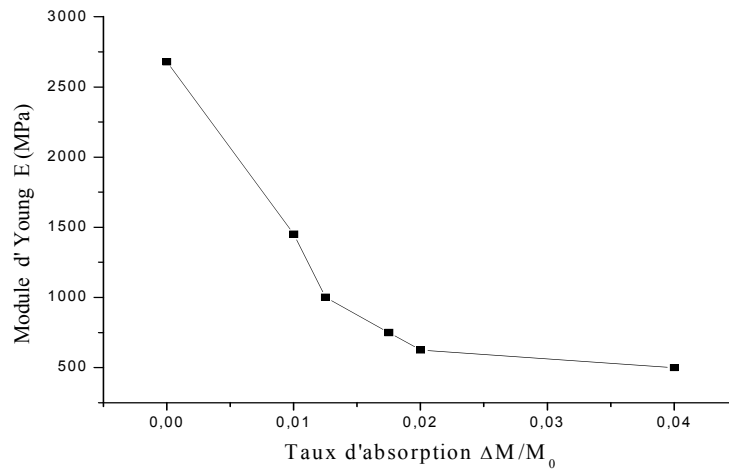


Figure IV-8: Variation des modules d'Young en fonction de taux d'absorption d'eau.

On remarque une chute considérable de module d'Young avec l'augmentation de taux d'absorption d'eau, c'est-à-dire que la résistance mécanique de l'adhésif diminue de manière significative avec l'absorption d'eau, le temps d'immersion a un effet considérable sur le comportement mécanique de l'adhésif, on note aussi après certain période, la résistance de l'adhésif demeure pratiquement constante en raison de la saturation en absorption d'eau. L'analyse des résultats expérimentaux du vieillissement de l'adhésif permet de faire les remarques suivantes : L'absorption d'eau conduit à une chute importante de la rigidité et de la contrainte à la rupture. En revanche, l'allongement à la rupture augmente avec la teneur en eau, ce qui traduit l'augmentation de ductilité du matériau. Ces différents effets résultent du phénomène de plastification induit par les molécules d'eau. Une reprise en eau entraîne nettement une réduction de la résistance essentielles, et plus la durée de vieillissement est importante plus l'adhésif perd ses propriétés mécaniques et les caractéristiques de résistance essentielles.

IV-6. Modélisation numérique avec la méthodes d'élément fini (3D)

IV-6. 1. Le modèle géométrique

Le modèle géométrique pour le joint adhésif collé à simple recouvrement utilisé dans l'analyse par éléments finis est effectué sur deux plaques minces en aluminium 2024-T3 avec l'adhésif époxyde ADEKIT structural A140. Les deux plaques sont collées avec l'adhésif suivant l'indication de la figure IV-9, cette géométrie a été déjà analysée en chapitre II. Les

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

dimensions avec les propriétés mécaniques de joint à simple recouvrement étudiée sont les mêmes de chapitre II.

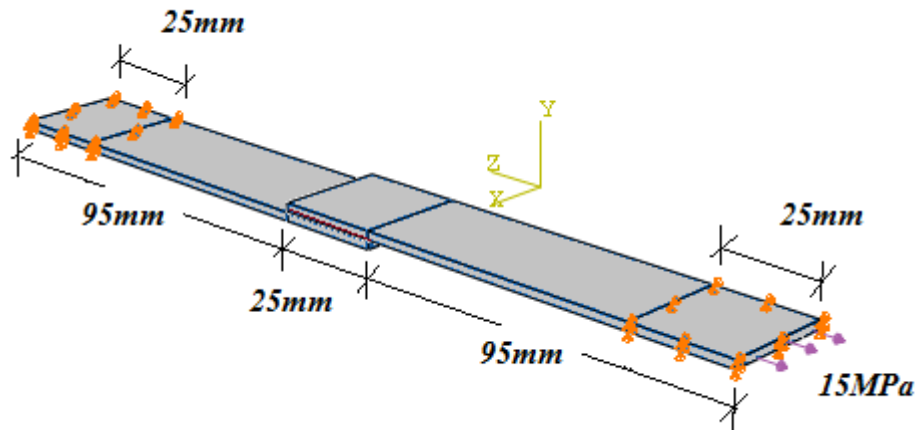


Figure IV-9: Modèle géométrique de joint adhésif collé à simple recouvrement.

IV-7. Analyse et résultats

Pour étudier l'état des contraintes avant et après le vieillissement pour des adhésifs avec et sans défauts, on a tracé des courbes qui représentent la distribution des contraintes le long de la ligne centrale de la couche d'adhésif pour différents cas.

- **1^{er} Cas: Adhésif avant le vieillissement et sans défauts**

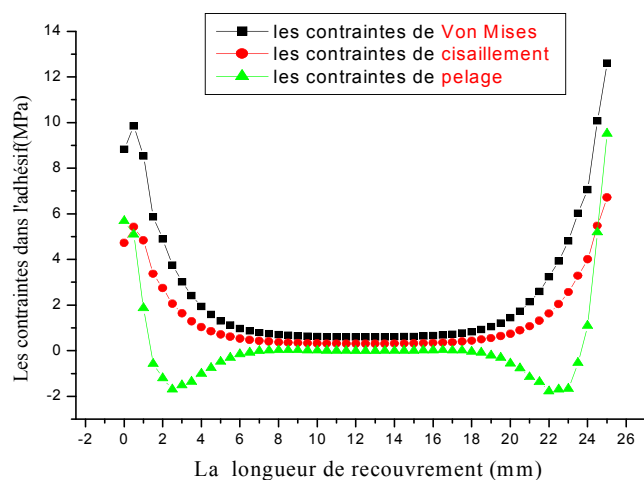


Figure IV-10: Distribution des contraintes dans l'adhésif sans vieillissement.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

Une comparaison des contraintes de Von Mises, de cisaillement et de pelage le long de la ligne centrale dans la couche d'adhésif est représentée dans la figure IV-10.

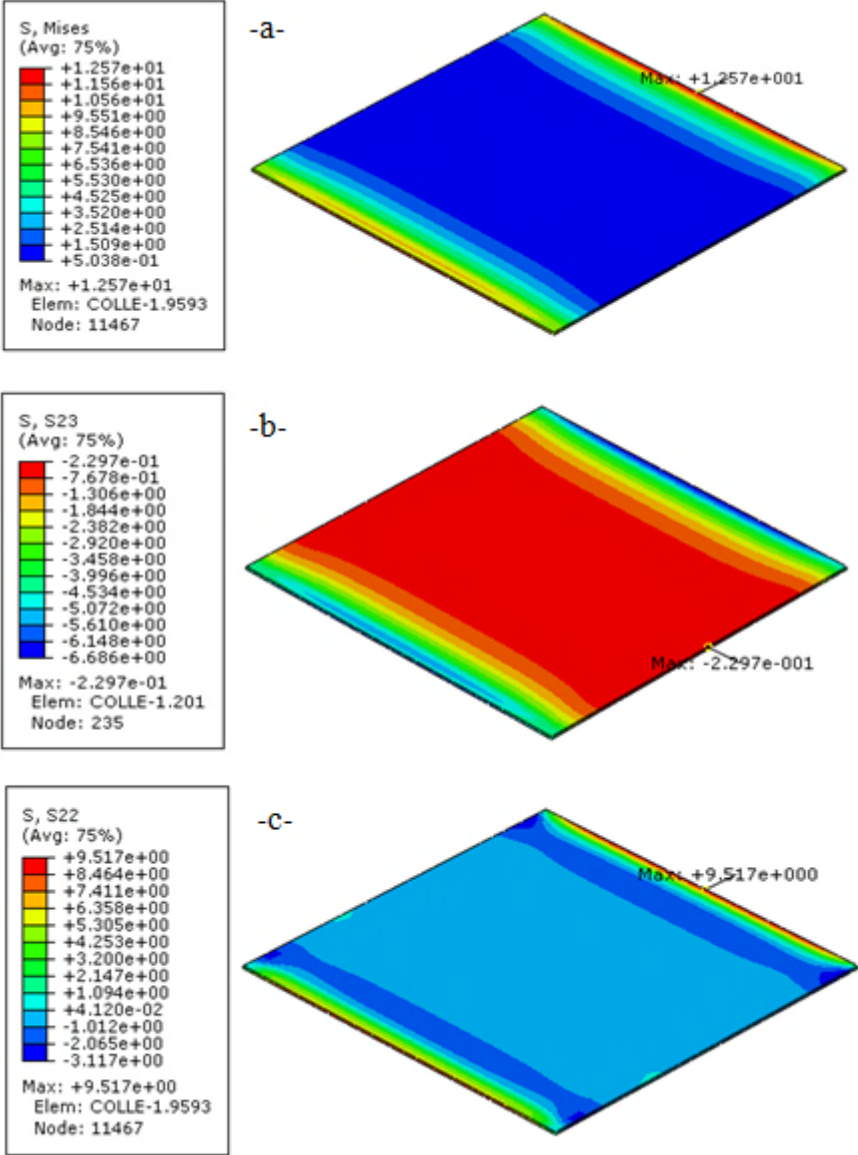


Figure IV-11: Variation des contraintes de, a)- Von mises, b)- de cisaillement, et c)- de pelage dans l'adhésif.

La distribution des contraintes dans l'adhésif pour le joint à simple recouvrement modelées avec la méthode d'élément fini tridimensionnels sont montrées dans la figure IV-10. On peut observer que, la distribution des contraintes suit les mêmes évolutions, une concentration forte

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

aux deux extrémités communes dans les bords libre du recouvrement. Cependant, les valeurs absolues des contraintes de cisaillement sont négligeables relativement aux autres contraintes. La figure IV-11 montre la répartition des contraintes de Von Mises, de cisaillement et de pelage dans l'adhésif ces contraintes sont symétriques le long des axes horizontaux et verticaux de l'adhésif et montre une forte concentration au niveau du bord libre du recouvrement.

• 2^{ème} cas: Adhésif après le vieillissement et sans défauts

Cette section concerne la répartition des contraintes, de Von Mises, de cisaillement, et de pelage, dans adhésif vieilli. La figure IV-12 représente la variation des contraintes, en fonction de la longueur de recouvrement pour différents temps d'immersion (absorption d'eau). Il est connu que les adhésifs vieillis sont caractérisés par une faible module de cisaillement, qui permettent d'atténuer les efforts transmis à l'adhésif. Dans la figure IV-12, la courbe de la variation des contraintes en fonction de la longueur des adhésifs pour différents temps d'immersion par l'adhésif, les contraintes diminuent lorsque la durée d'immersion augmente, cette variation est plus marqué lorsque le temps d'immersion est important (neuf semaines d'immersion). L'influence du vieillissement de la couche d'adhésif sur la répartition des contraintes de Von Mises, de cisaillement, de pelage, et après une semaine et neuf semaines d'immersion est représenté dans la figure IV-13. On peut voir d'après cette figure IV-13, que les contraintes diminuent lorsque le temps d'immersion croissante due à les efforts transmis par l'adhésif.

Les contraintes maximales	Avant vieillissement	Une semaine	Deux semaines	Six semaines	Neuf semaines
Von Mises	12,64	9,82	7,88	6,2	4,69
Cisaillement	6,72	5,16	4,18	3,31	2,52
Pelage	9,57	7,51	6,28	5,22	4,1

Tableau IV-3: Les valeurs maximales des contraintes de, Von mises, de cisaillement, et de pelage dans l'adhésif pour différent temps d'immersion.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

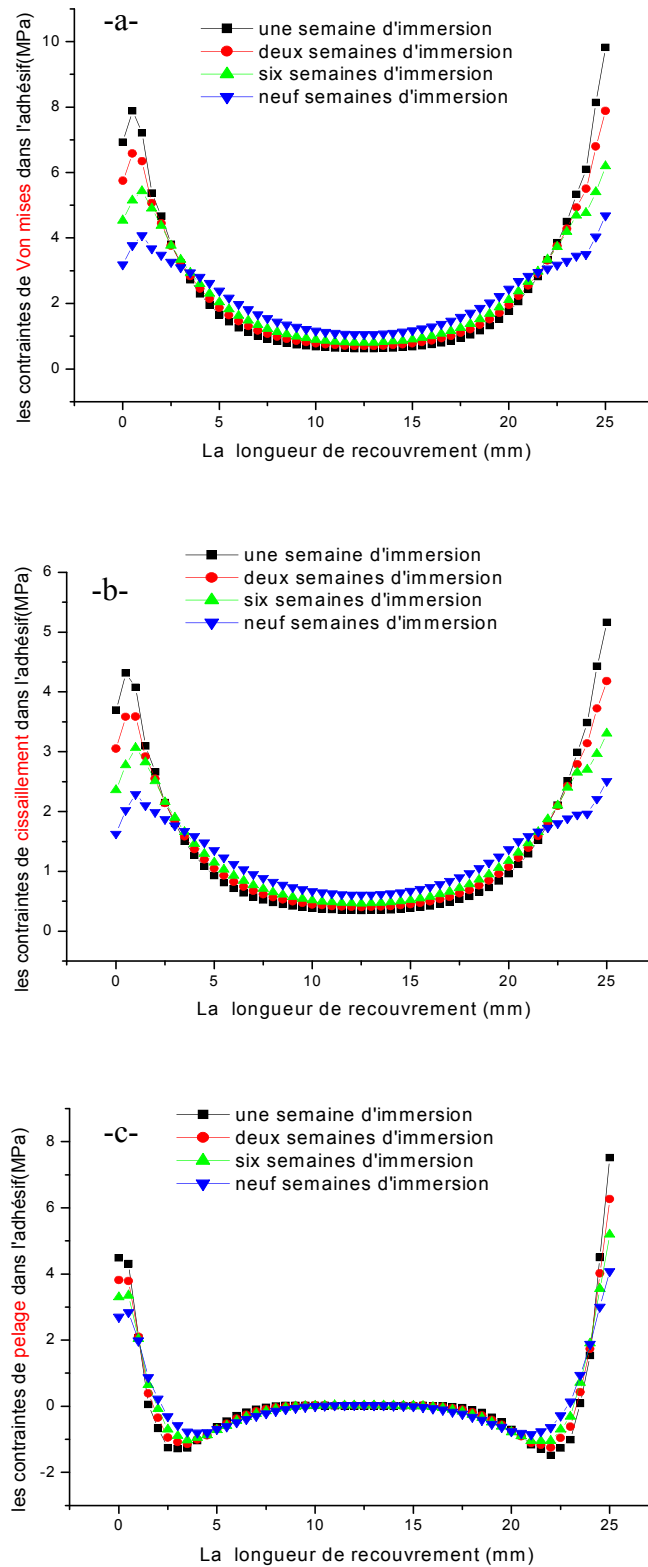
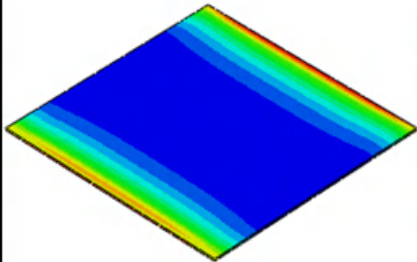
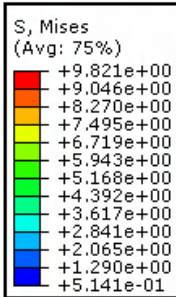


Figure IV-12: Distribution des contraintes dans l'adhésif, pour différents temps d'immersion suivant la longueur de recouvrement.

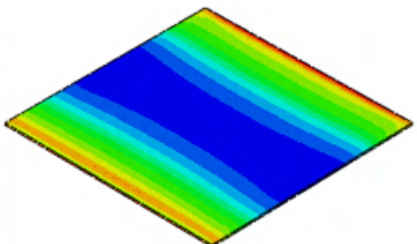
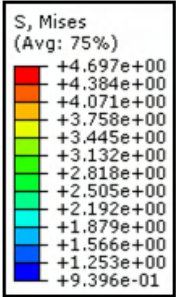
Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

- Les contraintes dans l'adhésif pour une semaine et neuf semaines d'immersion

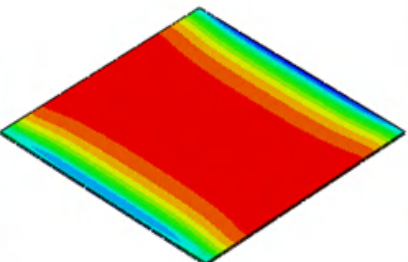
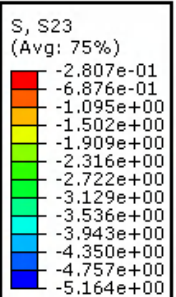
Von Mises après une semaine d'immersion



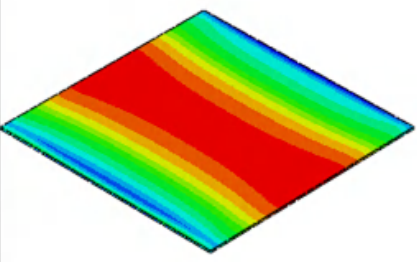
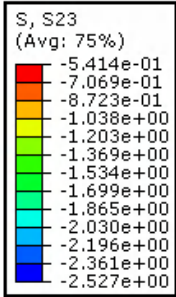
Von Mises après neuf semaines d'immersion



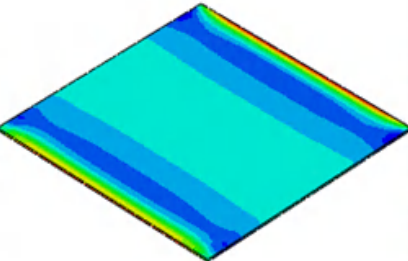
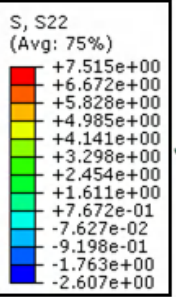
Cisaillement après une semaine d'immersion



Cisaillement après neuf semaines d'immersion



Pelage après une semaine d'immersion



Pelage après neuf semaines d'immersion

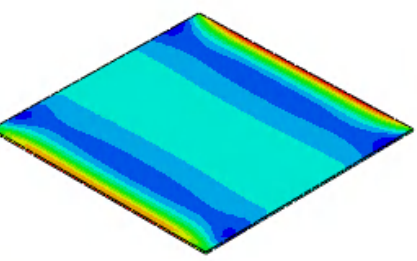
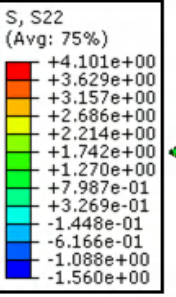


Figure IV-13 : Distribution des contraintes pour une semaine et neuf semaines d'immersion.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

• 3^{ème} Cas: Adhésif après le vieillissement et avec défaut

Après analyser l'effet de vieillissement de l'adhésif sur la répartition des contraintes, on a trouvé utile de calculer les contraintes dans l'adhésif vieilli avec la présence du défaut. Les configurations des défauts choisis dans la couche d'adhésif sont montrées dans la figure IV-14.

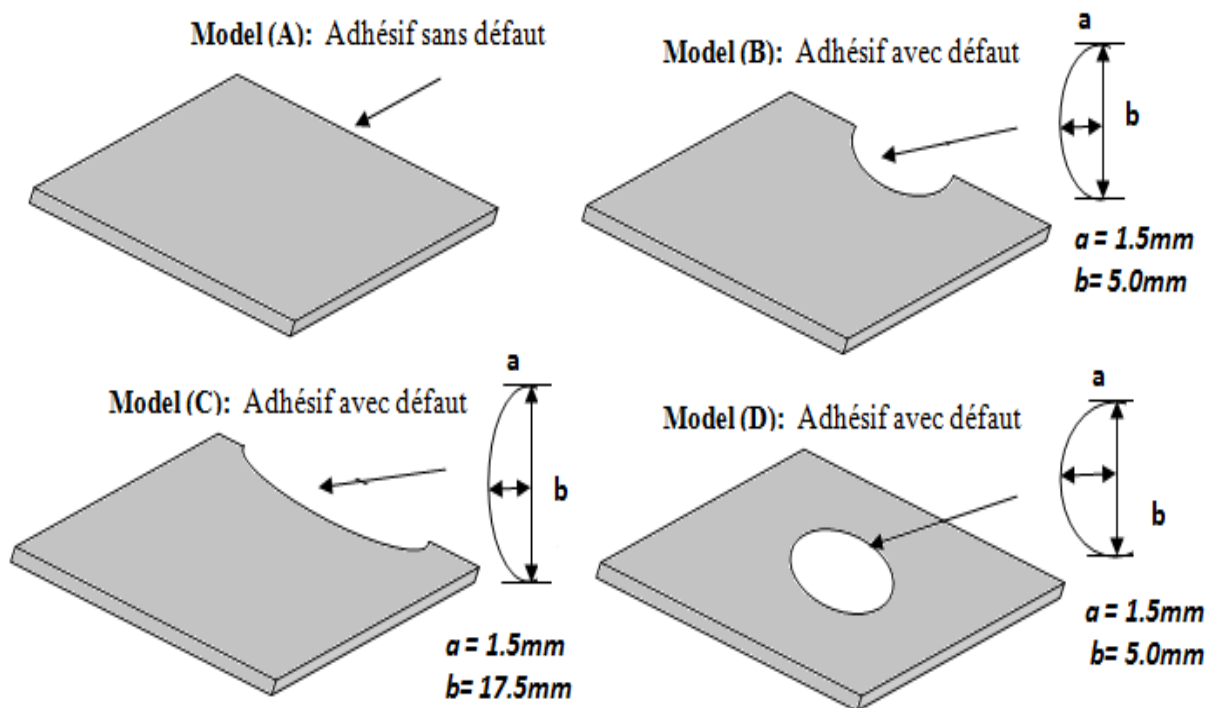


Figure IV-14: Les modèles géométriques des adhésifs utilisés avec les dimensions des défauts.

Les figures (IV-15, IV-16, IV-17) représentent respectivement la répartition des contraintes dans l'adhésif de Von Mises, de cisaillement, et de pliage, pour différents temps d'immersion pour tous les modèles avec et sans défaut, suivant la longueur de recouvrement.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

- Les contraintes de **Von Mises** dans l'adhésif

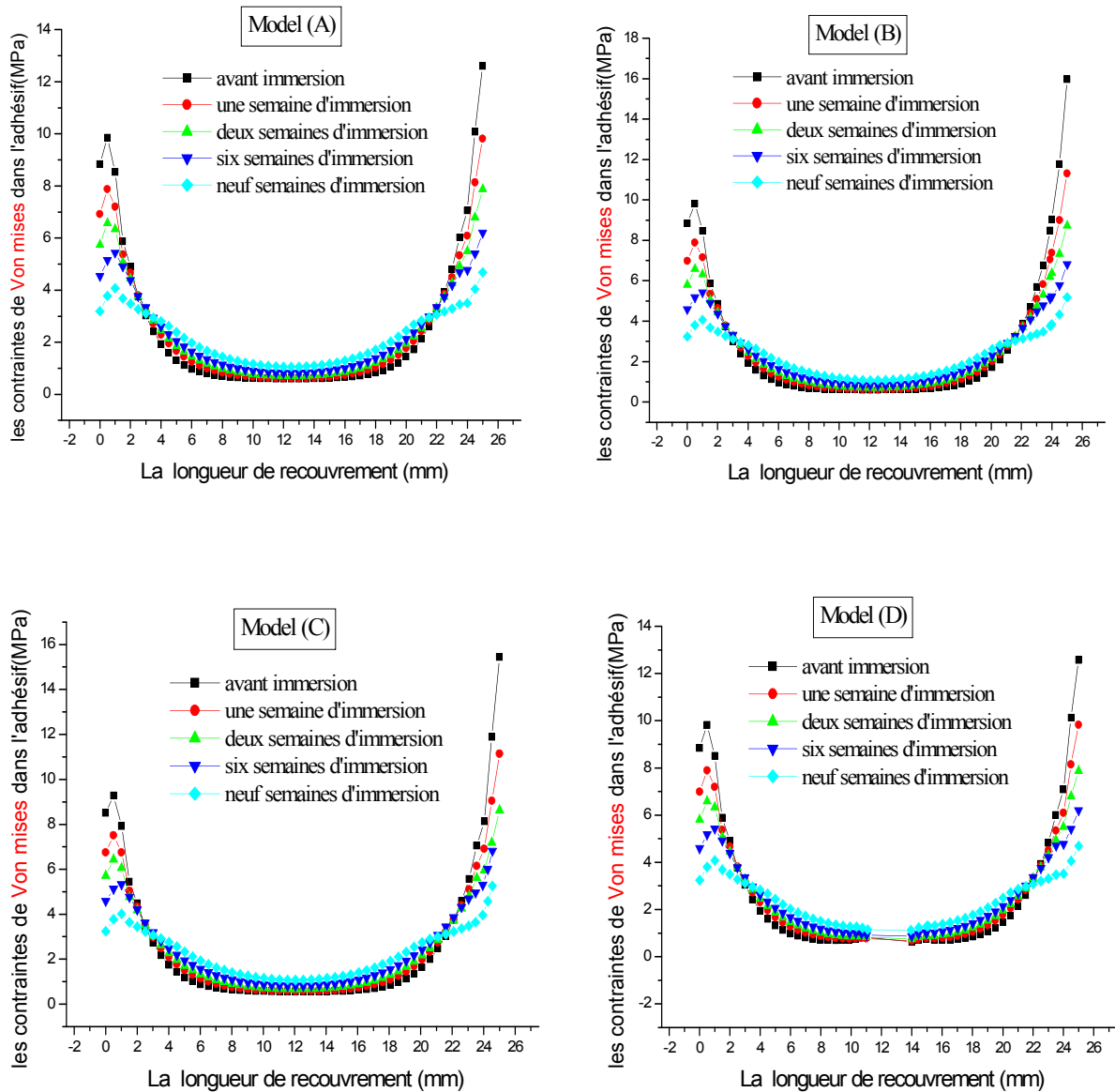


Figure IV-15: Distribution des contraintes de Von mises dans l'adhésif, pour différents temps d'immersion suivant la longueur de recouvrement.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

- Les contraintes de cisaillement dans l'adhésif

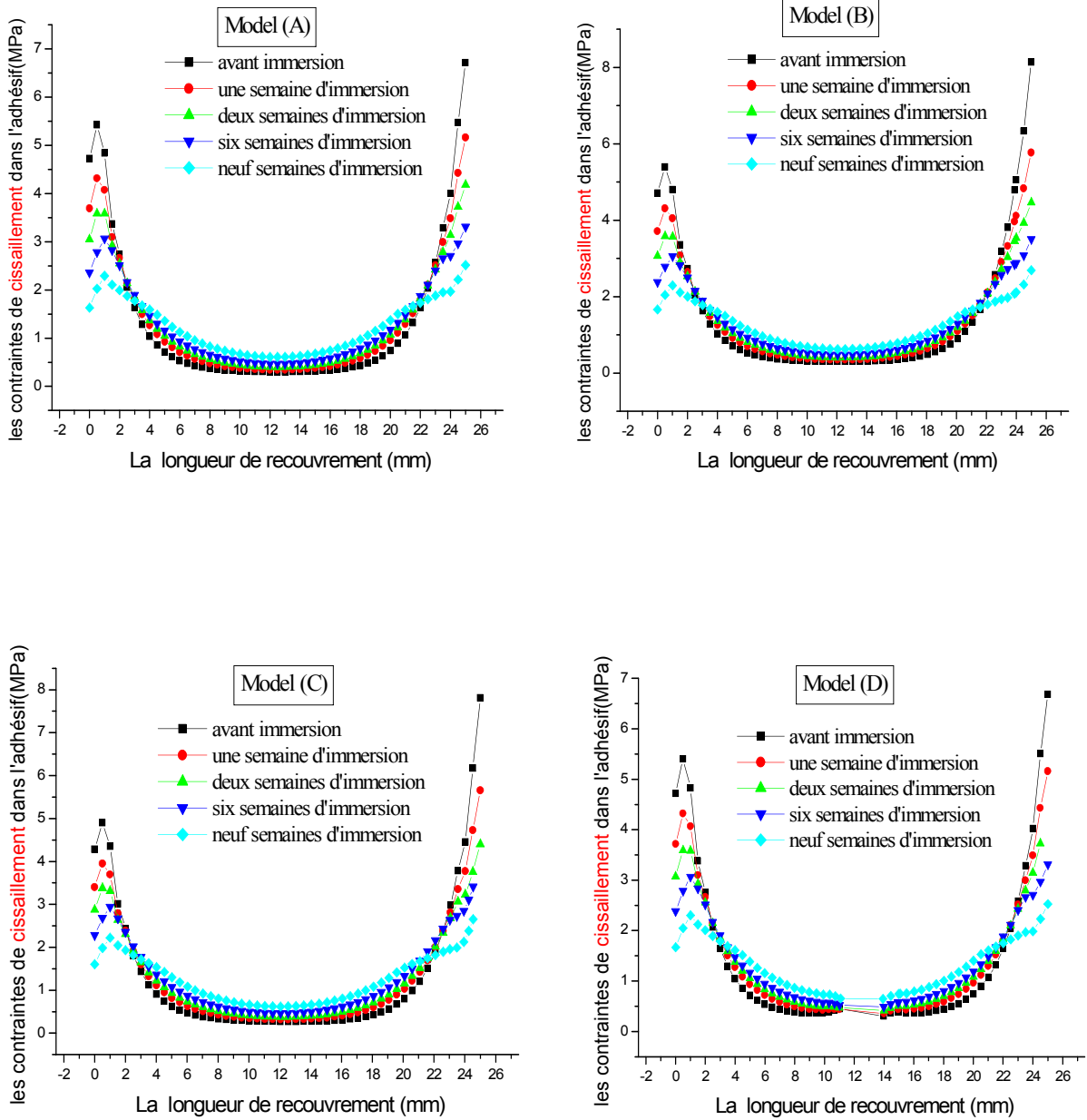


Figure IV-16: Distribution des contraintes de cisaillement dans l'adhésif, pour différents temps d'immersion suivant la longueur de recouvrement.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

- Les contraintes de **pelage** dans l'adhésif

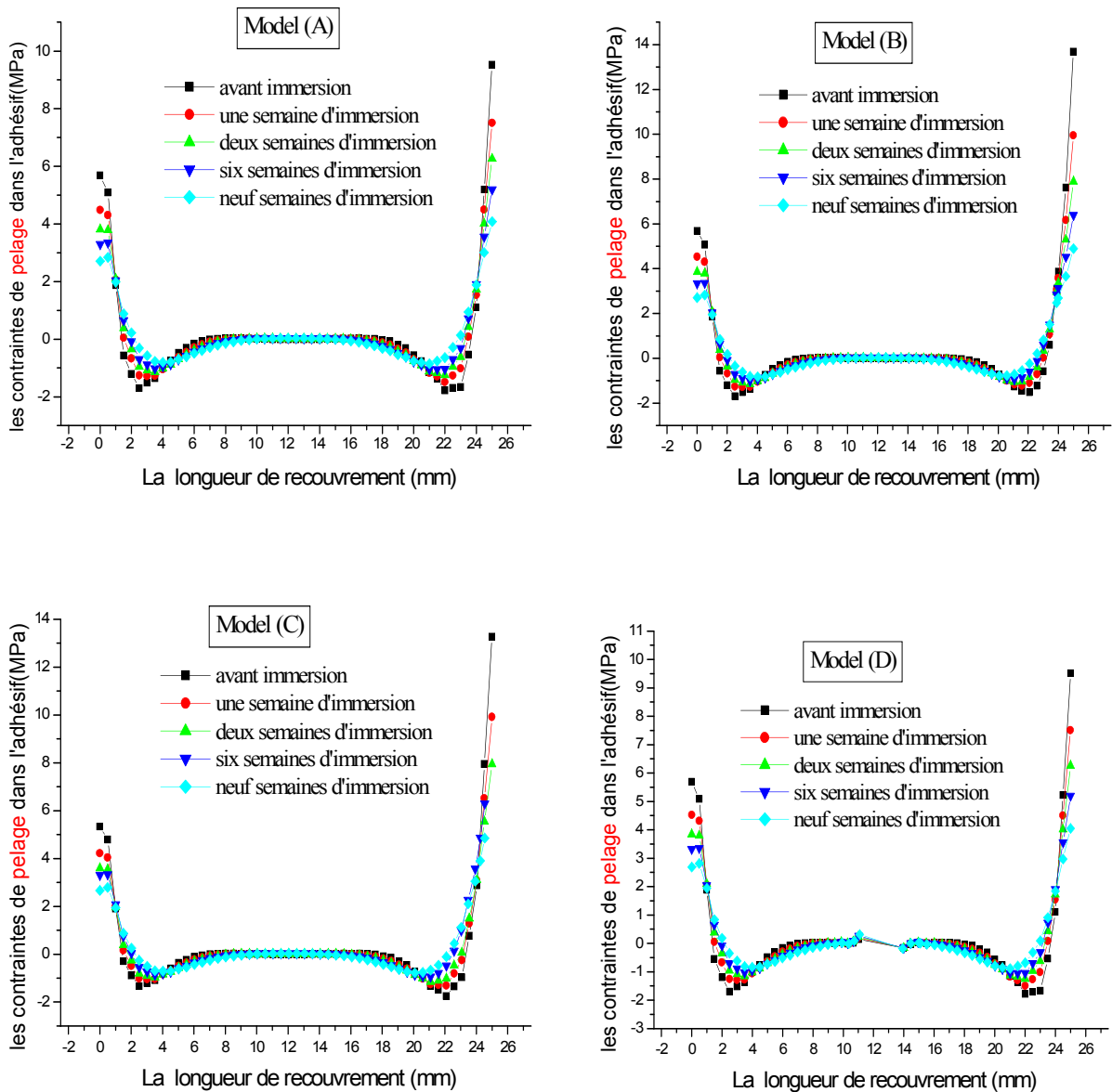


Figure IV-17: Distribution des contraintes de pelage dans l'adhésif, pour différents temps d'immersion suivant la longueur de recouvrement.

D'après les figures (IV-15, IV-16, IV-17), la variation des contraintes varie de la même manière pour une adhésif vieillis et non vieillis et suivent les mêmes évolutions, une diminution des contraintes avec l'augmentation de la durée d'immersion, sauf que les contraintes de Von Mises est peu élevée dans l'adhésif pour tous les cas étudiés. De même si l'adhésif sera exposé à l'eau, il perd ses propriétés mécaniques, plus la durée d'immersion est

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

longue plus il y aura une chute considérable des caractéristiques mécaniques (module d'Young et module de cisaillement de l'adhésif) donc l'adhésif absorbe les contraintes.

On remarque clairement que une longue durée d'immersion de l'adhésif engendre une réduction des contraintes, ce comportement est dû au fait que, quand le temps d'immersion augmente la rigidité de l'adhésif devient moins significative et sa ductilité augmente.

On peut noter qu'aux présences des défauts, le vieillissement de l'adhésif n'aura pas d'influence sur la distribution des contraintes pour les différentes modèles. Sauf que pour le cas ou la présence des défauts aux extrémités, les contraintes soient plus hautes comparativement autre cas, on constate également que l'effet de la présence des défauts sur les contraintes au niveau des extrémités est très significatif, elles sont plus important dans les bords que les défauts centrales.

L'écart entre les contraintes dans l'adhésif vieillis et non vieillis dépend fortement de la présence de défaut et de sa position. Ceci est montré clairement dans la figure IV-18.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

- Comparaison de la distribution des contraintes de Von mises dans l'adhésif avec et sans défaut après le vieillissement

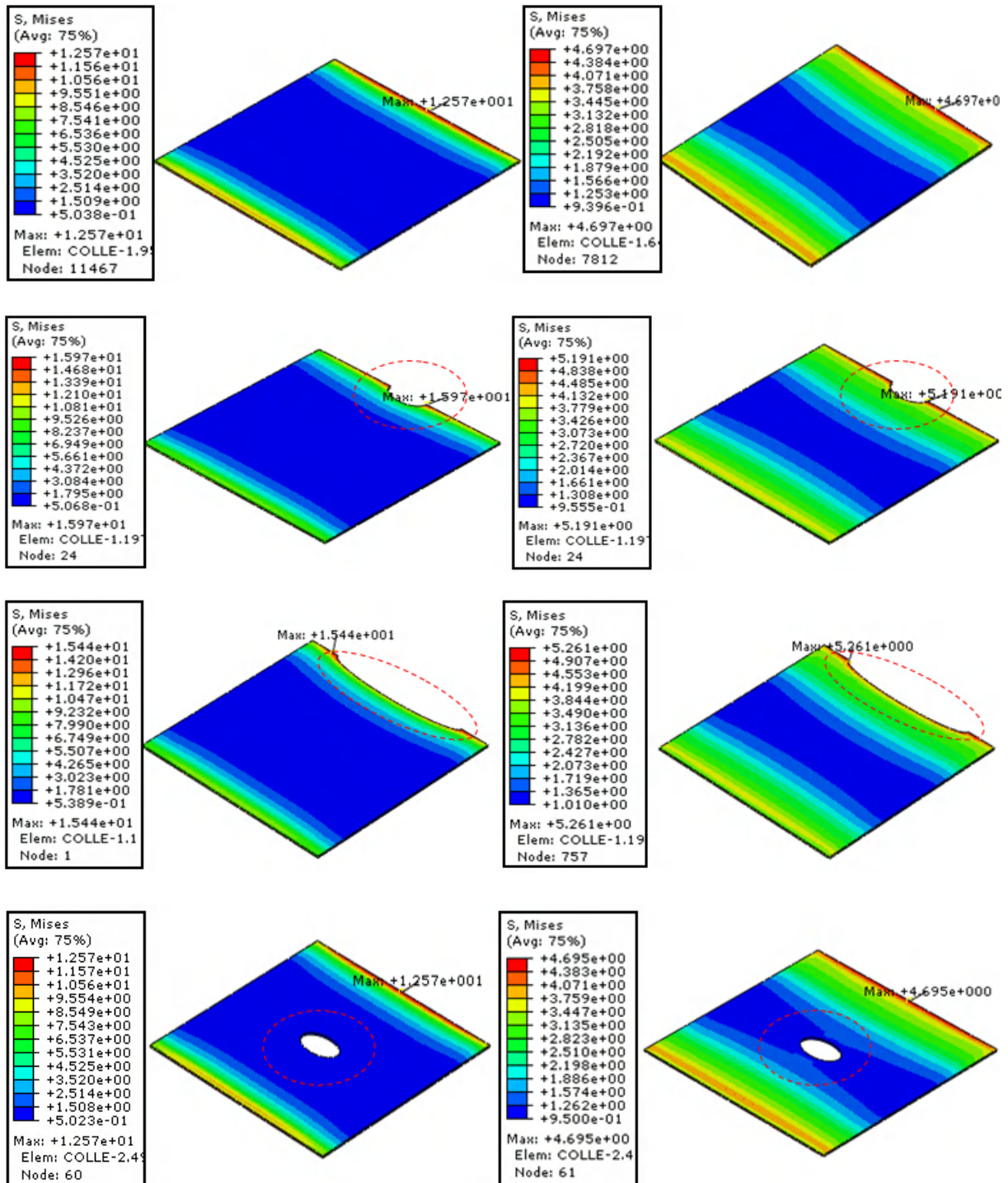


Figure IV-18: Distribution des contraintes dans l'adhésif sans vieillissement suivant le long de la ligne centrale de la couche d'adhésif.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

- Variation des contraintes maximales dans l'adhésif avec et sans défaut, de Von mises, de cisaillement, et de pelage pour différents temps d'immersion.

Pour voir clairement l'effet de la présence des défauts au cours de vieillissement on a tracé les histogrammes de la comparaison des contraintes maximales dans l'adhésif avec et sans défaut.

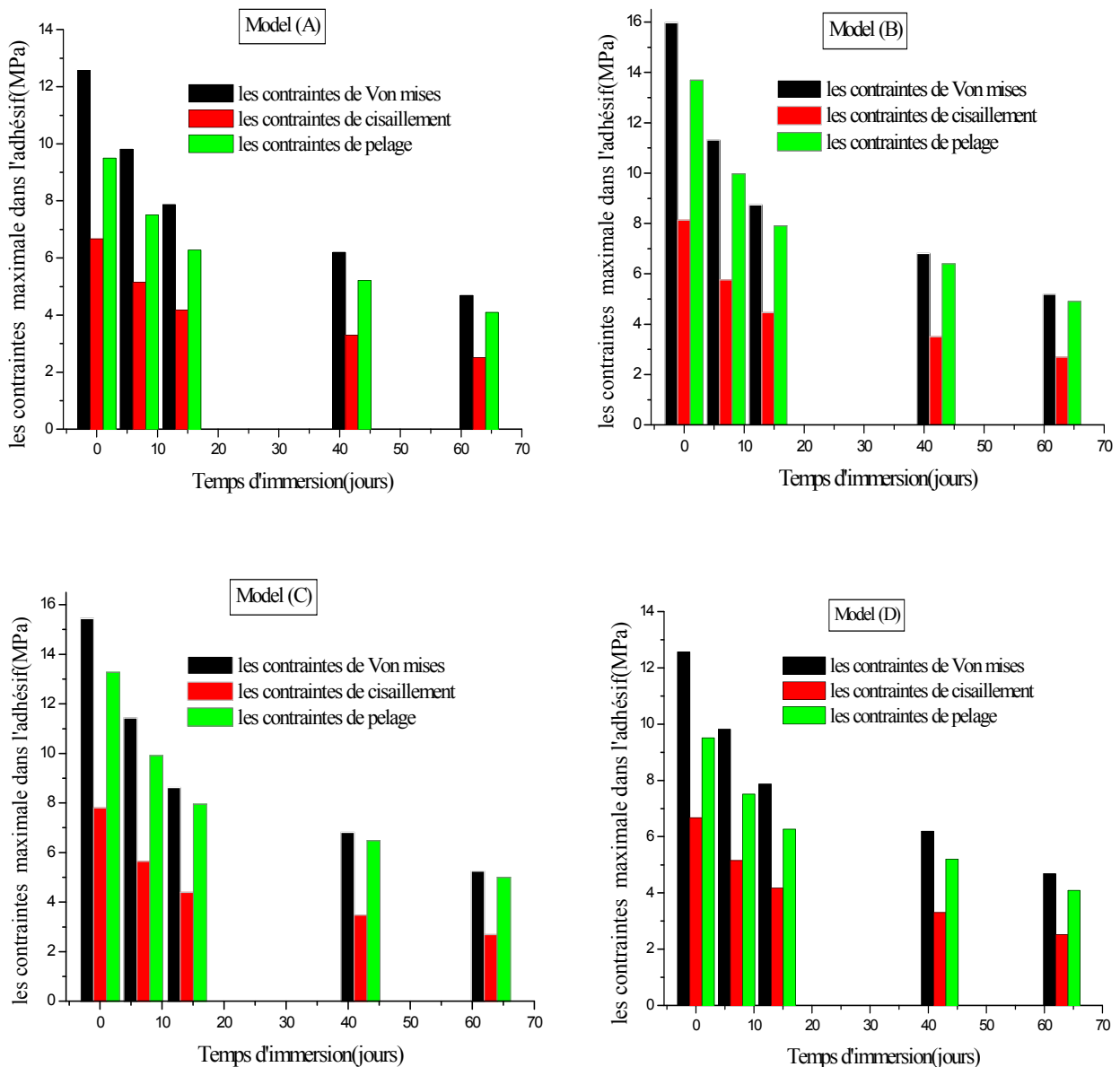


Figure IV-19: Distribution des contraintes maximales dans l'adhésif, pour différents temps d'immersion.

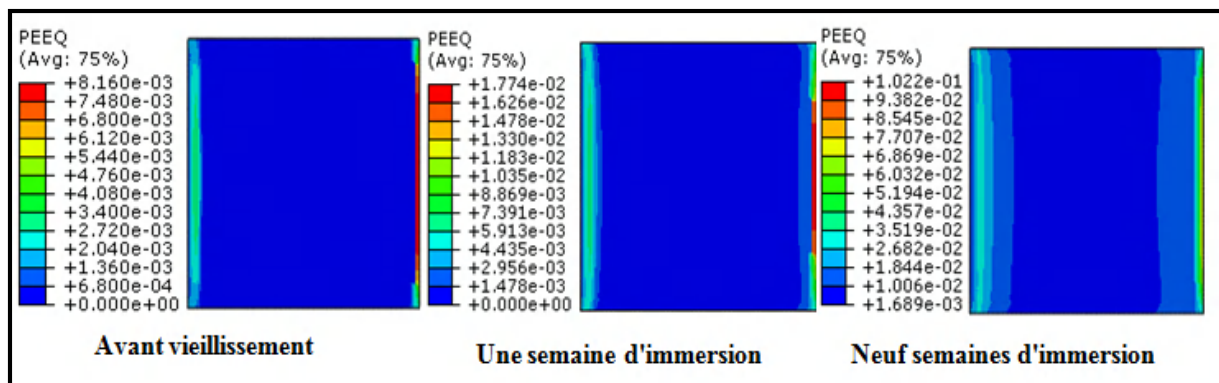
Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

La figure IV-19 montrent clairement que la distribution des contraintes maximales dans l'adhésif varie en fonction de la durée d'immersion dans tout les cas étudiés, une diminution considérable des contraintes maximales avec l'augmentation de temps d'immersion. La dégradation des propriétés mécaniques de l'adhésif provoque une réduction dans les contraintes, Il est également évident qu'une couche de l'adhésif a un plus haut module d'Young comme conséquence des contraintes plus élevés. L'effet du vieillissement de l'adhésif apparait plus clairement au présence des défauts au niveau des extrémités.

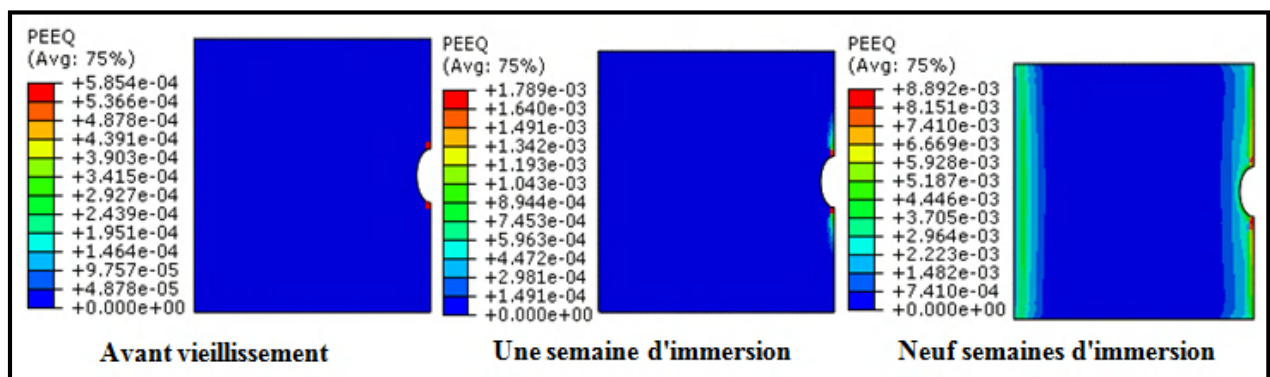
- **Visualisation des déformations plastiques équivalentes (PEEQ) dans l'adhésif avec et sans défaut, avant et après le vieillissement.**

On choisit de définir un critère de rupture en déformation plastique équivalente (PEEQ) avant et après le vieillissement.

1^{ère} Modèle :

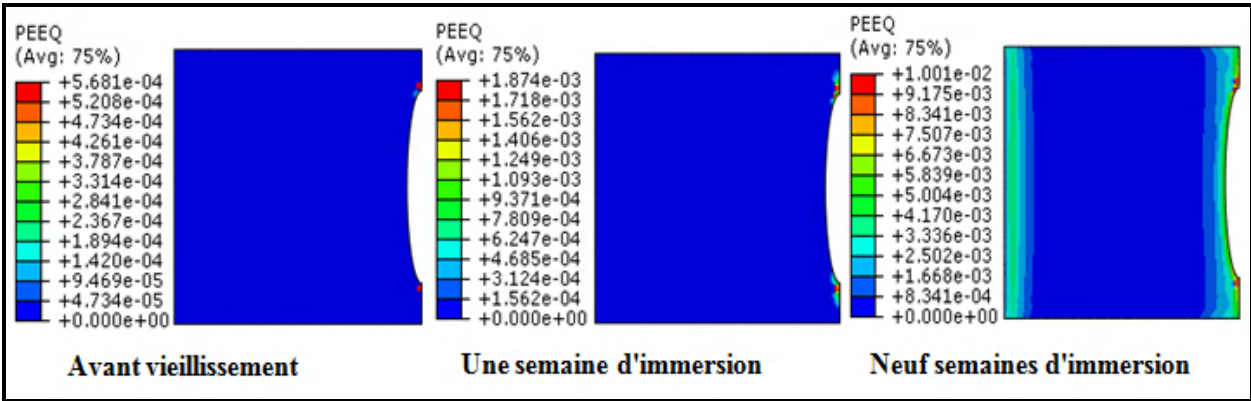


2^{ème} Modèle :



Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

3^{ème} Modèle :



4^{ème} Modèle :

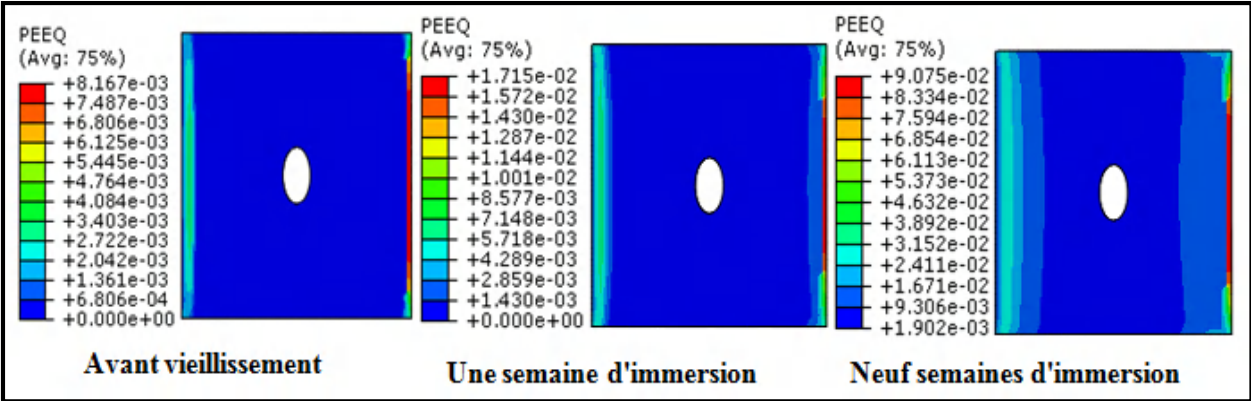


Figure IV-20: Déformations plastiques équivalentes (PEEQ) dans l'adhésif avec avant et après le vieillissement.

A l'aide de code de calcul Abaqus, on a déterminé la déformation plastique équivalente limite (PEEQ) correspondant au temps de vieillissement étudié pour l'adhésif avec et sans défaut. On montre, que l'évolution de la déformation plastique dépend fortement de la durée de vieillissement.

Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

IV-8. Conclusion

La dégradation des propriétés mécaniques du matériau est causée par la modification des propriétés physique de l'adhésif qui est due non seulement à l'absorption de l'eau et mais également en raison des variations de l'environnement (l'humidité, la température). En conséquence, cette modification physique affaiblira les propriétés mécaniques et réduit considérablement la résistance globale des assemblages collés. Des résultats expérimentaux avec une modélisation numérique par l'élément finis étudié dans ce chapitre nous ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- L'absorption d'eau par l'adhésif augmente sa ductilité et réduit sa rigidité, donc les matériaux secs étant toujours les plus résistants et les matériaux humides étant toujours les plus fragiles ;
- L'absorption d'eau se traduit par une diminution des caractéristiques mécaniques, une reprise en eau entraîne nettement une réduction de la résistance mécanique de l'adhésif ;
- La dégradation des proportions mécaniques de l'adhésif est provoquée une réduction des contraintes maximales. Et un adhésif légèrement plus rigide mènerait pour abaisser considérablement les contraintes maximales dans les assemblages collés ;
- On peut optimiser l'absorption d'eau pour arriver à un équilibre entre l'efficacité et la longévité de l'adhésif, plus la durée de vieillissement est importante plus l'adhésif perd ses caractéristiques de la résistance essentielles ;
- L'effet de la présence des défauts au cours de vieillissement sur les contraintes maximales reste échangé, plus précisément, ces contraintes maximales sont situées proches de l'interface adhérent/adhésif, côté adhésif. Cette répartition pour toutes les contraintes, à savoir de cisaillement, de pelage, et de Von Mises.

En effet, la diffusion des molécules d'eau au sein de l'adhésif ou au niveau des interfaces peut engendrer un phénomène de plastification, se traduisant par une diminution de la température de transition vitreuse et une chute des propriétés mécaniques du joint de colle, des


Chapitre IV : L'effet de vieillissement de l'adhésif avec et sans défauts sur la distribution des contraintes

phénomènes d'hydrolyse qui tendent à réduire la densité de réticulation et sont également pénalisantes vis-à-vis des propriétés mécaniques de l'adhésif.

IV-8. Références

- [1]. Thèse, Céline GROS, Durabilité de joints adhésifs silicone sous conditions environnementales sévères : application au packaging en électronique de puissance, (2006).
- [2]. Thèse, Marie Pierre FOULC, durabilité des assemblages par colles : état de l'art. (2008).
- [3]. A. NACERI, et A. VAUTRIN, Caractérisation du comportement mécanique d'un composite (tissu de verre/résine époxyde) à différentes périodes de vieillissement hygrothermiques, (2006).
- [4]. Schierffer Anne, Maire Jean-François et Lévêque David, Analyse multiechelle du vieillissement et du comportement thermomécanique de composites a matrice organique, (2005).
- [5]. Thèse, Romain LEGER. Contribution à l'étude de la durabilité des structures collées soumises à des efforts mécaniques après vieillissement humide , (2010).
- [6]. Thèse, Julien Mercier, Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites, (2006).
- [7]. Thèse, Marie-Anne Bruneaux, Durabilité des assemblages colles: modélisation mécanique et physico-chimique, (2004).
- [8]. Thèse, Kouider Madani, Etude numérique et expérimentale de la technique de réparation des fissures Dans les structures aéronautiques par patch en composite, (2007).

Chapitre V



Influence des défauts de collage sur le facteur
d'intensité de contrainte et le déplacement
d'ouverture de fissure dans les plaques
fissurées et réparées par patch

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

V-1. Introduction:

Beaucoup de composants d'ingénierie contiennent des discontinuités géométriques, telles que des épaulements, rainures de clavette, trous d'huile et cannelures, généralement regroupées sous le terme générique d'entailles. Quand un composant entaillé est chargé, des concentrations locales de contraintes et de déformation sont produites dans la zone entaillée. Les contraintes dépassent souvent la limite de résistance du matériau dans une petite région autour de l'entaille, même pour des contraintes nominales élastiques relativement faibles.

Les concentrations locales de contraintes et de déformation ne causent habituellement pas la détérioration de la force statique d'un composant fait à partir d'un matériau malléable, bien qu'une déformation plastique ait lieu à la tête de l'entaille. Quand un composant entaillé est soumis au chargement cyclique, cependant, la déformation en plastique cyclique dans la zone des concentrations de contraintes et de déformation peut sévèrement réduire la durée de vie du composant. Les contraintes non élastiques cycliques peuvent causer le déclenchement des fissures dans ces régions fortement soumises à une contrainte et leur croissance ultérieure pourrait mener à la rupture du composant.

L'entaille, au sens strict du terme, n'est pas la seule particularité morphologique susceptible de créer une concentration de contraintes. Les épaulements, les trous et, en règle générale, toutes les discontinuités de forme provoquent le même phénomène. Afin de bien illustrer ce problème, nous commençons par une plaque en présence d'un trou sous traction. En effet, sans la présence d'un trou, les lignes de contraintes sont homogènes. Mais après la réalisation d'un trou, la trajectoire de ces lignes sera modifiée (Figure V-1) [1].

Le but de la présente étude est d'analyser les effets de différentes propriétés de patch et l'épaisseur de l'adhésif avec et sans défaut dans l'adhésif, sur le facteur d'intensité de contraintes dans une plaque d'aluminium avec une entaille circulaire centrale, et on suppose l'existence d'une fissure émanant d'entaille réparée avec des patches simples et doubles. Le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure sont calculés en utilisant un code de calcul développé par Ratwani [2]. Le programme calcule le facteur d'intensité de contrainte pour les plaques fissurées et réparées par des patch simples et doubles. Le programme calcule également le déplacement d'ouverture de fissure à la ligne médiane de la fissure.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

V-2. Descriptions mécanique d'une fissure

La rupture ou l'endommagement par fissuration est avant tout la création de la surface de discontinuité. L'échelle dimensionnelle de cette discontinuité surfacique dépend, en fait, directement du moyen de mesure utilisé, et de la nature de l'approche recherchée. Ces fissures sont présentes dans toutes structures, elles peuvent exister sous forme de défauts de base dans le matériau ou peuvent être induites durant la construction. Une étude basée sur une analyse élastique, a montré que les fissures sont représentées comme une séparation plane bordée à l'intérieur du matériau. Ces fissurations sont responsables de la majorité des ruptures qui se produisent dans les structures par deux mécanismes physique essentielles (rupture fragile - rupture ductile). Ces derniers peuvent intervenir selon deux types essentiels de fissuration : Fissuration brutale : Pour les matériaux à très haute résistance où la présence de petites fissures peut conduire à une rupture brutale qui souvent ne s'accompagne pas de déformations plastiques macroscopiques par suite de la très faible ductilité du matériau du voisinage de la fissure. Fissuration successive : Cette fissuration peut intervenir sans déformations plastiques appréciables avec un grand nombre de variations de cycles de contraintes [3].

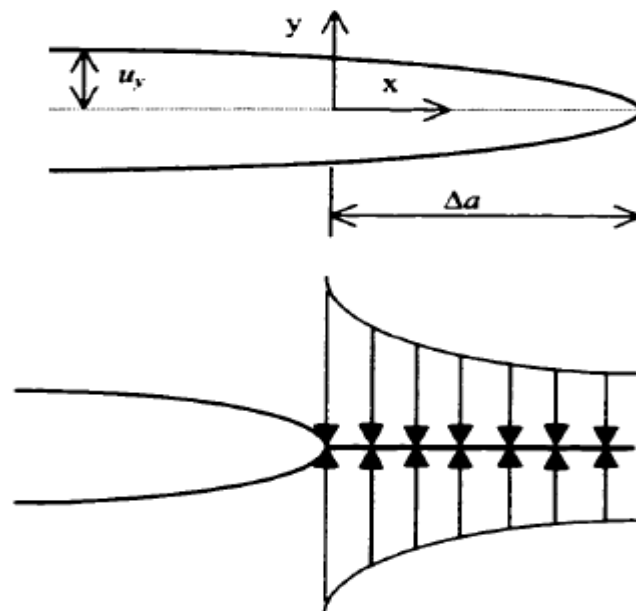


Figure V-1: Fissure semi-elliptique dans une plaque et au voisinage d'une entaille.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

Les lignes de trajectoires de contraintes peuvent être modifiées selon la forme et la taille de l'entaille, pouvant ainsi influencer sensiblement sur la concentration de contraintes. Dans la figure V-1, on peut voir un profil de contrainte à travers une coupe contenant une entaille interne elliptique. On note que la contrainte est maximale au bout de l'entaille et diminue avec l'augmentation de la distance loin de l'entaille.

V-2. 1. Facteur d'intensité de contrainte

Le facteur d'intensité de contrainte (FIC) désigné par K , dépend de la géométrie du corps fissuré, de ses dimensions et du mode de sollicitation.

D'après le critère de rupture d'Irwin, les champs de contraintes locaux autour de la pointe de fissure dans un matériau linéaire élastique peuvent être définis uniquement par le facteur d'intensité de contrainte K , et la rupture est censée intervenir lorsque ce facteur K dépasse une valeur critique K_c (caractéristique du matériau).

Donc la théorie d'élasticité permet de calculer les champs de contraintes au voisinage du fond de fissure. Dans le cas d'une plaque de dimensions infinies contenant une fissure centrale de longueur « $2a$ » soumise à une contrainte de traction (σ_∞) perpendiculaire au plan de la fissure (Figure V-2).

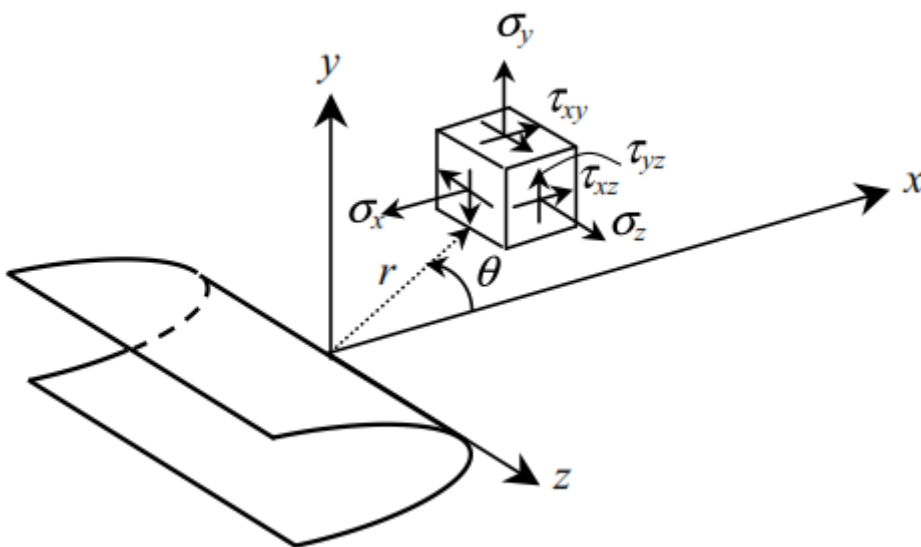


Figure V-2: La répartition des contraintes au voisinage du fond de fissure.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

Les contraintes au voisinage de la pointe de fissure sont données par les relations suivantes :

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\quad (V-1)$$

Sous une forme générale :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (V-2)$$

Avec :

r et θ : Coordonnées polaires du point considéré

$K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi a}$: Facteur d'intensité de contrainte en ($MPa\sqrt{m}$)

Un coefficient de correction « C » doit être ajouté à l'expression de K, prenant en compte les dimensions finies et la géométrie de l'éprouvette, et qui est donné pour chaque type d'éprouvette sous forme d'une fonction poly nominale du rapport (a/w) où w désigne la largeur de l'éprouvette soit :

$$K_I = C \sigma \sqrt{\pi a} \quad (V-3)$$

Dans le cas d'un chargement cyclique entre σ_{\max} et σ_{\min} , l'amplitude du facteur K est défini par :

$$\Delta K = C(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\sqrt{\pi a} \quad (V-4)$$

Soit :

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = K_{\max}(1-R) \quad (V-5)$$

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

Irwin a postulé que la condition $K \geq K_c$ représentait un critère de rupture, K et K_c sont données par les relations suivantes:

$$\begin{aligned} K &= C \sigma \sqrt{\pi a} \\ K_c &= C \sigma_c \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (\text{V-6})$$

Où σ_c est la valeur atteinte par la contrainte appliquée à la rupture.

La relation qui existe entre K et le taux de restitution d'énergie G permet de décrire le comportement mécanique des fissures. Pour les matériaux élastiques linéaires les deux paramètres K et G sont liés par deux équations indiquant que les deux approches (énergétique et locale) sont équivalents dans ce contexte.

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (\text{En contrainte plane}). \quad (\text{V-7})$$

$$G = \frac{K^2}{E} (1 - \nu) \quad (\text{En déformation plane}). \quad (\text{V-8})$$

Plusieurs méthodes permettant la détermination du facteur d'intensité de contrainte sont utilisées :

- Méthode du facteur de concentration de contrainte.
- Passage à la limite dans les calculs aux éléments finis.
- Méthode de superposition.
- Méthode de fonctions de Green.
- Méthode de fonctions de poids.

V-2. 2. Modes élémentaires de fissuration :

En vue de l'analyse élastique, les fissures sont représentées comme une séparation plane, irréversible d'un milieu continu en deux parties de part et d'autre d'une surface. En générale une fissuration se produit dans un matériau suivant quatre étapes :

- Plastification locale au voisinage des défauts et singularités géométriques.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

- Formations des fissures qui se réalisent à partir des chargements thermiques dépassant largement le seuil plastique.
- Propagation des fissures réelles naissantes. Souvent cette propagation est successive faisant augmenter la taille de la fissure jusqu'à atteindre une taille critique, entraînant une propagation brutale. Cette dernière étape est définie soit: par une déformation généralisée (striction), soit sans déformation importante (rupture fragile).

Irwin a montré qu'il existe trois mouvements cinématiques indépendants des lèvres de la fissure l'une par rapport à l'autre. (Mode I, II et III) définis comme suit :

Mode I : Est caractérisé par un déplacement des lèvres uniquement suivant la perpendiculaire au plan de fissuration ou à la direction de propagation (suivant l'axe oy), ce mode est considéré comme étant le plus fréquent et le plus souvent, le plus dangereux en mécanique de la rupture.

Mode II : Ce mode est engendré par un cisaillement dans le plan de la fissure et parallèle à l'axe (ox). Les déplacements de lèvres de la fissure sont parallèles à la direction de propagation et dans le même plan.

Mode III : Mode de cisaillement anti plan, situé dans le plan de la fissure (oxz) et // à oz , où les déplacements de lèvres de la fissure sont parallèles au fond de fissure.

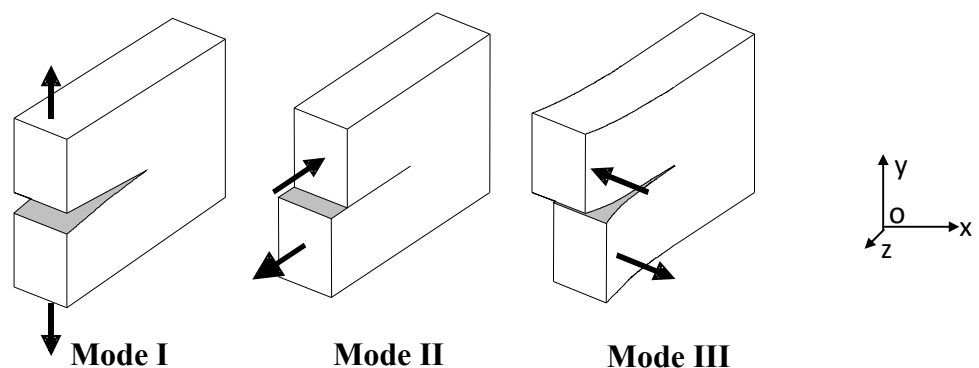


Figure V-3: Les trois modes fondamentaux d'ouverture de fissure.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

Une fissure peut être sollicitée selon les trois modes évoqués ci-dessus, et la solution d'un problème de fissure revient aussi à la détermination de K_I , K_{II} et K_{III} facteurs d'intensité de contrainte associée aux modes I, II et III [3].

V-2. 3. Taux de restitution d'énergie

Au cours de ses travaux sur la théorie de la rupture fragile, Griffith [4] a introduit le taux de restitution d'énergie, noté G correspondant à l'énergie libérée au cours de la propagation d'une fissure dans un solide parfaitement élastique. Selon Griffith, la rupture intervient au moment où une énergie suffisante est restituée pour la création de nouvelles surfaces de rupture. Cette énergie provient de l'énergie élastique stockée dans le matériau et de l'énergie potentielle du système de chargement. Griffith [4] considère un solide d'épaisseur b , soumis à un chargement F , comportant une fissure de longueur $2a$. L'énergie libre totale du corps fissuré est égale à :

$$U = U_0 + U_s + U_E - W \quad (V-9)$$

Où :

U_0 : est l'énergie de déformation du corps non fissuré;

U_s : est l'énergie de surface due à la formation de la fissure;

U_E : est la variation d'énergie de déformation élastique due à l'introduction de la fissure;

W : est la variation du travail externe.

En fonction de l'énergie totale, Griffith a exprimé un critère de rupture sous la forme :

$$\frac{dU}{da} < 0 : \text{Fissure est instable (rupture fragile);}$$

$$\frac{dU}{da} = 0 : \text{Fissure est en équilibre;}$$

$$\frac{dU}{da} > 0 : \text{Fissure est stable (rupture ductile).}$$

L'énergie U_0 est indépendante de la fissure ; U_E et W sont fonctions du mode de chargement.

L'énergie de surface U_s est égale à $\frac{4a}{h} \gamma_0$; où γ_0 est l'énergie superficielle.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

Le taux de restitution d'énergie est défini par :

$$G = \frac{1}{B} \frac{\partial(U_E - W)}{\partial a} \quad (\text{V-10})$$

La rupture se produit lorsque l'énergie totale atteint un optimum. Elle survient, pour une contrainte appliquée donnée lorsque la taille de la fissure tend vers une valeur critique a_c . Dans ce cas, la valeur de l'énergie G correspond au taux de restitution de l'énergie critique (G_c) dont la valeur pour un matériau fragile est égale à deux fois l'énergie superficielle ($G_c = 2\gamma_0$). Dans le contexte élastique linéaire de la mécanique de la rupture, le taux de restitution d'énergie et le facteur d'intensité de contrainte sont liés par la relation de type :

$$G = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \quad (\text{V-11})$$

Avec: $E' = E$ en contrainte plane et $E' = E / (1+\nu^2)$ en déformation plane; μ et ν sont respectivement le module de cisaillement et le coefficient de Poisson.

Les deux paramètres, facteur d'intensité de contraintes et taux de restitution d'énergie sont essentiels pour la mécanique de la rupture, ils ne sont valides que pour un comportement élastique linéaire [5].

V-2. 4. Ecartement en fond de fissure (CTOD)

Wells [6] a remarqué lors d'une étude sur la ténacité d'un acier très ductile que la déformation en pointe de fissure est d'autant plus importante que le matériau est tenace. Cette observation conduit à proposer le déplacement d'ouverture en pointe de fissure notée CTOD comme critère de mesure de la ténacité à la rupture. Selon Wells le CTOD est défini par :

$$\text{CTOD} = 2 \cdot \delta_y \quad (\text{V-13})$$

Où : δ_y est le déplacement de la fissure suivant l'axe y .

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

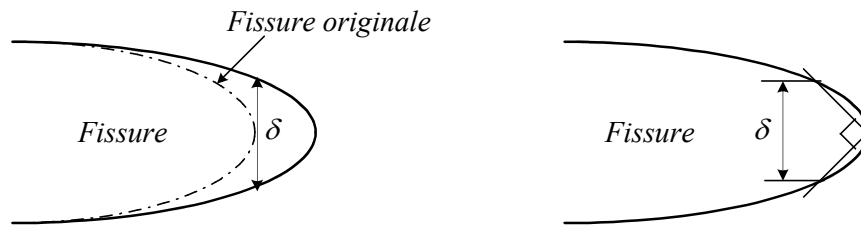


Figure V-4: Ouverture de la fissure.

L'analyse proposée par Wells tente de relier le CTOD au facteur d'intensité de contrainte K lorsqu'on est en régime de plasticité confinée. Irwin [7] a exprimé le déplacement des lèvres de la fissure pour les trois modes par :

$$\begin{aligned}
 u &= K_I \frac{\chi+1}{\mu} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \\
 v &= K_{II} \frac{\chi+1}{\mu} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \\
 w &= K_{III} \frac{\chi+1}{\mu} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2}
 \end{aligned}
 \tag{V-14}$$

Où : K_I , K_{II} et K_{III} sont les facteurs d'intensité de contraintes en mode I, II et III. u , v et w sont respectivement les déplacements des lèvres de fissure suivant x , y et z . ; $\chi = 3-4\nu$ en déformation plane et $\chi = (3-\nu) / (1+\nu)$ en contrainte plane.

Lorsque Rice a introduit l'intégrale J , il a étudié analytiquement la relation entre le CTOD et J dont l'expression est:

$$J = \sigma_0 (\text{CTOD})
 \tag{V-15}$$

Shih [8] a utilisé cette relation dans le cas d'un matériau obéissant à une loi de comportement de type Remberg-Osgood. Il a montré que le coefficient de linéarité entre le CTOD et J ne correspond pas à la limite élastique σ_e , mais au produit de σ_e par un facteur η . La relation (V-15) devient alors :

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

$$J = \eta \cdot \sigma_a \cdot CTOD \quad (V-16)$$

Où : η est un coefficient qui dépend du matériau.

V-3. Présentation de la technique de réparation

Afin de prolonger la durée de vie des structures, il existe plusieurs alternatives qui dépendent du niveau de ces dommages :

- Si la taille des fissures n'est pas trop importante, l'une des solutions souvent utilisées en maintenance est l'alésage de la pointe de fissure. Ceci a pour conséquence d'arrêter sa propagation;
- Si le niveau de dommages est trop important, les voilures sont tout simplement changées. C'est une solution très coûteuse car la voilure est usinée dans la masse. En effet, lors de la fabrication d'une voilure, il y a environ 95% de copeaux pour 5% de matière utile. De ce fait, l'ordre de grandeur du coût d'une voilure neuve est d'environ 1,5 million d'euros;
- Si des fissures apparaissent dans des zones moins critiques, elles peuvent être pontées par des matériaux composites. On parle de réparation dans ce cas.
- Si les fissures ne sont pas encore apparues, une solution plus prospective est envisagée. Un patch composite peut en effet être collé à proximité de la zone endommagée afin de la renforcer de manière préventive. On parle alors de renforcement [9].

V-3. 1. Condition de réparation:

Dans une dégradation structurale significative la réparation est obligatoire. Des conditions exigées à suivre sont :

- Aucune réparation qui existe au paravent;
- Une réparation superficielle pour corriger un dommage mineur;
- La réparation n'est pas économique et le composant doit être remplacé.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

Généralement, la réparation de restauration structurale devrait être simple, efficace, non encombrante et sans compromettre les fonctions des composants de la structure.

Quelque condition supplémentaires sur la réparation : exiger le temps de panne minimal de l'avion, employer les matériaux aisément disponibles, enlever le minimum de matériau sain lors du traitement, réduire la dégradation ou les dommages des régions voisines, utiliser des procédures et des outillages simples.

V-3. 2. Différent types de réparation:

Des patches en matériaux composites sont classiquement utilisés dans l'aéronautique pour la réparation des structures métalliques présentant des dommages de type fissures, criques ou impacts. Une alternative à la réparation de ces structures consiste à les renforcer préventivement, avant que les défauts n'apparaissent. Le contexte de ce travail est celui de la maintenance des structures métalliques aéronautiques par renforts composites, dans le but de retarder la propagation de fissures.

- **Réparation par patch simple:**

Le rôle de la pièce de réparation est le ralentissement de la propagation des fissures et la réduction des contraintes aux niveaux de l'entaille et absorbe les contraintes de la plaque endommagée à travers la colle. Généralement, une réparation structurale avec un patch simple attire la charge dans le secteur localement figé autour de la pièce de réparation. De plus, les réparations à simple face induisent un recourbement significatif dans la structure endommagée [10].

- **Réparation par patch double:**

La réparation par collage du composite porte une partie des charges agissant au niveau de la fissure ou au bout d'entaille à travers l'adhésif. La réduction des contraintes dans la plaque endommagée dépend essentiellement de la pièce de la réparation est des propriétés de l'adhésives. Plusieurs auteurs [11], ont affirmé que les propriétés de l'adhésive doivent être optimisées afin de permettre la transmission des efforts vers la pièce de réparation et éviter la rupture de l'adhésif. Pour ce qui concerne les propriétés mécanique du patch, il doit avoir d'excellentes caractéristiques de transfert de charge. On peut conclure que l'amélioration des

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

exécutions de pièce de réparation par l'évaluation des propriétés du composite et de l'adhésif s'avère plus difficile et chère. Un des moyens de réparation qui peut renforcer les structures endommagées est l'utilisation d'une réparation symétrique par patch sur les deux cotés de la zone endommagée.

V-3. 3. Présentation du matériau de réparation

- **Dimension du patch**

Pour notre étude on a choisis pour la réparation de la structure un patch en composite on a choisis un stratifié carbone/époxyde, composé de fibre de carbone et constitué de 14 plis ou l'épaisseur de chaque pli est de 0.125mm dont l'empilement est le suivant [0,45,-45,0,90,0,45][45,0,90,0,-45,45,0]. Le patch qui couvre toute la section de la plaque de telle sorte que sa largeur est égale à la largeur de la plaque et sa longueur est égal à 1.5 sa largeur par contre son épaisseur est égale à 1.77mm.

- **La rigidité du patch**

Le calcul de la rigidité du patch est essentiel pour qu'il ait un bon transfert de la charge de la plaque endommagée vers le patch, en premier lieu il faut bien dimensionner ce patch pour qu'il soit efficace. Le rapport de rigidité, S, entre le patch de réparation en composite et la structure endommagée, est :

$$S = \frac{E_r e_r}{E_p e_p} \quad (V-17)$$

E_r = module de Young de la pièce rapportée (patch)

E_p = module de Young de structure à réparer

e_r = épaisseur de la pièce rapportée (patch)

e_p = épaisseur de la structure à réparer

Le rapport de rigidité devrait être entre le $1.0 < S < 1.5$. Pour notre cas, on a un composite de module de Young longitudinale est égale à $E_r = 76800 \text{MPa}$ et une épaisseur de 1.77mm, et

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

pour la structure endommagée son module de Young est $E_p = 68800 \text{ MPa}$ et son épaisseur est de 2mm, donc la rigidité S de la structure est égale :

$$S = \frac{\times}{\times} = 0.988 \approx 1$$

V-4. Le développement du programme de calcul

Le logiciel résout les équations intégrales numériquement pour des contraintes de cisaillement et de ces facteurs d'intensité de contrainte dans la plaque fissurée, contraintes de cisaillement dans l'adhésif, et les contraintes dans la plaque réparé par patch sont calculés. Le programme incorpore l'effet de hors-plan de flexion et les effets de largeur finie. Le programme calcule le facteur d'intensité de contrainte pour la plaque fissurée avec le patch de réparation collé sur les deux côtés de la plaque. Autres détails pour le logiciel utilisé dans cette étude sont donnés en REF [2].

La présente analyse est pour une infinité de large assiette. Pour tenir compte des effets de largeur de plaque finis dans la présente analyse, la correction de la largeur finie de fissures dans les feuilles monolithiques isotropes données par Tada et Paris [12] est appliquée sur les LSI obtenu à partir de l'infini analyse de plaque de largeur. La correction de largeur finie est donnée par:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left[1 - 0.025\left(\frac{2a}{W}\right)^2 + 0.06\left(\frac{2a}{W}\right)^4 \right] \sqrt{\left(\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)\right)} \quad (\text{V-18})$$

Où :

W: est la largeur de la plaque et, a: est une moitié de la longueur de fissure.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

V-4. 1. Formulation mathématique

La configuration de la plaque d'aluminium représentée à la figure V-5, est considérée pour l'analyse. Une longueur de fissure de $2a$ est supposée dans la plaque métallique et aucune fissure dans le patch de réparation. Une méthode des variables complexes est utilisée pour analyser le problème de la plaque fissurée avec un patch de réparation. Dans la formulation généralisée la plaque est considérée comme un matériau orthotrope sorte que les matériaux tels que le titane qui présentent une certaine orthotropie peuvent être analysés par la méthode de la présente analyse. Les hypothèses suivantes ont été faites dans l'analyse:

- La plaque et le patch de réparation sont considérés comme des matériaux orthotropes avec directions principales le long du plan de fissure et à angle droit.
- La plaque, le patch et l'adhésif sont des matériaux linéairement élastiques.
- Variations de contraintes à travers l'épaisseur de la plaque et le patch de réparation sont négligées.
- L'adhésif est modélisé comme ressort pour transférer la charge entre la plaque et le patch de réparation.
- Le cisaillement de surface entre la plaque et le patch de réparation, transmis à travers l'adhésif, agit comme forces du corps sur la plaque et le patch de réparation.
- Le transfert de charge a lieu entre la plaque et le patch de réparation dans la région liée seulement.
- La plaque et le patch sont suffisamment grande taille afin que les fonctions de Green pour plaque infinie puissent être utilisées [2].

V-4. 2. Modèle géométrique de la plaque

Considérons une plaque en aluminium 2024-T3 avec une entaille circulaire centrale, on suppose l'existence d'une fissure émanant d'entaille avec dimension variable cette fissure occupe toute la largeur de la plaque. La structure sera réparée par un patch simple et double (Figure V-5).

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

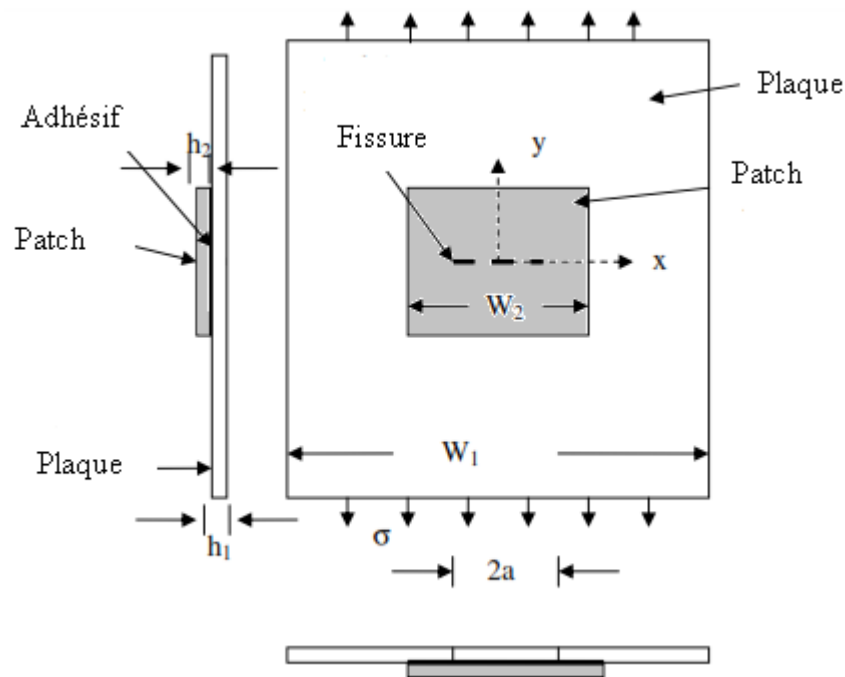


Figure V-5: Modèle géométrique de la plaque.

- Les dimensions de la plaque, la couche d'adhésif et le patch composite sont donnés dans le tableau V-1.

Dimensions	Aluminium 2024-T3	Adhésif	Patch Composite
Longueur	$H_p = 100\text{mm}$	$H_a = 50\text{mm}$	$H_r = 50\text{mm}$
Largeur	$W = 50\text{ mm}$	$W = 25\text{ mm}$	$W = 25\text{ mm}$
Epaisseur	$e_p = 2\text{ mm}$	$e_a = 0.1\text{ mm}$	$e_r = 1.60\text{mm}$

Tableau V-1: Dimensions de la plaque entaillée et fissurée, la couche d'adhésif et le patch.

- Les propriétés mécaniques des différents matériaux, la plaque d'aluminium, la couche d'adhésif et le patch composite sont donnés dans le tableau V-2.

Matériaux	$E_1(\text{GPa})$	$E_2(\text{GPa})$	$E_3(\text{GPa})$	$G_{12}(\text{GPa})$	$G_{13}(\text{GPa})$	$G_{23}(\text{GPa})$	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
Al 2024-T3	68.88	-	-	25.90	-	-	0.33	-	-
Adekit A140	2.69	-	-	1.00	-	-	0.34	-	-
Carbon-époxy	109.00	8.819	8.819	4.315	4.315	3.20	0.34	0.34	0.38

Tableau V-2: Propriétés de la plaque d'aluminium, la couche d'adhésif et le patch composite.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

V-5. Analyse et résultats

Pour examiner l'effet des différentes propriétés du patch et l'épaisseurs de l'adhésif sur le facteurs d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissuré et réparés par patch, trois parties ont été pris en compte dans cette analyse. Dans la première partie de notre étude, nous considérons aucun défaut dans l'adhésif. Dans la deuxième partie nous changeons uniquement les propriétés de patch. Puis, dans la troisième partie, nous considérons la présence de défaut dans l'adhésif (défaut de forme elliptique dans l'adhésif).

V- 5. 1. Le facteur d'intensité de contrainte dans l'adhésif sans défaut

Cette section concerne la détermination de FIC pour une longueur de la fissure $2a$ dans une plaque d'aluminium réparé avec un patch simple et double sans présence de défaut dans l'adhésif.

- **Influence de flexion sur le facteur d'intensité de contrainte**

L'influence de flexion sur le facteur d'intensité de contrainte en fonction de la longueur de fissure avec une réparation par un patch composite simple et double est illustrée dans la figure V-7. Pour la même longueur de fissure, les valeurs de FIC diminuer considérablement pour le patch simple ainsi que le double patch avec une augmentation de la longueur de la fissure, mais lorsque la longueur de la fissure est assez important (supérieur à environ 15 mm), les valeurs de FIC augmente pour le patch simple. Cela est dû à plus de transfert de charge pour le patch de réparation de la plaque fissurée. Une plaque réparé sur les deux côtés montre une réduction plus important de FIC par rapport à une plaque réparé sur une seul côté.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

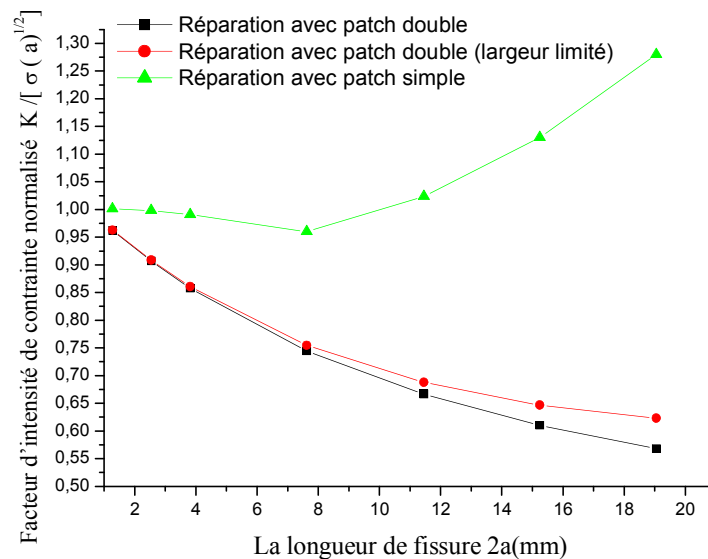


Figure V-6: Variation du facteur d'intensité de contrainte (FIC) en fonction de la longueur de fissure, pour l'épaisseur de l'adhésif = 0,1 mm.

En comparant les valeurs de FIC entre la réparation par composite patch simple et double (Figure V-6), on peut noter que le double patch réduit considérablement le facteur d'intensité de contrainte à la fissure par rapport à simple patch, en raison de l'effet de flexion causée par collage de patch sur un seul côté. Belhouari et autre. Ont montré qu'il existe une réduction supplémentaire de 10% dans les LSI pour un patch double par rapport à un patch simple. Ceci indique que la résistance à la fatigue de la structure peut être considérablement améliorée par l'utilisation d'un patch double [13].

- **Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur le facteur d'intensité de contrainte**

Les propriétés de l'adhésif influencent la résistance du joint depuis la charge est transférée à partir de la peau de patch via l'adhésif. L'épaisseur de la couche d'adhésif est un enjeu important dans la conception d'un correctif [14]. L'influence de l'épaisseur de l'adhésif sur le facteur d'intensité de contrainte pour infiniment grande plaque (à double patch), plaque de largeur finie (double patch), et finie plaque de largeur avec flexion (patch simple) est illustré dans la figure V-7.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

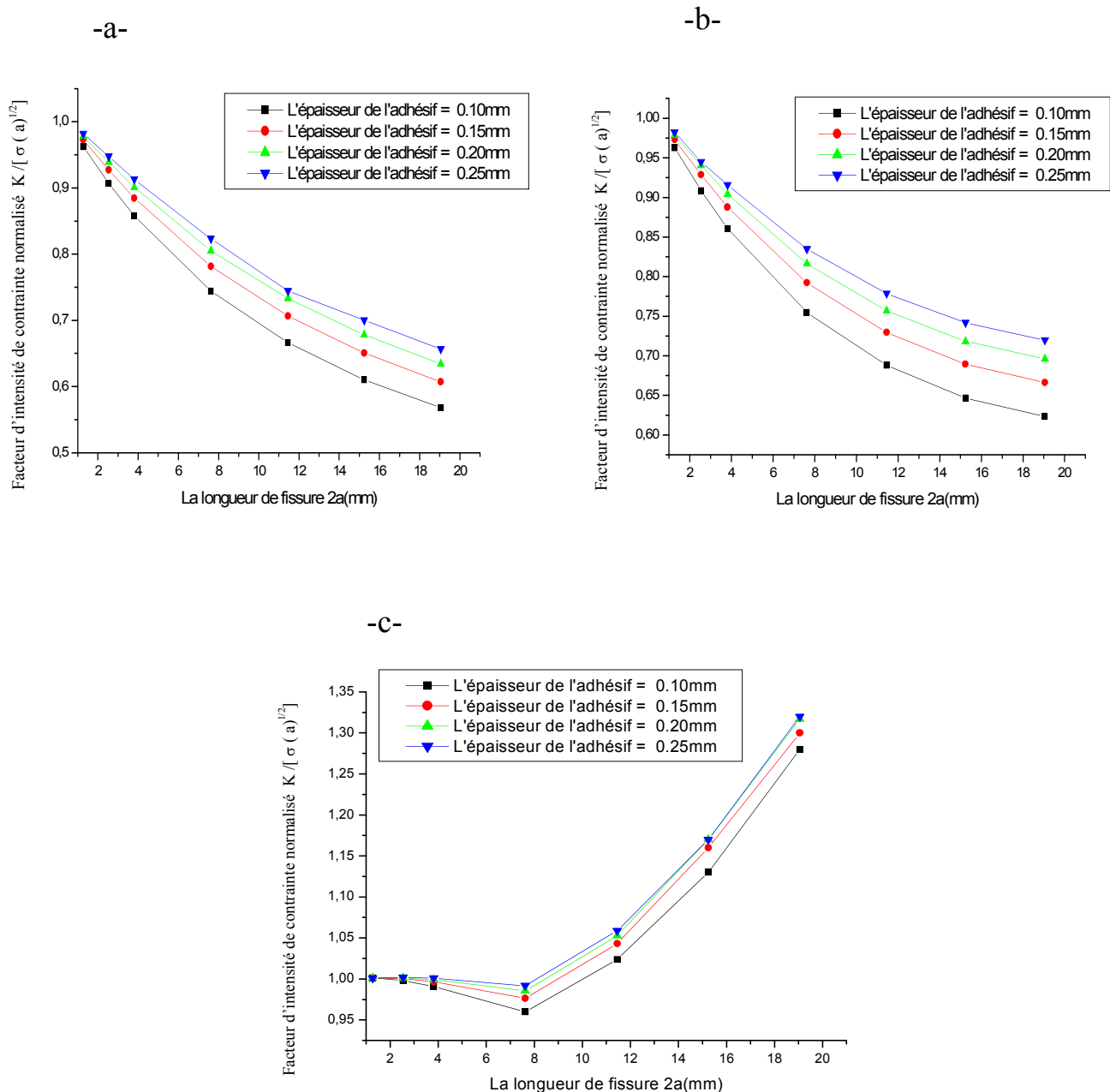


Figure V-7: Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur FIC, a) - Réparation avec patch double, b) - Réparation avec patch double (largeur limitée), c) - Réparation avec patch simple.

On peut noter qu'une réduction de l'épaisseur de l'adhésif diminue le FIC en raison d'une augmentation du transfert de charge à la pièce de réparation (patch). Cela implique que l'épaisseur d'adhésif minimale est souhaitable pour la réparation des fissures. L'épaisseur inférieure soutient ainsi les charges de transfert vers le patch, mais augmente le risque de

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

défaillance de l'adhésif. Toutefois, une certaine épaisseur de l'adhésif minimale est nécessaire de développer une force de liaison complète et éviter une rupture d'adhésif [2].

- **Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure**

L'influence de l'épaisseur de l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure est montrée dans la figure V-8.

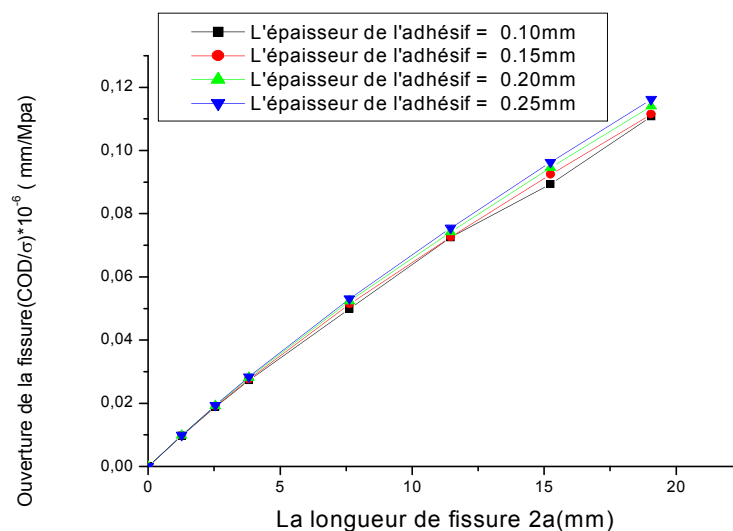


Figure V-8: Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure.

Il peut noter dans la figure V-8, qu'une augmentation de l'épaisseur de l'adhésif provoque une grande ouverture des fissures dû au transfert de moins de charge pour le patch de réparation. Cela est dû à une réduction de la rigidité de cisaillement efficace d'adhésif, qui est inversement proportionnelle à l'épaisseur de l'adhésif.

- **Influence de différentes propriétés de patch**

Les paramètres du patch sont influencés par la rigidité de la pièce, la taille de la région affectée et la résistance d'adhésif. Les propriétés de brassage influencent directement la variation de FIC [15]. Dans cette partie de l'étude, nous utilisons trois types des patches avec des propriétés différents, le bore-époxy, graphite-époxy et aramide-époxy avec une même épaisseur de patch. Les propriétés des patches utilisés dans l'analyse sont données dans le tableau V-3.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

Materials	E1(GPa)	E2(GPa)	E3(GPa)	G12 (GPa)	G13 (GPa)	G23 (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
Boron-epoxy	193.06	18.617	18.617	5.516	5.516	7.757	0.21	0.21	0.2
Graphite/epoxy	127.5	9.00	4.80	4.80	4.80	2.55	0.28	0.28	0.41
Aramid-epoxy	76.0	5.5	5.5	2.3	2.3	2.3	0.34	0.34	0.34

Tableau V-3: Propriétés du différent patch utilisé dans l'analyse [16].

- **Influence de différentes propriétés de patch sur le facteur d'intensité de contrainte (FIC)**

La réduction du facteur d'intensité de contrainte (FIC) est la question dans la conception d'un patch. Il ya une diminution considérable de (FIC) tout en appliquant la technique de réparation par composites patch.

Le figure V-9 montre la variation de la (FIC) en fonction de la longueur de la fissure pour différentes propriétés de patch. On peut voir que le taux de diminution du facteur d'intensité de contrainte est la même pour un même patch pour que, pour une double correction avec l'augmentation des propriétés de patch. Le (FIC) augmente de façon exponentielle que les propriétés de patch diminuent. Le bore de patch / époxy réduit la (FIC) plus que les autres patches composite (graphite-époxy et aramide-époxy). Cela est dû à la rigidité du matériau.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

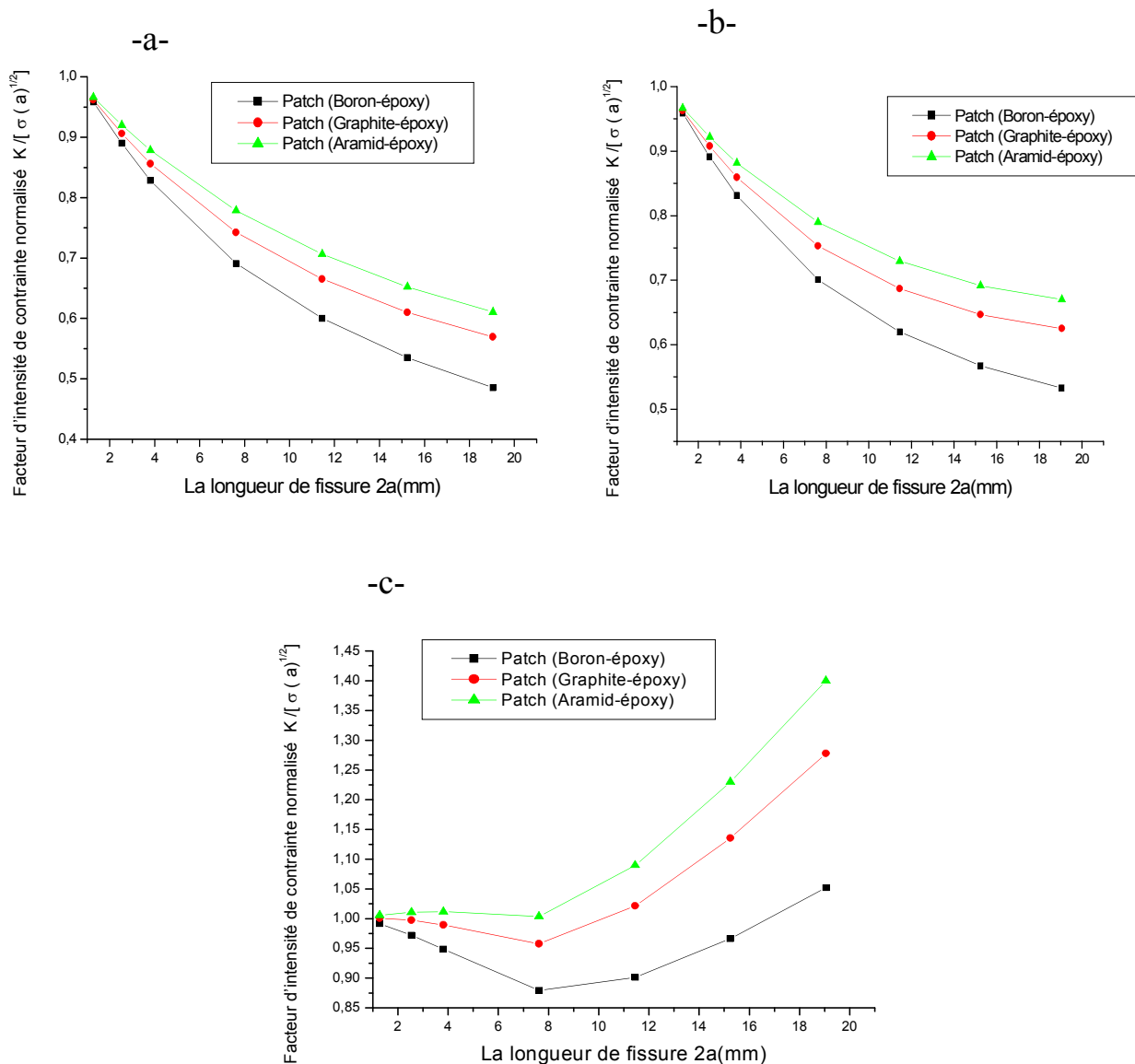


Figure V-9: Influence des propriétés de patch sur le (FIC), a) - Réparation avec patch double, b) - Réparation avec patch double (largeur limitée), c) - Réparation avec patch simple.

- Influence de différentes propriétés de patch sur le déplacement d'ouverture de fissure

La figure V-10 montre l'influence des propriétés du patch sur le déplacement d'ouverture de fissure.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

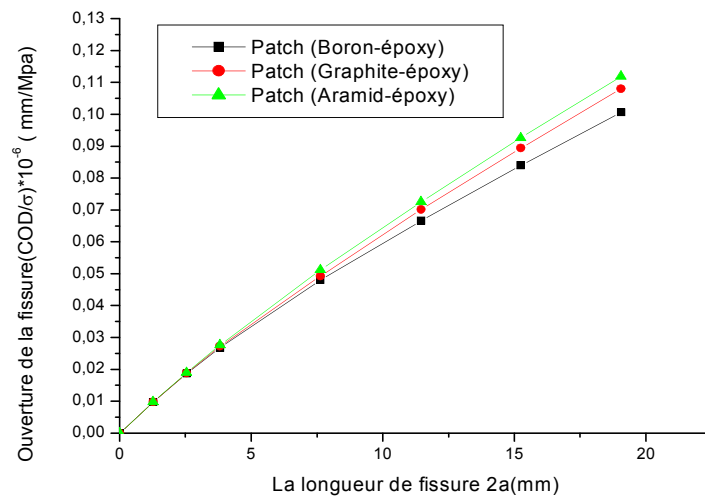


Figure V-10: Influence des propriétés du patch sur le déplacement d'ouverture de fissure.

V- 5. 2. Effet de défaut dans l'adhésif (défaut de forme elliptique adhésif) sur le facteur d'intensité de contrainte

Le défaut dans l'adhésif est supposé être de forme elliptique avec les axes principaux et perpendiculaire au plan de la fissure. Le chargement sur le panneau, représenté dans la figure V-11, peut être uniaxial ou biaxial [13].

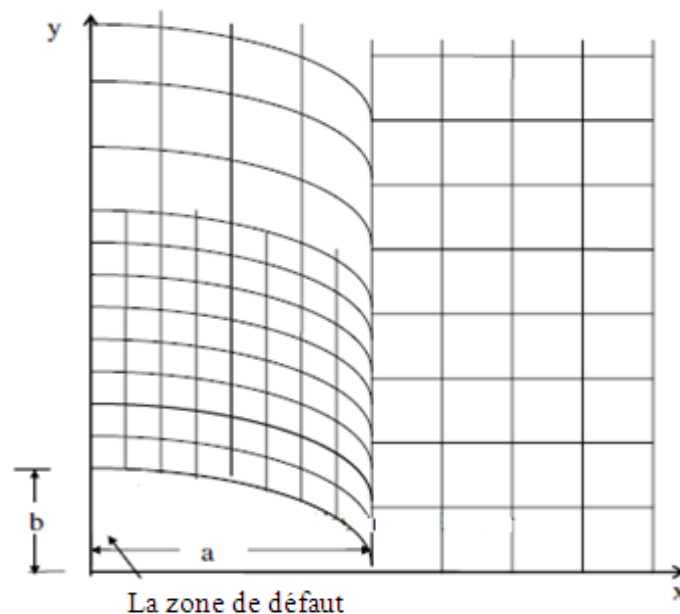


Figure V-11: La forme elliptique de défaut dans l'adhésif.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

- Influence de défaut dans l'adhésif sur le facteur d'intensité de contrainte pour une épaisseur de l'adhésif $e_a = 0,20 \text{ mm}$

L'effet de la présence de défaut dans l'adhésif sur la variation (FIC) pour le patch simple et double est illustré dans la figure V-12.

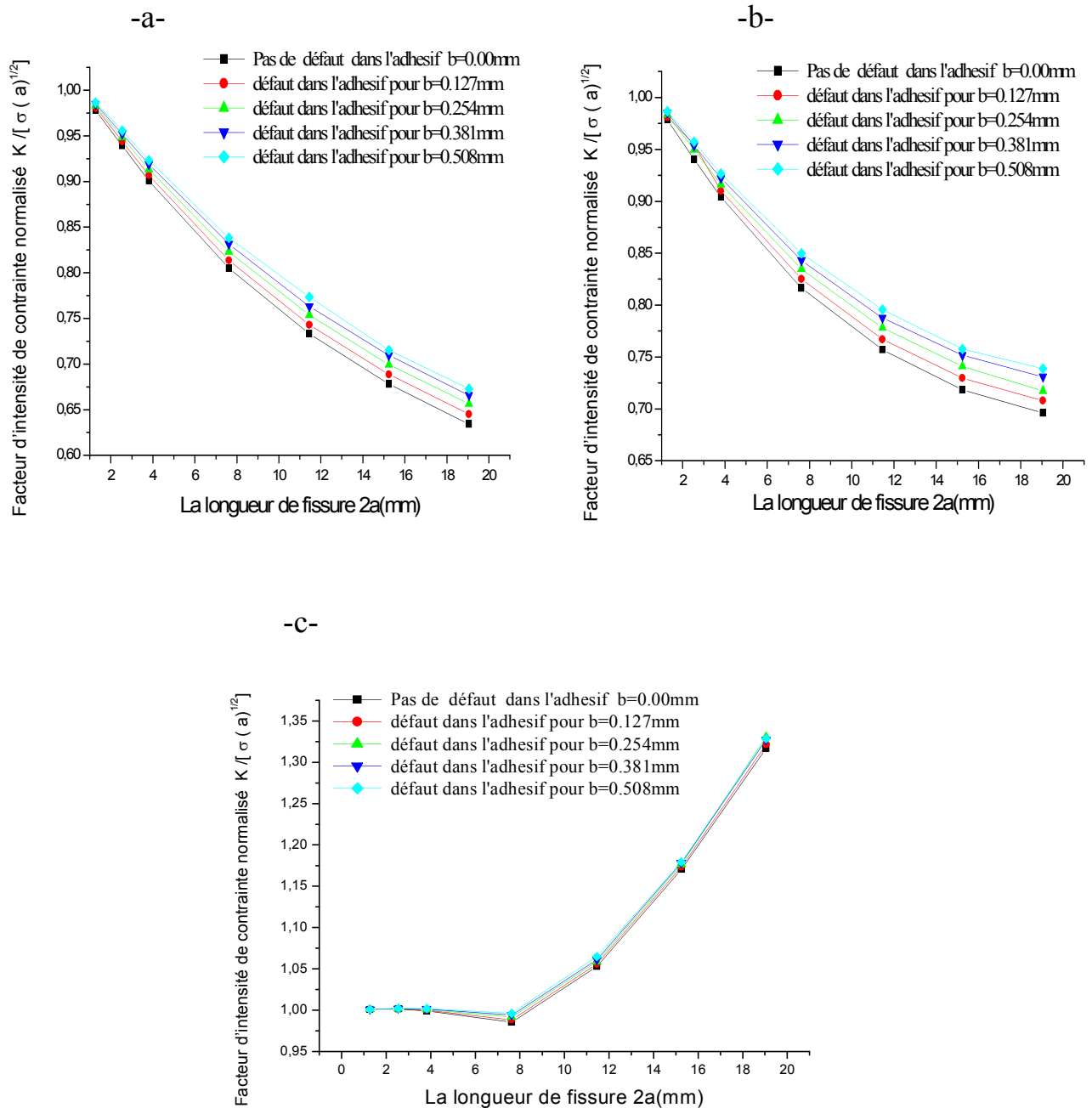


Figure V-12: Influence de défaut dans l'adhésif sur le (FIC), a) - Réparation avec patch double, b) - Réparation avec patch double (largeur limitée), c) - Réparation avec patch simple.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

Dans la figure V-12, on peut observer que lorsque le défaut dans l'adhésif augmente le facteur d'intensité de contrainte augmente. La présence du défaut dans l'adhésif augmente l'intensité du contrainte à la pointe de la fissure réparé ce qui peut réduire l'efficacité de la réparation. Une comparaison de la variation entre les patches simples et doubles symétriques en fonction de la présence de débander peut être faite. On peut voir que pour des valeurs faibles de défaut, la différence dans le (FIC) entre les deux cas (simple et double correctif symétrique) n'est pas significative. Au-delà de cette valeur faible, la différence dans le FIC devient très important que les défauts dans l'adhésif augmente. En outre, cette présence augmente le risque de rupture d'adhérence entre la structure réparée et le patch composite.

- **Influence de défaut dans l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure pour une épaisseur de l'adhésif $e_a = 0,20$ mm**

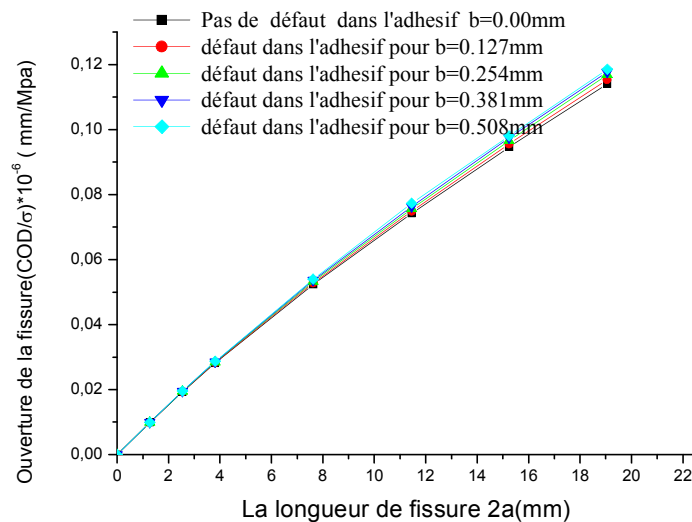


Figure V-13: Influence de défaut dans l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure.

La figure V-13 montre l'influence de défaut dans l'adhésif sur le déplacement ouverture de fissure selon la longueur de la fissure. On peut voir que le déplacement d'ouverture fissure augmente à mesure que la région défaut dans l'adhésif augmente. On peut noter que l'effet de la présence de défaut dans l'adhésif n'est pas important sur la variation de déplacement d'ouverture de fissure.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

- Influence de défaut dans l'adhésif sur le facteur d'intensité de contraintes pour différentes propriétés de patch.

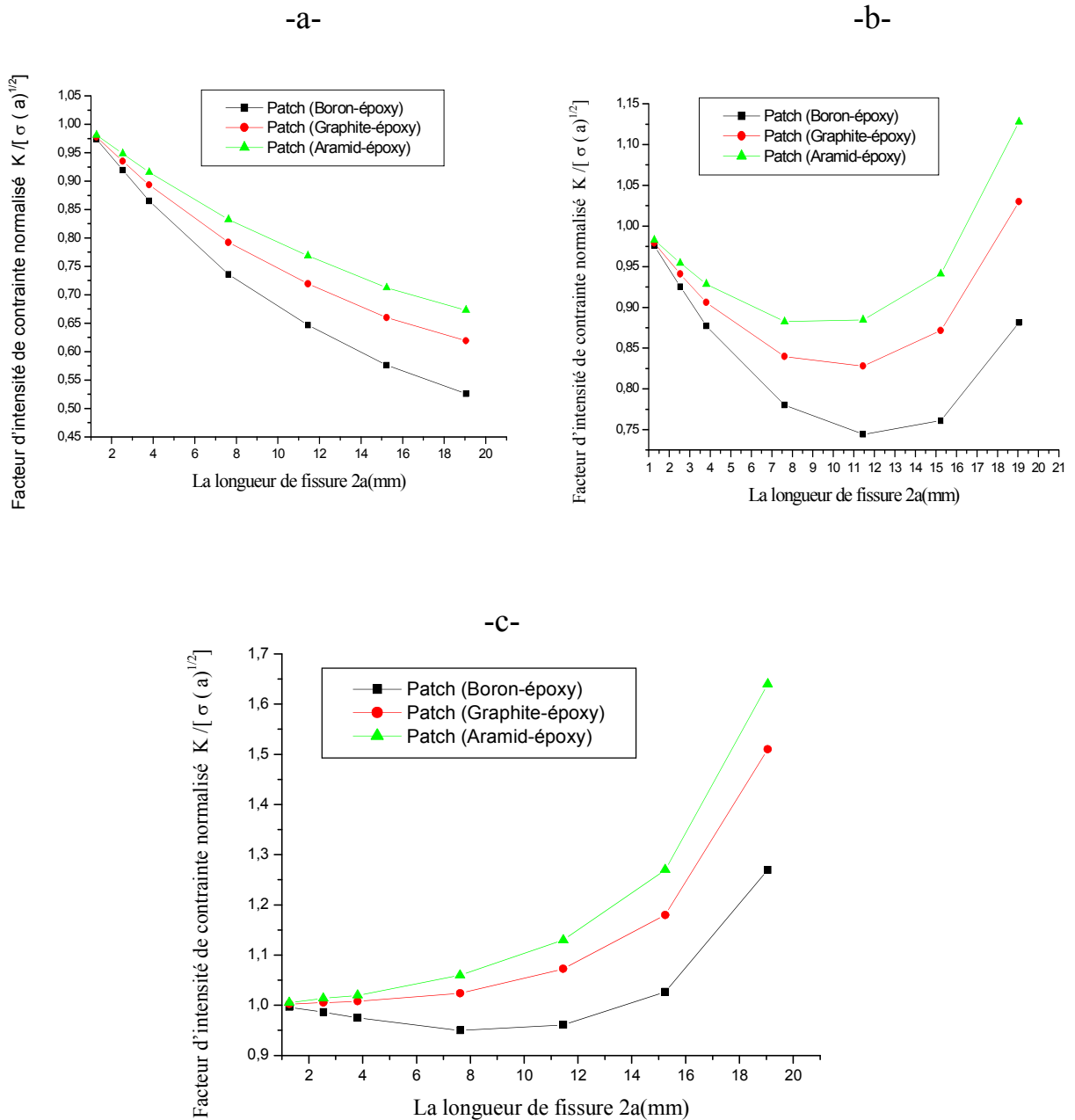


Figure V-14: Influence de la présence de défaut dans l'adhésif sur le (FIC), pour différentes propriétés de patch, a) - Réparation avec patch double, b) - Réparation avec patch double (largeur limitée), c) - Réparation avec patch simple.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

On remarque clairement que plus le composite est rigide et présente des caractéristiques mécaniques élevées plus il y'aura une bonne absorption des contraintes de la zone endommagée vers le patch à travers l'adhésif le cas du patch Boron/époxy et graphite par contre si le patch présentes des propriétés moins importantes le transfert de charge sera minimale donc un facteur FIC élevée. La variation du FIC est le même quelque soit la nature des patches. Même remarque est à note pour le calcul du COD ou il est note que le COD est beaucoup plus important lorsque le patch est en Aramid/époxy et ceci est du aux propriétés mécanique mois élevées.

- **Influence de défaut dans l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure pour différentes propriétés de patch.**

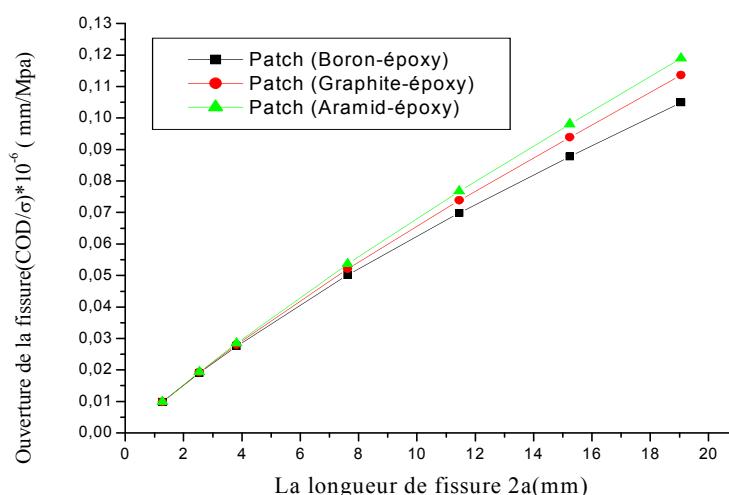


Figure V-15: Influence de défaut dans l'adhésif sur le déplacement d'ouverture de fissure pour différentes propriétés de patch.

- **Comparaison entre l'adhésif avec et sans défaut pour le patch de type Boron / époxy.**

Lorsque l'on compare les valeurs des FIC entre l'adhésif avec et sans défaut pour le même patch composite (Boron / époxy), on peut noter que le patch sans défaut réduit considérablement le facteur d'intensité de contrainte à la pointe de la fissure par rapport à l'adhésif avec décollement. Ces résultats confirment l'effet de la présence de défaut dans

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

l'adhésif à la fissure. Le facteur d'intensité de contrainte est influencé par la présence de défaut. Cette comparaison est illustrée dans la figure V-16.

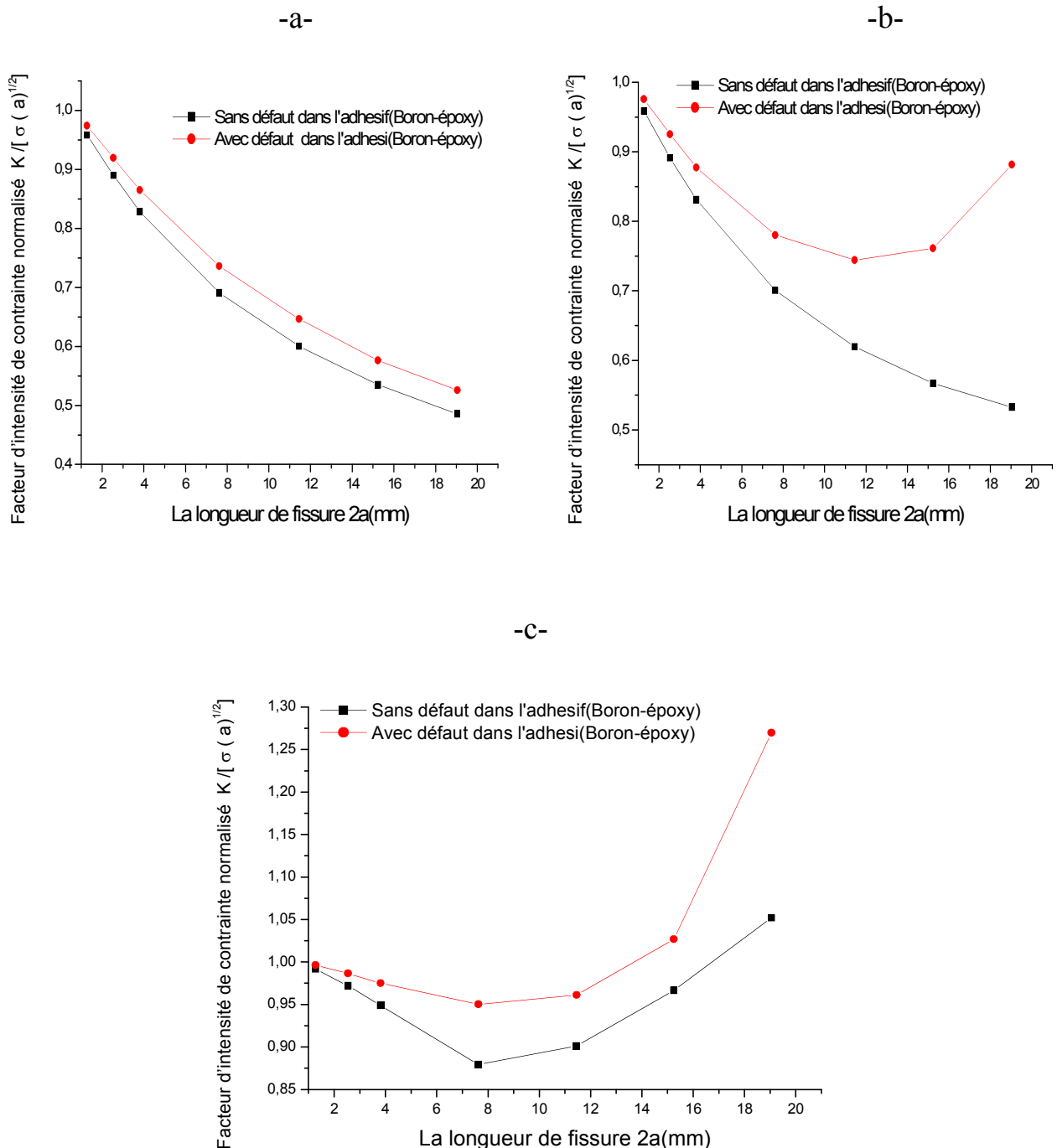


Figure V-16: Comparaison entre l'adhésif avec et sans défaut pour le patch Boron / époxy, a) - Réparation avec patch double, b) - Réparation avec patch double (largeur limitée), c) - Réparation avec patch simple.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

V- 5. 3. Comparaison de la variation du facteur d'intensité de contrainte (FIC) pour différentes épaisseurs d'adhésif avec et sans défaut

Dans ce paragraphe, le facteur d'intensité de contrainte est calculée avec et sans défaut afin d'estimer l'effet de différentes épaisseurs de l'adhésif sur ces contraintes.

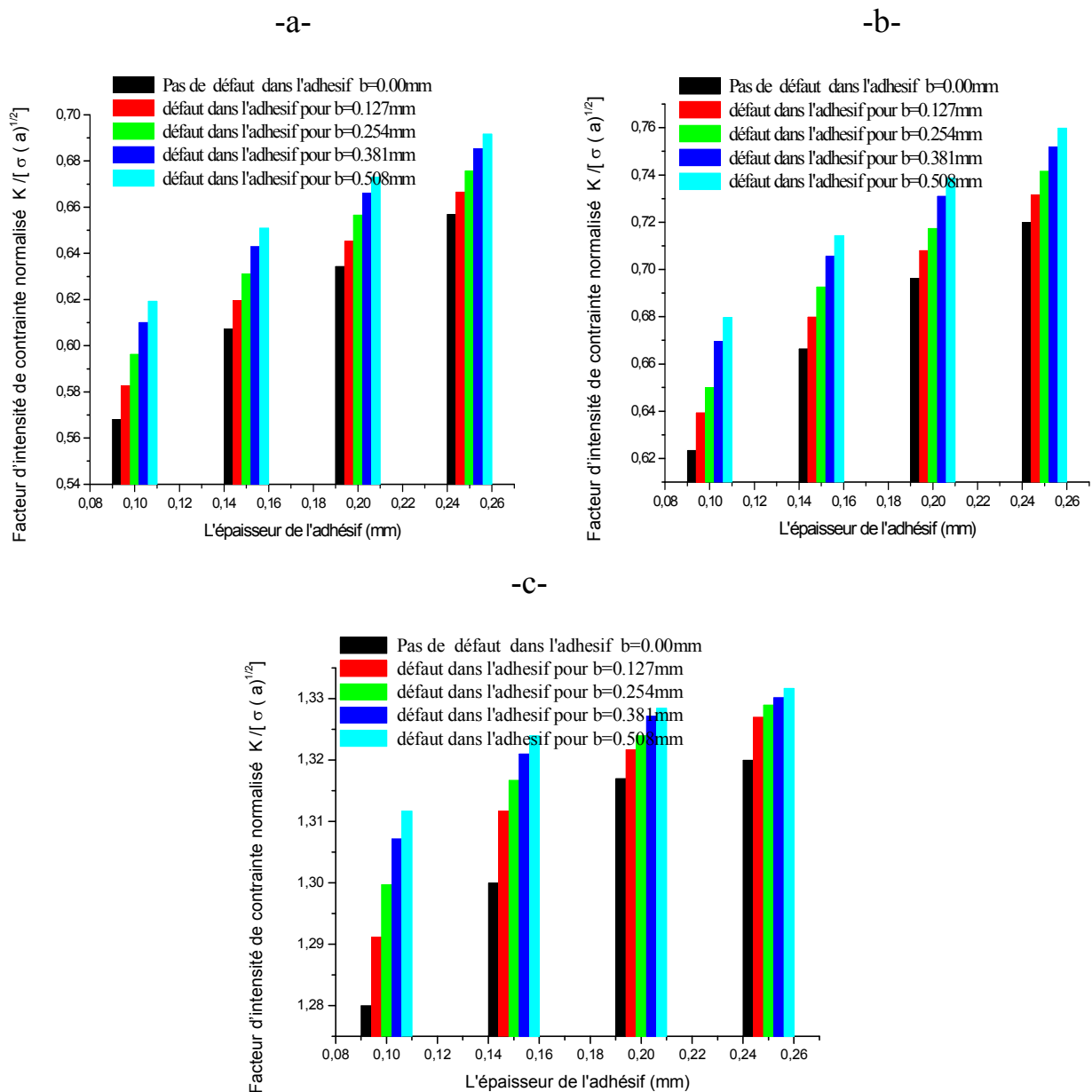


Figure V-17: La variation du facteur d'intensité de contrainte (FIC) pour différentes épaisseurs d'adhésif avec et sans défaut, a) - Réparation avec patch double, b) - Réparation avec patch double (largeur limitée), c) - Réparation avec patch simple.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

La figure V-17, présente la variation de FIC en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour les deux cas avec et sans défaut. Il peut être vu selon la figure V-17 que la présence du défaut a un effet considérable sur la variation FIC à la pointe de la fissure. En effet, les valeurs de la FIC sont fortement accrues par la présence du défaut. Il est également montré, que pour des faibles épaisseurs d'adhésif, l'effet de la variation de défaut sur la FIC est moins important. L'effet de la présence du défaut de la variation FIC augmente à mesure que la longueur de fissure augmente.

V- 5. 4. Comparaison de la variation du déplacement d'ouverture de fissure pour une longueur de fissure maximale pour différentes épaisseurs d'adhésif avec et sans défaut.

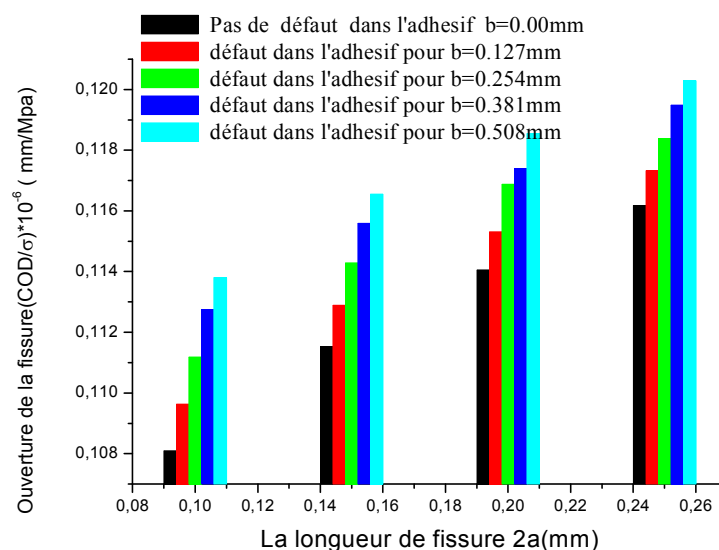


Figure V-18: La variation du déplacement d'ouverture de fissure pour différentes épaisseurs d'adhésif avec et sans défaut, a) - Réparation avec patch double, b) - Réparation avec patch double (largeur limitée), c) - Réparation avec patch simple.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

V-6. Conclusions

Les résultats obtenus dans cette étude fournissent les conclusions suivantes:

- Le double patch réduit considérablement le facteur d'intensité de contrainte à la fissure par rapport à le simple patch, en raison de l'effet de out-of-plan de flexion causée par collage de patch sur un seul côté.
- Le facteur d'intensité de contrainte à la pointe de la fissure est fortement réduite par l'utilisation du double patch, ce qui peut améliorer la vie de fatigue des structures et augmente considérablement les performances de réparation.
- Le FIC augmente lorsque la fissure s'approche de la limite extérieure de la pièce. Cette augmentation est due à l'augmentation de la concentration de contraintes au niveau du patch. Il s'agit d'un mauvais transfert de la contrainte à partir de la plaque sur le patch.
- L'augmentation des propriétés de patch diminuer la valeur de FIC à la pointe de la fissure.
- La présence de défaut dans l'adhésif augmente l'intensité de contraintes à la pointe de fissures réparées qui peut réduire l'efficacité de la réparation.

V-7. References

- [1]. Isotropic linear elastic stress concentration », Massachusetts institute of Technology department of Mechanical engineering Cambridge, MA 02139, Mechanics and Materials II spring 2004, Laboratory No.4.
- [2]. M. M. Ratwani¹, O. T. Kieboom² and R. B. Heslehurst². Crack opening displacement in plate with bonded repair patch. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* (2006) 29, 425–430.
- [3]. A. ZEGHLOUL. Concept fondamentaux de la mécanique de la rupture.
- [4]. A. A. Griffith, The phenomena of rupture and flow in solids, transactions. Royal soc. London, series A, p.163-198, 1920
- [5]. J. R. Rice, A Path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks *Journal of applied mechanics*, vol.35, pp.379-386, 1968.

Chapitre V: Influence des défauts de collage sur le facteur d'intensité de contrainte et le déplacement d'ouverture de fissure dans les plaques fissurées et réparées par patch

- [6]. A.A. Wells, Unstable crack propagation in métaux: cleavage and fast fracture, cranfield crack propagation symposium, vol.1, pp.210-230,1961.
- [7]. G.R Irwin Fracture , In: Flugge S, editor, Handbuch der Physik, vol. 6, Berlin: Springer, p 1, 1958
- [8]. C.F. Shih, Relation ship between the J integral and the crack opening displacement for stationary and extending cracks. Journal of the Mechanics and physics of solids, vol. 29, pp, 305-326,198.1
- [9]. Kradinov, V., Hanauska, J., Barut, A., Madenci, E., and Ambur, D. Bolted patch repair of composite panels with a cutout. Composite Structures 56 (2002), 423–444.
- [10]. Ratwani, M.M. and Kan, H.P. (1982).Development of Patches to Repair Complex Cracked Metallic Structures,Vol.I. Final Report NADC-80161-60, U.S NAVY, Naval Air Development Center.
- [11]. Bouiadjra, B. B., Belhouari, M., and Serier, B. Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode. Composite Structures 56 (2002), 401–406.
- [12]. A. Albedah, B. BachirBouiadjra, R. Mhamdia, F. Benyahia, M. Es-Saheb. Comparison between double and single sided bonded composite repair with circular shape. Materials and Design 32 (2011) 996–1000.
- [13]. Belhouari M, BachirBouiadjra B, Megueni A, Kaddouri K. Compos Struct 2004;65(1):47–53.
- [14]. A. ChukwujekwuOkafor, HariBhogapurapu Design and analysis of adhesively bonded thick composite patchrepair of corrosion grind-out and cracks on 2024 T3 cladaluminum aging aircraft structures. Composite Structures 76 (2006) 138–150
- [15]. D. Ouinas , B.B. Bouiadjra, B. Serier The effects of disbonds on the stress intensity factor of aluminiumpanels repaired using composite materials Composite Structures 78 (2007) 278–284
- [16]. M. Mokhtari, K. Madani, M. Belhouari, S. Touzain, X. Feaugas , M. Ratwani. Effects of composite adherend properties on stresses in double lap bonded joints. Materials and Design 44 (2013) 633–639.