



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم  
Universite Abdelhamid Ibn Badis  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie



## THÈSE

Pour l'obtention du

## DIPLOME DE DOCTORAT LMD

SPECIALITE : GENIE CIVIL

Option: Structures et Transport

### *Thème*

**ETUDE DE LA REPARATION DES PIPELINES**

**AVEC PATCH EN COMPOSITE**

**Présentée par:**

ACHOUR Aida

**Présenté le 08/11/2016 Devant la commission d'Examen :**

Président: Pr. BENANANE Abdelkader (UMAB Mostaganem)

Examineur: Pr. BOUHAMOU Nasr-Eddine (UMAB Mostaganem)

Examineur: Pr. BELHOUARI MOHAMED (UDL Sidi Bel-Abbés)

Examineur: MC.A. BOUZIANE Mohamed-Mokhtar (UMStambouli MASCARA)

Encadreur : Pr. OUINAS Djamel (UMAB Mostaganem)

Co-Encadreur : Pr. BACHIR BOUIADJRA Bel-Abbés (UDL Sidi Bel-Abbés)

**Année Universitaire : 2015 - 2016**

# *Remerciements*

*Le temps met tout en lumière.*

***Thalès***

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements et ma profonde gratitude tout d'abord, à mon co-encadreur Monsieur Bachir Boudjra BelAbbés, professeur à l'université Djillali Liabés Sidi Bel Abbés, et à Mon encadreur Monsieur OUIAS Djamel, professeur à l'université Abdelhamid Ibn-Badis Mostaganem.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur BELHOUARI mohamed et à Monsieur SERIER boualem, professeurs à l'université Djillali Liabés, pour leurs précieux conseils, leur aide et leurs encouragements*

*Ma reconnaissance est adressée mes très chers parents qui ont été tout le temps à mes côtés, et m'ont toujours soutenue avec patience, et compréhension.*

## Résumé :

Les matériaux composites ont été utilisés pour réparer structurellement les pipelines, et d'autres installations pendant de nombreuses années. Cependant, l'utilisation originale des matériaux composites a été efficace pour la réparation des pipelines corrodés où l'intention était de restaurer la rigidité de la section endommagée du pipeline. En plus de réparer la corrosion, les matériaux composites ont été utilisés avec succès pour réparer les bosses, fissures, plis à induction, et raccords de tuyauterie, y compris les coudes et les tés, ainsi que la réparation des canalisations offshores. Dans cette étude, nous avons analysé le comportement des pipelines présentant des fissures circonférentielle, et longitudinale, et réparés avec patches en composite, soumis à différentes charges tel que : moment de flexion, pression interne et effort de traction, en utilisant la méthode des éléments finis avec le code de calcul ABAQUS. Dans l'étude élastique, le facteur d'intensité de contrainte est utilisé en tant que critère d'énergie, puis dans la deuxième partie de l'étude élastoplastique l'intégrale «J», est utilisée comme critère de rupture. Les effets des propriétés mécaniques et géométriques de l'adhésif sur la variation du facteur d'intensité de contrainte et l'intégrale J, en tête de fissure ont été également analysés. Les résultats obtenus montrent que la présence de la réparation par patches en composite réduit considérablement le facteur d'intensité de contrainte et l'intégrale J, ce qui permet d'améliorer la durée de vie résiduelle du pipeline. Le FIC et l'intégrale J sont également réduits lorsque les propriétés élastique et géométriques du patch sont améliorées, en particulier lorsque le module de Young de l'adhésif et l'épaisseur du patch sont augmentés.

**Mots clés:** Matériaux composites, pipelines, moment de flexion, pression interne et traction, Facteur d'intensité de contraintes, Intégrale de Rice.

## Abstract:

Composite materials have been used to structurally repair piping and other facilities for many years. However, the original use of composite materials was for repairing corroded pipelines where the intent was to restore strength to the damaged section of the pipeline. In addition to repairing corrosion, composite materials have successfully been used to repair dents, wrinkle bends, induction bends, and pipe fittings including elbows and tees as well as repair of offshore risers. In this study, the behaviour of both circumferential and longitudinal through cracks in repaired pipe with bonded composite wrap, subjected to bending moment, internal pressure and tension is investigated using three dimensional finite element analyses using Abaqus as a code compute. In the first part of elastic domain, stress intensity factor is utilized as a fracture criterion, then in the second part of the elastic plastic domain Rice integral is utilized as a fracture criterion. The effects of the mechanical and geometrical properties of the adhesive on the variation of the stress intensity factor and J integral, at the crack front were also analyzed. The obtained results show that the presence of the bonded composite repair reduces significantly SIF and J, which can improve the residual lifespan of the pipe. Meanwhile, SIF and J are also reduced as the elastic and the geometrical wrap properties are improved, particularly when the Young Modulus of the adhesive and the wrap thickness are increased.

**Key words:** Composite materials, corroded pipelines, bending moment, internal pressure and tension, Stress intensity factor, Rice integral

## ملخص:

استخدمت المواد المركبة لإصلاح الأنابيب وغيرها من المرافق لسنوات عديدة. ومع ذلك، كان استخدام الأصلي من المواد المركبة لإصلاح خطوط الأنابيب المتآكلة حيث كان القصد إعادة القوة إلى الجزء التالف من الأنابيب بالإضافة إلى إصلاح التآكل، وقد تم بنجاح استخدام المواد المركبة لإصلاح الخدوش والتجاعيد والانحناءات، والأنابيب والتجهيزات بما في ذلك المرفقين والمحملات وكذلك إصلاح المواسير الخارجية. في هذه الدراسة، حللنا سلوك أنابيب تحتوي على خدوش طولية و عرضية، تم إصلاحها بواسطة شريط من المواد المركبة تخضع لقوى عزم الانحناء، ضغوط الداخلية والجر.

في الجزء الأول من الدراسة المرنة من شدة القيود يستخدم عامل كثافة ثم في الجزء الثاني تستخدم الكاملة "ج" كمعيار للطاقة خسبنا معامل شدة لإجهادات في رأس الشق باستعمال طريقة العناصر المتناهية. النتائج المتحصل عليه الإجهاد كمعيار الطاقة

بينت من جهة الإ انخفاض الملموس لمعامل شدة لإجهادات

**الكلمات المفتاحية:** المواد المركبة، خطوط الأنابيب، عزم الانحناء الضغط الداخلي والجر معامل شدة لإجهادات متكاملة رابيس

# *LISTE DES FIGURES*

<b>Figure I.1.</b> Les trois secteurs technologiques impliqués dans l'inspection et la maintenance des pipelines en service.	P6
<b>Figure. I.2.</b> Causes des ruptures de pipelines en cours d'exploitation enregistrées par les membres de L'ACPRÈ de 1985 à 1995 (Association Canadienne des Pipelines de Ressources Énergétiques).	P7
<b>Figure I.3.</b> Défauts de corrosion sur la paroi externe d'une canalisation métallique.	P8
<b>Figure I.4.</b> Les éraflures.	P9
<b>Figure I.5.</b> Les Enfoncements.	P9
<b>Figure I.6.</b> Construction de grands tubes en acier pour le transport du gaz.	P10
<b>Figure I.7.</b> Contrôle par ultrasons.	P13
<b>Figure I.8.</b> Contraintes s'exerçant sur un pipeline.	P16
<b>Figure I.9.</b> Rayon de courbure.	P17
<b>Figure I.10.</b> Effet du coup de bélier.	P18
<b>Figure I.11.</b> Représentation du remblayage des fouilles.	P19
<b>Figure II.1.</b> Exemple de liaison chimique directe entre adhérent et adhérent.	P23
<b>Figure II.2.</b> Utilisation d'un agent de couplage pour former une liaison chimique.	P24
<b>Figure II.3.</b> Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique, d'après [28]	P25
<b>Figure II.4.</b> Vue en coupe d'un assemblage structural [30].	P26
<b>Figure II.5.</b> Structure chimique du groupe epoxyde [29,55].	P27
<b>Figure II.6.</b> Structure chimique du TGDMA [30].	P28
<b>Figure II.7.</b> Structure chimique des durcisseurs DDS et DDA [30].	P28
<b>Figure II.8.</b> Réaction de polyaddition entre bouts de chaînes amine et epoxydes [30].	P29
<b>Figure II.9.</b> Synthèse des polyuréthanes [30].	P30
<b>Figure II.10.</b> Synthèse des méthacrylates [30].	P30
<b>Figure II.11.</b> Synthèse d'une résine phénolique [30].	P31
<b>Figure II.12.</b> Structure chimique globale d'une résine phénolique [30].	P31
<b>Figure II.13.</b> Importance des défauts dans les joints selon l'expérience de RAAF (Royal Australian Air Force) [7].	P33
<b>Figure II.14.</b> Défauts typiques dans un joint collé.	P34
<b>Figure II.15.</b> Différents modes de ruptures.	P38

<b>Figure II.16.</b> Différents modes de sollicitations mécaniques.	P38
<b>Figure II.17.</b> Effet des sollicitations mécaniques et de l'environnement sur la diminution relative avec le temps de la résistance d'un joint collé selon l'essai de cisaillement.	P40
<b>Figure II.18.</b> Patch composite avec une épaisseur dégressive [26].	P43
<b>Figure II.19.</b> Diverses formes de patches composites d'après [60].	P44
<b>Figure II.20:</b> Modèle unidimensionnel d'une structure renforcée par patch composite.	P45
<b>Figure II.21.</b> Photo d'un patch en Boron/Epoxy d'épaisseur de 0.6 mm.	P48
<b>Figure III.1.</b> Pipeline réparé soumis à un moment de flexion.	P58
<b>Figure III.2.</b> Modèle géométrique du pipeline et de la fissure.	P59
<b>Figure III.3.</b> Modèle de maillage typique de la structure globale.	P60
<b>Figure III.4.</b> Modèle du maillage en front de fissure.	P61
<b>Figure III.5.</b> Répartition du FIC le long du front de fissure pour les fissures réparées et non réparées.	P63
<b>Figure III.6.</b> FIC par rapport à l'angle $\theta$ de fissuration en pointe de fissure externe.	P63
<b>Figure III.7.</b> FIC par rapport à l'angle $\theta$ de fissuration en pointe de fissures interne et externe.	P64
<b>Figure III.8.</b> Distribution du FIC le long du front de fissure pour différents modules de cisaillement de l'adhésif.	P66
<b>Figure III.9.</b> FIC par rapport au module de Young de l'adhésif.	P67
<b>Figure III.10.</b> FIC par rapport à l'épaisseur de l'adhésif en pointe de la fissure externe.	P68
<b>Figure III.11.</b> FIC par rapport à l'épaisseur du patch en pointe de fissure externe.	P69
<b>Figure III.12.</b> Pipeline réparé sous l'effet de :a)- la pression, c)- la traction.	P69
<b>Figure III.13.</b> FIC en fonction de l'angle de fissure en position externe réparée et non réparée.	P71
<b>Figure III.14.</b> FIC en fonction de l'angle de fissure en position interne réparée et non réparée.	P71
<b>Figure III.15.</b> FIC en fonction de l'angle de fissure réparée en positions interne et externe.	P72
<b>Figure III.16.</b> Distribution du FIC le long de l'épaisseur de pipelines réparé et non réparé	p73

<b>Figure III.17.</b> Variation du FIC en fonction de l'épaisseur de la couche adhésive pour une fissure réparée.	P74
<b>Figure III.18.</b> FIC en fonction du module de Young de l'adhésif.	P74
<b>Figure III.19.</b> Distribution du FIC le long du front de fissure pour différents modules de cisaillement de l'adhésif.	P75
<b>Figure III.20.</b> Variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch.	P75
<b>Figure III.21.</b> Variation du FIC en fonction de l'angle de fissures externes réparée et non réparée.	P76
<b>Figure III.22.</b> Variation du FIC en fonction de l'angle de fissures internes réparée et non réparée.	P77
<b>Figure III.23.</b> Variation du FIC en fonction de l'angle de fissures externe et interne réparées.	P77
<b>Figure III.24.</b> Variation du FIC le long de l'épaisseur du pipeline fissuré.	P78
<b>Figure III.25.</b> Distribution du FIC sur le front de fissure pour différents modules de Young	P79
<b>Figure III.26.</b> Variation du FIC en fonction du module de Young de l'adhésif pour des fissures interne et externe.	P79
<b>Figure III.27.</b> Variation du FIC en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour des fissures externe et interne réparées.	P80
<b>Figure III.28.</b> Variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch.	P81
<b>Figure III.29.</b> Variation du FIC en fonction de l'angle de fissure en positions externes réparée et non réparée.	P81
<b>Figure III.30.</b> Variation du FIC en fonction de l'angle de fissure en position interne réparée et non réparée.	P82
<b>Figure III.31.</b> Variation du FIC en fonction de l'angle de fissure pour des fissures réparées en positions interne et externe.	P83
<b>Figure III.32.</b> Variation du FIC le long de l'épaisseur du pipeline fissuré.	P83
<b>Figure III.33.</b> Variation du FIC en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.	P84
<b>Figure III.34.</b> Distribution du FIC sur le front de la fissure réparée.	P85

<b>Figure III.35.</b> Variation du FIC en fonction du module de Young de l'adhésif.	P85
<b>Figure III.36.</b> Distribution du FIC sur le front de fissure.	P86
<b>Figure III.37.</b> Variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch.	P86
<b>Figure III.38.</b> FIC pour des fissures internes réparées par patch.	P87
<b>Figure III.39.</b> FIC pour des fissures internes réparées avec patch composite.	P87
<b>Figure IV.1.</b> Contrainte-déformation pour un acier inoxydable SA312Type 304 [2].	P91
<b>Figure IV.2.</b> Variation de l'intégrale J en fonction de la taille de fissure sous effort de pression.	P93
<b>Figure IV.3.</b> Variation de l'intégrale J en fonction de la taille de fissure longitudinale sous moment de flexion.	P94
<b>Figure IV.4.</b> Variation de l'intégrale J en fonction de la taille de fissure longitudinale sous pression.	P95
<b>Figure IV.5.</b> Comparaison entre les résultats de "J" pour les trois cas de charges (pression, traction et flexion).	P96
<b>Figure IV.6.</b> Variation de l'intégrale J en fonction de la taille de fissure circonférentielle sous effort de pression.	P97
<b>Figure IV.7.</b> Variation de l'intégrale J en fonction de la taille de fissure circonférentielle sous un moment de flexion.	P97
<b>Figure IV.8.</b> Variation de l'intégrale J en fonction de la taille de fissure circonférentielle sous pression.	P98
<b>Figure IV.9.</b> Comparaison entre les résultats de "J" pour les trois cas de charges (pression, traction et flexion).	P99
<b>Figure IV.10.</b> Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur « J ».	P100
<b>Figure IV.11.</b> Effet de l'épaisseur du patch sur « J ».	P100

# ***LISTE DES TABLEAUX***

***Tableau I.1. Les sur-largeurs de la tranchée. P18***

***Tableau I.2. Remblayage des fouilles. P19***

***Tableau II.1. Influence du traitement thermique sur la tenue en fatigue des éprouvettes en aluminium. P49***

***Tableau III.1. Propriétés des matériaux. P59***

***Tableau IV.1. Propriétés mécaniques du boron-epoxy. P91***

# NOTATIONS

$a$	: longueur de la fissure.
$t$	: Epaisseur du pipe.
$e_p$	: Epaisseur du patch.
$e_c$	: Epaisseur de la colle adhésive.
$R_m$	: Rayon moyen.
$R_i$	: Rayon interne.
$R_e$	: Rayon externe.
$K$	: Facteur d'intensité de contrainte.
$J$	: Intégrale de contour.
$E$	: Module de Young.
$\mu$	: Module de cisaillement.
$\nu$	: Coefficient de poisson.
$\sigma_e$	: Limite élastique.
$\varepsilon^e$	: Déformation élastique.
$\varepsilon^P$	: Déformation plastique.
$n$	: coefficient d'écrouissage.
$P$	: Pression.
$M$	: Moment.
FEM	: Méthode éléments finis.

# SOMMAIRE

## Introduction générale

### *Chapitre 1*

## Comportement en rupture des pipelines 1

<u>I. Introduction</u> .....	1
<u>II Matériaux et propriétés des canalisations</u> .....	1
I.2.1 Acier .....	1
II.3. Diamètres des canalisations .....	1
<u>III. Charges</u> .....	2
III.1. Pression .....	2
III.2. Charge du sol .....	3
III.3. Environnement.....	3
<u>IV. Les pipelines à défauts</u> .....	3
IV.1.Histoire des méthodes d'évaluation des pipelines à défauts .....	4
IV.2. Le PDAM (The Pipeline Default Assessment Manual) .....	5
IV.2.1.Présentation du PDAM .....	5
IV.2.2. Principaux types de défauts évalués dans le PDAM .....	6
<u>V. Inspection et maintenance des canalisations en service</u> .....	6
<u>VI. Causes des défaillances des tubes</u> .....	7
<u>VII. Types de défauts précurseurs de la rupture des canalisations</u> .....	8
VII.1. Corrosion dans les pipelines .....	8
VII.2. Les éraflures .....	8
VII.3. Les Enfoncements .....	9
VII.4. Les Fissures .....	10
VII.4.1. Evaluer le risque de fissure .....	11
VII.4.2. Ténacité .....	11
<u>VIII. Contrôles des pipelines</u> .....	12
VIII.1 Contrôles destructifs (ASTM A 370) .....	12
VIII.1.a. Essai de traction .....	12
VIII.1.b. Essai de pliage .....	12
VIII.1.c. Essai de dureté .....	12
VIII.2. Contrôles non destructifs .....	12
VIII.2.a. Contrôle visuel et dimensionnel .....	12
VIII.2.b. Contrôle par ultrasons .....	13
<u>IX. Sollicitations mécaniques</u> .....	14

IX.1. Principaux modes de dégradation des tuyauteries .....	14
IX.2. Dégradation liée à des facteurs mécaniques (Fluage - Rupture fragile - Rupture ductile - Fatigue mécanique - Fatigue thermique - Abrasion pure - Flambage) .....	14
IX.3. Rôle de la production et de la maintenance .....	15
IX.4. Contraintes .....	15
IX.4.a. Contraintes principales .....	16
IX.4.b. Contraintes thermiques .....	16
<u>X. Pose enterrée de la canalisation en PE</u> .....	17
X.1. Tracé .....	17
X.2. Rayon de courbure .....	17
X.3. Effet du coup de bélier .....	17
X.4. Largeur et profondeur de la tranchée .....	18
X.5. Remblayage des fouilles .....	19
<u>XI. Conclusion</u> .....	19
<u>Références du chapitre I</u> .....	19

## *Chapitre II*

### **Adhésion et adhésif** **21**

I.1. Introduction.....	21
<u>II. Modèle d'adhésion</u> .....	23
II.1. Modèle de la liaison chimique .....	23
II.2. Modèle mécanique .....	24
<u>III. Adhésifs structuraux</u> .....	25
III.1. Méthodologie associée au collage structural .....	26
III.2. Colles structurales.....	27
III.2.1 Epoxydes.....	27
III.2.1.1 Constituants .....	27
III.2.1.2 Réticulation .....	29
III.2.2 Les polyuréthanes .....	30
III.2.2.3 Les acryliques .....	30
III.2.2.4 Les phénoliques .....	31
III.3. Défauts dans les assemblages collés .....	32
<u>IV. Caractérisation des assemblages collés</u> .....	37
<u>V. Réparation des structures métalliques fissurées</u> .....	39
V.1. Travaux entrepris pour la technique du collage par patch en composite.....	40
V.1.1. Durée de vie des structures collées .....	40
V.2. Renforcement .....	40
V.3. Réparation .....	41
V.3.1. Patch composite et patch métallique .....	41

<u>VI. Diverses formes de patchs composites utilisés dans les réparations</u> .....	43
<u>VII. Transfert de charge du renfort collé</u> .....	44
VII.1. Effet des contraintes résiduelles .....	48
VII.2. Influence du traitement thermique à 120°C .....	49
<u>VIII. Conclusion</u> .....	50
<u>Références du chapitre II</u> .....	51

## ***Chapitre III***

### **Analyse élastique de la réparation des pipelines fissurés 56**

<u>I.1 Introduction</u> .....	57
<u>II. Modèles d'éléments géométriques et finis</u> .....	58
<u>III. Résultats et discussions</u> .....	62
III.1. Pour un chargement en flexion .....	62
III.1.1 Comparaison entre fissure réparée et non réparée .....	62
III.1.2. Effet de la taille de la fissure .....	62
III.1.3. Effet des propriétés mécaniques de l'adhésif .....	66
III.1.4. Effet de l'épaisseur de l'adhésif .....	67
III.1.5 Effet de l'épaisseur du patch .....	68
III.2. Réparation des pipelines par patch en composite sous l'effet de la pression interne, la traction .....	69
III.2.1 La réparation des pipelines sous l'effet de la pression interne .....	70
III.2.1.1. Comparaison entre des pipelines fissurés réparé et non réparé .....	70
III.2.1.2 Effet de la dimension de la fissure .....	71
III.2.2. Effet de l'épaisseur de l'adhésif .....	73
III.2.3 Effet du module de Young de l'adhésif .....	74
III.2.4 Effet de l'épaisseur du patch .....	75
III.3. Réparation des pipelines sous l'effet du moment de flexion .....	76
III.3.1 Résultats & interprétations .....	76
III.3.1.1 Comparaison entre pipelines fissurés réparé et non réparé .....	76
III.3.1.2 Effet du module de Young .....	78
III.3.1.3 Effet de l'épaisseur de l'adhésif .....	80
III.3.1.4 Effet de l'épaisseur du patch .....	80
III.4. Réparation des pipelines sous l'effet de la traction .....	81
III.4.1 Résultats & interprétations .....	81
III.4.1.1 Comparaison entre des pipelines fissurés réparé et non réparé .....	81
III.4.1.2 Effet de l'épaisseur de l'adhésif .....	84
III.4.1.3 Effet du module de Young de l'adhésif .....	86
III.4.1.4 Effet de l'épaisseur du patch .....	86
III.5 Comparaison entre les trois chargements : flexion, traction et pression .....	87
<u>Références du chapitre III</u> .....	89

## *Chapitre IV*

### *Analyse élastoplastique de la réparation des pipelines fissurés* **90**

<u>I. Introduction</u> .....	90
<u>II. Matériaux utilisés</u> .....	90
II.1. Propriétés de l'acier .....	90
II.2. Propriétés du patch .....	91
<u>III. Résultats</u> .....	92
III.1. Fissure longitudinale .....	92
III.1.1. Influence de la taille de la fissure .....	92
III.1.2. Pipeline soumis à un moment de flexion .....	93
III.1.3. Influence de la pression .....	94
III.1.4. Comparaison entre les résultats de "J" pour les 03 cas de chargements.....	95
III.2. Fissure circonférentielle .....	96
III.2.1. Influence de la taille de la fissure .....	96
III.2.2. Influence du moment de flexion .....	97
III.2.3. Effet de la pression .....	98
III.2.4. Comparaison entre les résultats de "J" pour les 03 cas de chargements.....	98
III.2.5. Influence de l'épaisseur de l'adhésif .....	99
III.2.6. Influence de l'épaisseur du patch sur l'intégrale de contour .....	100
<u>Références du chapitre IV</u> .....	101

### *Conclusion générale*

# **Introduction générale**

# INTRODUCTION GENERALE

---

Les ingénieurs et techniciens en charge des pipelines et canalisations ont toujours eu à traiter de problèmes de corrosion, érosion et dommages mécaniques. Durant de nombreuses années, les seules solutions crédibles pour les canalisations endommagées étaient de remplacer par du neuf ou de souder une nouvelle section. Ces procédures imposent généralement des arrêts de production. De plus, le travail à chaud requis lors du remplacement est interdit dans les zones dangereuses. Enfin, les problèmes métallurgiques causés par la soudure ajoutent des inconvénients à cette solution compliquée et onéreuse. En même temps, les réparations composites se sont grandement développées et sont devenues de plus en plus populaires, s'offrant comme une alternative au remplacement et aux colliers mécaniques. En effet, les composites peuvent être utilisés là où les colliers ne peuvent l'être, et sont bien souvent plus rentables.

Les facteurs qui influent de manière prépondérante sur le comportement des pipelines sont les agressions externes, et les contraintes internes liées aux conditions d'exploitation. L'observation de ces éléments et de leur défaillance ne suffit pas à cerner l'architecture de leurs qualités. Il convient dans ce cas de procéder à une étude par la méthode des éléments finis de leurs effets sur le patch. Dans ce cadre, le travail présenté dans cette thèse est une contribution à l'étude de l'influence de plusieurs paramètres sur la réparation des pipelines fissurés.

La présente thèse est structurée en quatre chapitres :

Chapitre I : Comportement en rupture des pipelines :

Dans ce chapitre ont été exposés les défauts et fissures existants dans les canalisations endommagées engendrés sous l'effet de l'environnement et des charges appliquées.

Chapitre II : Adhésion et adhésif :

Ce chapitre porte sur l'explication de l'importance de l'adhésion et de l'adhésif et de leurs efficacités dans la réparation des structures fissurées, ainsi que celle des patchs en matériaux composites.

Chapitre III : Analyse élastique de la réparation des pipelines fissurés

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un pipeline complet fissuré et réparé par patch en matériau composite en utilisant la méthode d'éléments finis, à l'aide du code de calcul ABAQUS. Ensuite on a étudié le comportement de la structure fissurée et réparée par patch en matériau composite dans les pipelines soumis à plusieurs chargements, tels que le moment de flexion, la pression interne et la traction. Cela a été fait en analysant les résultats du paramètre du facteur d'intensité de contraintes en élasticité, et  $J$  en élastoplasticité.

Chapitre IV : Analyse élastoplastique de la réparation des pipelines fissurés.

Dans ce chapitre nous avons utilisé le même modèle géométrique du pipeline, les mêmes propriétés mécaniques et géométriques du patch ainsi que de l'adhésif. L'approche énergétique de la mécanique non linéaire de la rupture, fondée sur le l'intégrale J est utilisée pour décrire le comportement en rupture du pipeline. L'influence de la pression de service, de l'épaisseur du pipeline et de l'adhésif de réparation ainsi que la taille de la fissure sont mises en évidence sur les variations de l'énergie de rupture en pointe de fissure.

Enfin, la conclusion générale sur notre travail termine le manuscrit .

# **Chapitre I**

## **Comportement en rupture des pipelines**

### **I.1 Introduction**

Les ingénieurs sont confrontés à la réhabilitation des canalisations endommagées par l'effet de l'environnement et des charges appliquées. Non seulement les défauts dans le matériau ou lors de la fabrication et le procédé d'installation telle la fissuration pendant le chargement, le transport, le déchargement, ou le stockage engendrent l'endommagement dans les pipelines mais également, les états d'emplacement qui accélèrent la corrosion tels que les eaux souterraines, la basse résistivité et l'alcalinité élevée du sol. Du fait des innovations et des progrès technologiques, l'industrie des canalisations a bénéficié du développement des matériaux composites. Les matériaux composites ont apporté à l'industrie des pipelines la sécurité, la fiabilité et l'économie dans la réparation des défauts, comparés aux autres procédures possédant plusieurs inconvénients tels que les réparations soudées et les douilles en acier (steel sleeves).

### **II Matériaux et propriétés des canalisations**

Différents matériaux métalliques et plastiques sont employés dans la technologie des conduites. Les matériaux métalliques les plus utilisés dans les canalisations sont la fonte grise, la fonte malléable et l'acier.

#### **II.2.1 Acier**

L'utilisation de l'acier dans les pipelines remonte au 19<sup>ième</sup> siècle, principalement dans les applications de transport de gaz et de pétrole. Le comportement de l'acier est différent de celui de la fonte en raison de l'existence d'un comportement élastique et de l'existence d'une limite élastique définitive où la déformation plastique commence à se reproduire. La valeur du module de Young est aux environs de 200 GPa. Les pipelines en acier sont surtout utilisés pour le transport de gaz et de pétrole à hautes pressions.

#### **II.3. Diamètres des canalisations**

L'évolution technique et l'augmentation des quantités de gaz transportées ont conduit à un accroissement progressif des diamètres des canalisations. Les premiers gazoducs de diamètre 900 mm ont été posés dans les années 1960, suivis quelques années plus tard par des ouvrages de 1200 mm puis de 1400 mm de diamètre.

L'industrie mondiale (Europe, Japon) est actuellement en mesure de fournir des tubes de 1600 mm de diamètre pour des pressions de service égales à 100 bars. Cependant, aucun projet dans cette gamme de diamètre n'est aujourd'hui envisagé.

Pour les réseaux sous-marins, la même tendance à l'accroissement des diamètres est observée. Toutefois, les pressions de service élevées et les difficultés de construction et de réparation des conduites font qu'on se limite actuellement aux diamètres d'environ 1000 mm.

### **III. Charges**

Les efforts exercés sur les canalisations peuvent être le résultat d'une combinaison de la pression interne de fonctionnement, d'une charge du sol, de l'effet de l'environnement et éventuellement des impacts accidentels pendant l'installation ou durant le service.

#### **III.1. Pression**

Les pertes de charges occasionnées par le mouvement du fluide nécessitent l'emploi de pompes pour compenser ces pertes et assurer une pression de service recommandée. Cette augmentation de la pression induit des efforts sur les canalisations. C'est le cas des transports de pétrole et du gaz qui se font à des pressions internes extrêmement élevées. Par contre, pour les canalisations installées dans des environnements urbains, généralement à basse pression interne, une analyse aux efforts de pression est inutile.

Pour les réseaux terrestres, les pressions de service les plus courantes sont comprises entre 70 et 100 bars avec un espacement des stations de compression de 110 à 200 km. Dans quelques cas particuliers, des pressions de 120 bars ont été retenues dans des zones où l'utilisation de stations de compression intermédiaires était limitée (zone arctique).

Pour les réseaux sous-marins, les pressions de service sont plus élevées, les contraintes mécaniques généralement imposées aux tubes lors de la pose des ouvrages rendent nécessaire l'adoption d'épaisseurs plus fortes supportant des pressions internes élevées. Aussi, la pression des réseaux en mer du Nord est-elle comprise entre 150 et 170 bars. Dans le cas de gisements de pétrole et de gaz associés, la tendance s'oriente vers l'utilisation de pressions encore plus importantes afin de pouvoir évacuer vers la côte, dans une seule conduite et en phase unique, le gaz naturel et les condensats d'hydrocarbures extraits des gisements.

### III.2. Charge du sol

Des canalisations enterrées sont exposées à de grands mouvements du sol résultant des excavations. Les mouvements des sols imposent des efforts qui pourraient mener à la rupture. L'évaluation précise des effets que ces mouvements ont sur les canalisations permet d'éviter ou d'atténuer les dommages potentiels. Beaucoup de travaux ont été effectués dans ce domaine pour déterminer les modèles de mouvements provoqués et les efforts induits dans les canalisations.

Nath [1] a conduit une analyse par éléments finis sur des canalisations de fontes s'étendant de 75 à 450 mm de diamètres, enterrées à une profondeur de 1 m. Il conclut que les canalisations avec un diamètre inférieur à 150 mm n'ont pas de mouvement, tandis que les grands diamètres ont fourni une certaine contrainte contre les mouvements. Un soin particulier devrait y être apporté surtout pour les grands diamètres parce qu'ils tendent à retenir davantage les mouvements que les petites canalisations. Ainsi, les canalisations sont soumises à un effort de flexion.

Pour les pipelines enterrés à de faibles profondeurs au-dessous de la surface du sol, le poids de ce dernier produit des efforts qui tendent à le déformer (ovalisation).

Les canalisations dans un environnement urbain fonctionnent la plupart au-dessous des chaussées et des trottoirs les exposant aux efforts additionnels dus au trafic.

### III.3. Environnement

Les canalisations étant enterrées en contact direct avec le sol sont exposées aux facteurs environnementaux qui pourraient limiter leur durée de vie en service. Les fluctuations de la température au sol peuvent causer des efforts dans les canalisations dus aux déformations axiales. L'exposition de la surface aux états corrosifs du sol, induisent des réactions chimiques qui peuvent causer l'affaiblissement de la paroi. Des enduits bitumeux ou la protection cathodique sont employés pour la protection contre la corrosion.

## IV. Les pipelines à défauts

Il existe dans la littérature des méthodes qui analysent la nocivité des défauts précités. Elles sont généralement basées sur l'analyse limite, la mécanique de la rupture et la mécanique de la rupture d'entaille. Selon le type de défaut, on choisit l'outil adapté. Par exemple, les fissures sont analysées soit par la mécanique de la rupture soit par l'analyse limite. Les problèmes de corrosion dans les tuyaux sont évalués par l'analyse limite, les enfoncements sont traités par l'analyse limite, les éraflures sont traitées par la mécanique de la rupture d'entaille.

#### **IV.1.Histoire des méthodes d'évaluation des pipelines à défauts**

L'effet des défauts dans les structures a été étudié qualitativement à partir du 15<sup>ème</sup> siècle par Leonard de Vinci [2]. Celui-ci a mesuré la force d'élongation d'un fil de fer et a observé que la force d'élongation du fil était plus importante pour un fil court que pour un fil long. Il a introduit le concept de distribution volumique des défauts.

En 1920, Griffith [3] a publié pour la première fois une formule reliant la contrainte à la rupture à la taille des irrégularités (défauts). Cette relation découle d'un simple bilan énergétique à partir d'une analyse des contraintes au niveau d'un trou elliptique fait précédemment et de la première loi de la thermodynamique. Toutefois, ces travaux sont applicables uniquement aux matériaux parfaitement élastiques.

Avant les années 1950, l'ingénierie des structures ne prenait pas en considération la présence des fissures. Ces dernières étant jugées inacceptables en termes de qualité, sans avoir été évaluées quantitativement.

Dans les années 1950, cette évaluation prenait un intérêt majeur pour l'industrie aéronautique aux Etats-Unis, notamment pour la rupture des alliages d'aluminium. Dans les années 1960, cet intérêt s'est déplacé aux risques des alliages d'aluminium. Toujours dans les années 1960, cet intérêt s'est déplacé aux risques de ruptures dans les centrales nucléaires.

Cela conduira à la mise au point de la mécanique élastoplastique de la rupture en utilisant diverses approches (facteur d'intensité de contraintes ( $k$ ), Intégrale  $J$  et écartement de fissure (CTOD)). Les décennies 1950 et 1960 ont également été une période où la sécurité des canalisations de gaz et de pétrole a commencé à préoccuper les compagnies pétrolières, principalement aux Etats-Unis en raison de la taille et du vieillissement de ces canalisations.

Les premiers travaux de recherche sur la rupture des pipelines présentant des défauts ont été réalisés par John F.Kiefner et al, à l'institut de Battelle [4]. La majorité de ces travaux était basée sur des essais d'éclatements de tubes. L'objectif principal de ces travaux était d'observer et de comprendre les relations entre les essais d'éclatements et la taille des défauts détectés.

## IV.2. Le PDAM (The Pipeline Defaut Assessment Manual)

Il existe plusieurs codes et manuels techniques d'évaluation des défauts dans les canalisations. Les plus utilisés ont été cités précédemment. Ces derniers utilisent simultanément la mécanique de la rupture et l'analyse limite. Les résultats analytiques et numériques obtenus sont renforcés par des résultats expérimentaux. Pour mieux comprendre le fonctionnement et l'application de ces codes et manuels, une brève présentation du PDAM est faite ci-après [5].

### IV.2.1. Présentation du PDAM

**PDAM** est un manuel d'évaluation des défauts dans les pipelines. Ce dernier contient les différentes techniques disponibles actuellement pour l'évaluation des défauts des canalisations (corrosion, soudures, indentation, éraflures, ...).

Ce manuel est basé essentiellement sur des essais mécaniques et permet de maintenir un niveau de sécurité élevé. En plus de l'identification des meilleures méthodes, ce manuel a servi aussi à donner les limites empiriques de l'application des méthodes existantes.

Le PDAM suit le format suivant pour chaque méthode d'évaluation de défaut :

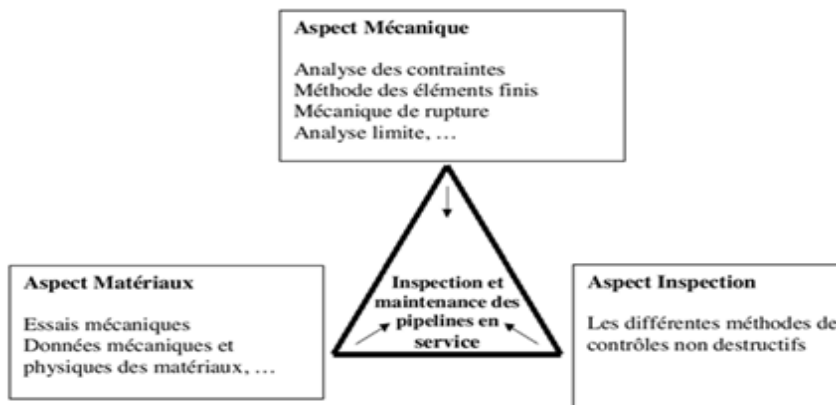
- Une brève définition du type de défaut,
- Une figure illustrant les dimensions et l'orientation du défaut relativement à l'axe du tube,
- Les notes sommaires qui accentuent les problèmes particuliers associés au défaut,
- Un organigramme récapitulant l'évaluation du défaut,
- L'information minimale requise pour évaluer le défaut,
- La méthode d'évaluation,
- La gamme d'applicabilité de la méthode et toutes les limitations spécifiques,
- Un modèle d'incertitude approprié à l'application de la méthode d'évaluation,
- Un exemple d'application de la méthode d'évaluation,
- Les références utilisées.

#### IV.2.2. Principaux types de défauts évalués dans le PDAM

- Défauts de corrosions,
- Eraflures,
- Enfoncements (lisses, dans des soudures, combinés avec éraflures, etc.),
- Défauts de fabrication dans les tubes,
- Différents types de défauts dans les soudures et les fissures.

#### V. Inspection et maintenance des canalisations en service

L'inspection et la maintenance des canalisations en service est un domaine multidisciplinaire. Il associe trois secteurs technologiques : Inspection, Matériaux et Mécanique. Ces trois secteurs sont présentés sur la figure II.1 avec leurs diverses fonctions.



**Figure I.1. Trois secteurs technologiques impliqués dans l'inspection et la maintenance des pipelines en service [7].**

Ces trois secteurs sont représentés par les sommets du triangle de la figure I.1. Les inspecteurs sont les yeux et les oreilles de chaque unité opérationnelle ; ils examinent, regardent et recueillent des données critiques à l'issue de l'inspection. Ils examinent les problèmes et spécifient le type et la procédure de réparation.

Les spécialistes des matériaux représentent le second secteur. Ces derniers ont pris connaissance des différents matériaux utilisés ainsi que leurs différentes propriétés mécaniques et physiques pour en optimiser le choix.

Le troisième et dernier secteur est celui de la mécanique. Ce secteur a comme objectif l'évaluation des contraintes auxquelles sont soumises les canalisations aux moyens de diverses techniques analytiques et théoriques existantes à ce jour (Exemple : les éléments finis, la mécanique de la rupture, l'analyse limite, ...). Le besoin économique et sécuritaire a conduit les

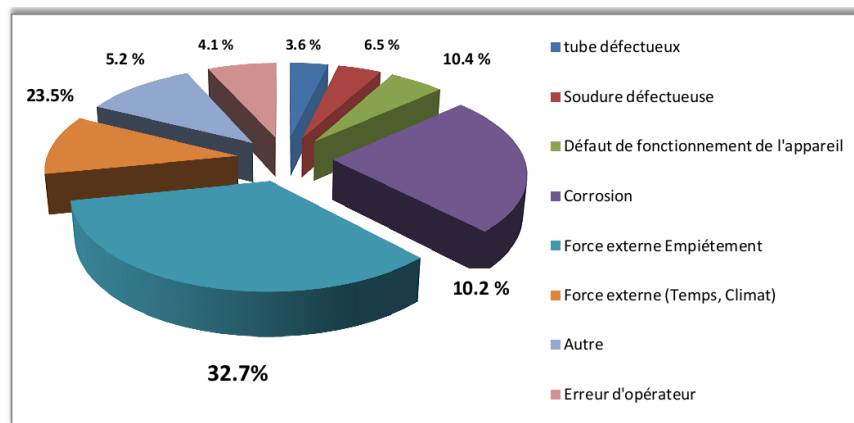
chercheurs et les ingénieurs à mener des études très poussées dans cette perspective afin d'évaluer de façon très précise la nocivité des défauts rencontrés dans les canalisations.

## VI. Causes des défaillances des tubes

Les causes des défaillances des tubes ou tuyaux sous pression sont de diverses natures. Elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite «fissure».

La plupart de ces défaillances sont causées par des piqures de corrosion ou par des fissurations de corrosion sous contrainte. Mais, il existe également des problèmes liés aux défauts de soudage.

Les mouvements de terrain (glissement du sol, tremblement de terre, ...) peuvent aussi être la cause de dommage sur tubes enterrés. Les exploitants des tubes étudient ces problèmes depuis longtemps et possèdent une bonne connaissance des méthodes permettant de les gérer, figure I-2.



**Figure. I.2. Causes des ruptures de pipelines en cours d'exploitation enregistrées par les membres de L'ACPRÈ de 1985 à 1995 (Association Canadienne des Pipelines de Ressources Energétiques) [7].**

Cependant, il ne faut tout de même pas négliger les agressions mécaniques extérieures. En effet, il arrive que les tubes soient endommagés ou perforés accidentellement lors de travaux d'excavation par des engins de chantier [7].

Les problèmes d'amorçage des fissures en fatigue et les ruptures émanant de concentrations de contraintes sont à l'origine de plus de 90% des ruptures en service. La présence d'une discontinuité géométrique telle qu'une entaille va provoquer l'affaiblissement de la résistance à la rupture du tube puisqu'elle va réduire la section de ce dernier en le rendant plus sensible à la pression de service et aux efforts causés par les mouvements des sols. Ensuite, un effort d'amplification locale de la contrainte va faire croître la dangerosité de ce défaut.

## VII. Types de défauts précurseurs de la rupture des canalisations

Les canalisations sont largement employées pour le transport de fluides et de gaz car c'est le mode d'acheminement actuellement le plus économique. L'accroissement de leur diamètre et de la pression de service augmentent le risque de rupture amorcée à partir de défauts.

La présence d'un défaut dans une canalisation, associée à l'effet de la pression interne pourra provoquer une rupture localisée induisant une fuite et éventuellement une explosion.

Généralement, pour les canalisations, on distingue les défauts suivants : les cratères de corrosion, les fissures, les enfoncements, les éraflures et les défauts dits combinés (enfoncements + éraflures).

### VII.1. Corrosion dans les pipelines

Le problème de corrosion dans les pipelines à été traité par plusieurs auteurs [12, 15, 16, 17]. Généralement, la corrosion est très présente sur les canalisations métalliques. Elle conduit à une diminution de l'épaisseur des canalisations dans les zones affectées comme le montre la figure (I.3).

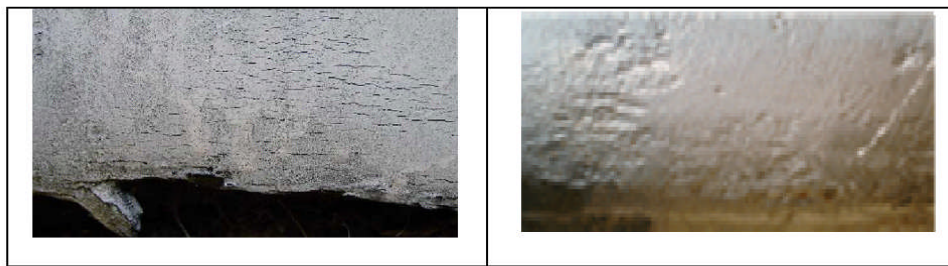


Figure I.3. Défaut de corrosion sur la paroi externe d'une canalisation métallique [7].

### VII.2. Les éraflures

Une éraflure est un endommagement superficiel de la surface, dû à un contact avec un corps étranger qui provoque un enlèvement de la matière (figure I-4). Cette éraflure peut être considérée comme une entaille. Les dimensions d'une éraflure sont définies de façon à ce que la longueur soit plus grande que la largeur [7]. Le choc causé par l'agression externe peut néanmoins provoquer de graves endommagements au tuyau. En service, l'action de la pression pourra provoquer une rupture localisée qui provoquera elle-même une fuite et éventuellement une explosion.



Figure I.4. Les éraflures [7].

### VII.3. Les Enfoncements

Un enfoncement dans un pipeline est une déformation plastique permanente de la section circulaire de la paroi du tube, due à un impact avec un corps étranger (exemple : godet d'un engin de travaux publics pour les canalisations enterrés ou posées par terre, ancras de bateaux pour les pipelines immergés). Autrement dit, un enfoncement est un changement de la courbure de la paroi du pipeline sans changement d'épaisseur. La profondeur de cet enfoncement est définie comme la réduction maximale du diamètre du tuyau par rapport à son diamètre initial, figures I.5.a et I.5.b.

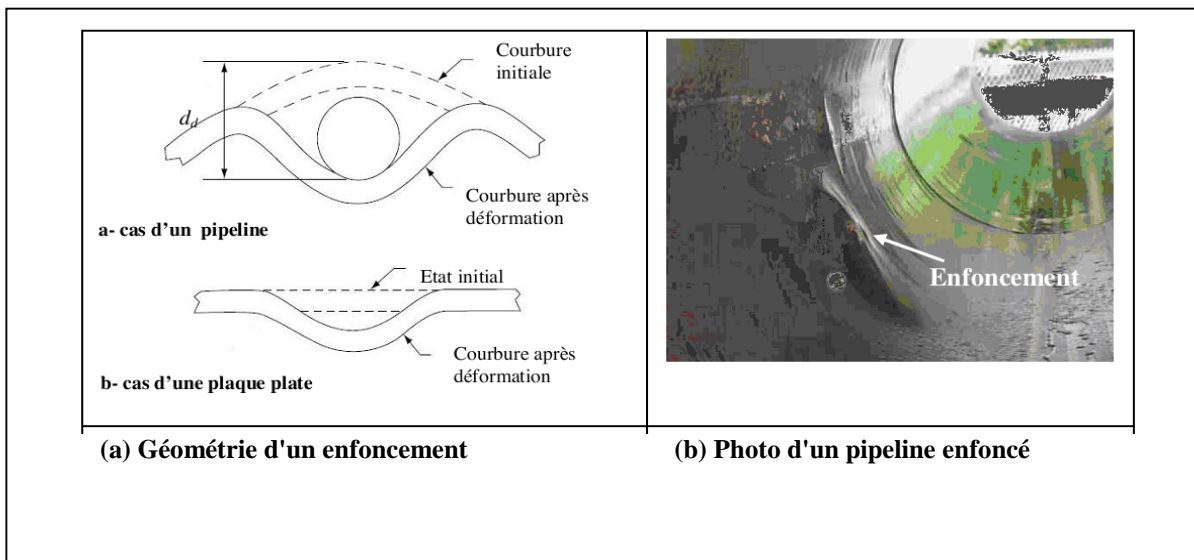


Figure I.5. Les Enfoncements [7].

#### VII.4. Les Fissures

La fissure n'est pas une cause mais un effet. Une faible capacité de déformation et une faible résistance en traction, compression ou en pression, rendent les matériaux très sensibles à la fissuration.

La sensibilité des matériaux aux fissures est moindre si le matériau a un caractère ductile. En effet, la présence de telles fissures entraîne la redistribution des contraintes localement. La rupture débute au voisinage de cette fissure où les contraintes seront élevées et peuvent être comparées à la résistance à la rupture du matériau. Ce fait permet d'utiliser des méthodes de calculs simples pour estimer les dimensions critiques des fissures à partir de la limite d'écoulement ou de la limite d'élasticité ou encore de la combinaison de la limite d'élasticité et de la limite à la rupture.

Ces méthodes simplifiées de détermination de la limite d'admissibilité et la dimension critique des fissures dans un pipeline (Figure I.6), nécessitent de connaître les données géométriques du tube et de la fissure ainsi que les caractéristiques mécaniques du matériau.



**Figure I.6. Construction de grands tubes en acier pour le transport du gaz [7]**

### VII.4.1. Evaluer le risque de fissure

Pour évaluer le risque de rupture brutale d'une structure ou d'un composant fissuré, l'approche de la mécanique appliquée à la rupture permet de quantifier ce risque. Celle-ci compte trois aspects :

- Ténacité du matériau : sa capacité de résistance à la rupture brutale en présence d'une fissure ;
- Défaut : sa présence, sa localisation, son orientation, sa nature et sa taille ;
- Sollicitations mécaniques : qu'elles soient d'origine externe ou interne.

### VII.4.2. Ténacité

Pour donner une première appréciation de l'ordre de grandeur de la ténacité (la résistance à la fissuration) des matériaux métalliques, on peut souvent classer les matériaux, d'après leurs comportements et leurs propriétés en trois catégories selon la limite d'élasticité et le module de Young :

➤ Les matériaux à haute résistance lorsque :  $\frac{\sigma_0}{E} \succ \frac{1}{150}$  I-1

- ✓ Rupture sans déformation plastique ;
- ✓ Ecart plastique nul.

➤ Les matériaux à moyenne résistance lorsque :  $\frac{1}{300} \prec \frac{\sigma_0}{E} \prec \frac{1}{150}$  I-2

- ✓ Rupture accompagnée de faible déformation plastique ;
- ✓ Ecart plastique faible.

➤ Les matériaux à faible résistance lorsque :  $\frac{\sigma_0}{E} \prec \frac{1}{300}$  I-3

- ✓ Rupture accompagnée de forte déformation plastique ;
- ✓ Ecart plastique important.

La variation de la ténacité selon la nature des matériaux est le paramètre essentiel pour définir cette propriété. Toutefois, il existe d'autres paramètres tels que les dimensions de la structure. Dans le cas des pipelines c'est l'épaisseur.

## **VIII. Contrôles des pipelines**

### **VIII.1 Contrôles destructifs (ASTM A 370)**

Les différents contrôles destructifs décrits ci-après, sont utilisés pour vérifier les propriétés mécaniques imposées par les normes et spécification des produits, cités ci-après : traction, pliage, dureté, flexion, etc.

#### **VIII.1.a. Essai de traction**

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette de section cylindrique ou prismatique à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Cet essai est réalisé sur une machine spéciale qui enregistre les efforts et les allongements. L'essai permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau ductile. La norme de référence est la NF EN 10002-1 Octobre 1990.

#### **VIII.1.b. Essai de pliage**

L'essai consiste à exercer sur une éprouvette, à température ambiante, une déformation plastique par pliage. Une seule face de l'éprouvette est mise en extension (endroit, envers ou côté). Le pliage est réalisé jusqu'à ce que l'une des branches de l'éprouvette fasse un angle  $\alpha$  déterminé avec le prolongement de l'autre branche. La norme de référence est la NF EN 910 MAI 1996.

#### **VIII.1.c. Essai de dureté**

L'essai consiste à appliquer sur une pièce à mesurer, un pénétrateur sous une charge d'appui  $F$  donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions de l'empreinte du pénétrateur laissée sur la surface du matériau contrôlé.

### **VIII.2. Contrôles non destructifs**

#### **VIII.2.a. Contrôle visuel et dimensionnel**

Le contrôle visuel et dimensionnel consiste en une vérification visuelle de son aspect physique et de ses dimensions géométriques. Par exemple, avec une loupe grossissante de 2 à 5 fois.

### VIII.2.b. Contrôle par ultrasons

Les ondes ultrasoniques sont envoyées dans la pièce par une sonde. Elles sont réfléchies par la surface de fond et renvoyées à la sonde qui les convertit en impulsions électriques visualisées sur un oscilloscope (figure I.7).

Si sur leur trajet elles rencontrent un défaut, celui-ci produira une réflexion et un écho qui parviendra à la sonde avant celui de fond. Cette technique requiert un opérateur très expérimenté pour interpréter les résultats. On choisira le type de contrôle en fonction de la qualité voulue pour le joint et du coût de la pièce.

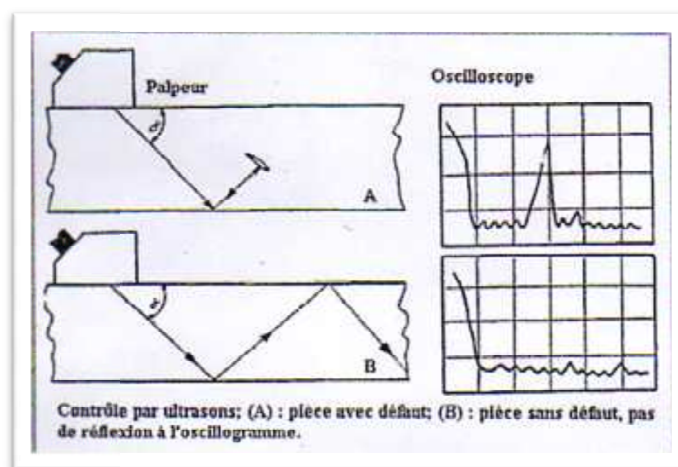


Figure I.7. Contrôle par ultrasons [7].

### IX. Sollicitations mécaniques

Une structure est destinée à résister à un certain nombre de sollicitations mécaniques de nature statique. Ce sont les sollicitations permanentes de nature cyclique telle que la pression dans un pipeline, ou les vidanges et les remplissages, ou les agressions, telles que les chocs, les séismes, etc. Les sollicitations de natures statique et cyclique sont relativement bien connues. Celles par niveaux d'agression sont généralement plus mal connues et un risque admissible particulier est associé à ces situations ou événements.

Les efforts exercés sur les canalisations peuvent être le résultat d'une combinaison de la pression interne de fonctionnement, d'une charge du sol, de l'effet de l'environnement et éventuellement d'impacts accidentels pendant l'installation ou durant le service.

## **IX.1.Principaux modes de dégradation des tuyauteries**

### **IX.1.1. Mode général**

Exemple : corrosion atmosphérique des aciers non ou faiblement alliés avec localisation préférentielle (sous les supports, sous les gouttières, en génératrice inférieure, attention aux environnements : proximité de la mer, d'une cheminée, d'une tour de refroidissement) (Aciers non ou faiblement alliés dans les acides (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, acide formique, acide acétique, ...) (Aciers inoxydables dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, (Aciers non ou faiblement alliés dans la soude concentrée et chaude (Corrosion sous calorifuge des aciers non alliés ou faiblement alliés (Corrosion dans les milieux HCl, Cl<sub>2</sub>, HF, organiques secs, anhydriques lors de la reprise d'humidité après ouverture et avant nettoyage préalable.

### **IX.1.2. Mode localisé: (corrosion sous contraintes (CSC) - par piqûre - corrosion caverneuse)**

Exemple : fissuration sous tension des aciers inoxydables austénitiques en présence de chlorures (Corrosion atmosphérique sous calorifuge), (Corrosion bactérienne exemple bactéries sulfato-réductrices), (Corrosion sous dépôts : sulfures d'ammonium, chlorures d'ammonium...) (Aciers inoxydables austénitiques dans des solutions chlorurées et aérées), (Corrosion des aciers inoxydables austénitiques sous joint : aciers non alliés en présence de nitrate ou de soude, tuyauteries de soude en Acier Carbone tracées à la vapeur)

### **IX.1.3. Mode assistée par des facteurs mécaniques (Erosion / corrosion - Abrasion / corrosion - Cavitation / corrosion - Frottement / corrosion) :**

Exemple : Aciers non ou faiblement alliés dans un flux d'acide sulfurique concentré ( $v > 0,8$  m/s) ou de Chlore Matériaux métalliques dans un milieu contenant des particules solides en mouvement Endommagement des robinets sur circuits à vitesse élevée Cas des assemblages boulonnés soumis à des vibrations

## **IX.2. Dégradation liée à des facteurs mécaniques (Fluage - Rupture fragile - Rupture ductile - Fatigue mécanique - Fatigue thermique - Abrasion pure - Flambage) :**

Exemple : Lignes de vapeur haute température en acier non allié. Lignes de reforming. Acier ferritique utilisé au-dessous de sa température de transition, chocs thermiques, ... Cas des matériaux utilisés au-delà de leur température de transition, soumis à des contraintes excessives. Vibration des tuyauteries (ex : au voisinage de compresseur alternatif) Tuyauterie

soumise à des fluctuations thermiques (ex points de mélange) Acier austénitique sous flux d'une bouillie de silice Acier soumis à des contraintes de compression (Dilatation différentielle / point fixe, etc.)

### **IX.3. Rôle du personnel de la production et de la maintenance**

Le rôle du personnel d'exploitation (production et maintenance) est essentiel pour la maîtrise de l'état des tuyauteries et notamment pour constater d'éventuels dommages, changement d'état... Ce personnel assure une présence régulière sur le terrain, il est en mesure de détecter précocement des anomalies. Bien qu'il ne soit pas spécialiste des équipements sous pression, il est apte à détecter lors des rondes, de manœuvres ou de travaux sur les unités, les anomalies telles que :

- fuites dues à la corrosion ou à des assemblages amovibles (joints de brides...),
- écoulements d'eau ou de produit sur une tuyauterie,
- projections (ex : de vapeur) sur une tuyauterie,
- importante corrosion localisée ou non,
- vibrations, coup de bélier,
- calorifuge en mauvais état, présence de mousse, suintements,
- peinture ou revêtement extérieur de protection dégradé localement
- supports défectueux,
- déformations (affaissements, tuyauterie sortie de ses patins supports, impacts...)
- ensablement des tuyauteries
- zone envahie par la végétation.

### **IX.4. Contraintes**

Suite aux différents chargements, les pipelines sont soumis à des contraintes dites principales et à des contraintes thermiques résultant des différents types d'élaboration.

### IX.4.a. Contraintes principales

Dans une conduite, les contraintes principales s'exercent dans deux directions : le long de la circonférence de la conduite (contrainte transversales  $\sigma_T$ ) et longitudinalement dans l'axe de la conduite (contrainte longitudinale ou axiale  $\sigma_L$ ).

Les fissures se forment de façon perpendiculaire à la direction de la contrainte. On trouve les fissures longitudinales (axiales) dans les zones de contraintes transversales élevées. Quant aux fissures transversales, on les trouve dans les zones de contraintes axiales élevées (figure I.8).

Pour les pipelines à paroi mince, soumis à la pression, on peut considérer que la contrainte est constante dans l'épaisseur de la paroi ; on a :

$$\sigma_T = \frac{P.R}{t} \quad \text{I-4}$$

$$\sigma_L = \frac{P.R}{2t} \quad \text{I-5}$$

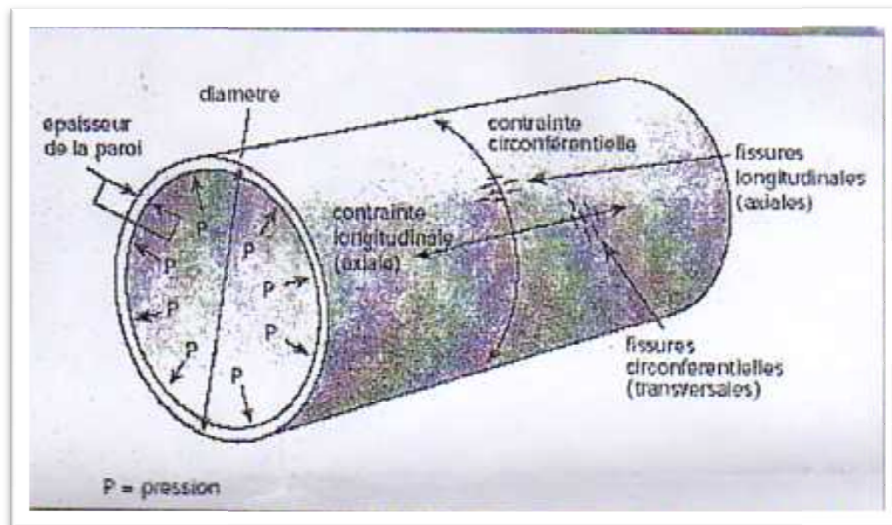


Figure I.8. Contraintes s'exerçant sur un pipeline [9].

### IX.4.b. Contraintes thermiques

Les écarts de température à l'intérieur de la paroi de la conduite peuvent causer des contraintes de flexion circonférentielle localisées. Ces contraintes sont en général sans conséquence pour

les pipelines. En effet, la paroi est assez mince et il n'y a pas d'écart de température entre la surface extérieure et l'intérieur de la paroi.

Pour les réseaux sous-mains, la même tendance à l'accroissement des diamètres est observée. Toutefois, les pressions de service élevées et les difficultés de construction et de réparation des conduites font qu'on se limite actuellement aux diamètres d'environ 1000 mm.

## X. Pose enterrée de la canalisation en PE (polyéthylène)

### X.1. Tracé

Il doit rester en accord avec le projet. Cependant, la souplesse naturelle des tubes en PE leur permet d'éviter l'utilisation de coudes lorsque les rayons de courbures du tracé sont compatibles avec les rayons de courbures des tubes PE [8].

### X.2. Rayon de courbure

La pose en longueur, spécifique des canalisations en PE enroulables en couronnes et/ou tourets, permet également une exécution plus rapide du chantier en utilisant moins de raccordement.

Lors des chargements de direction, la pose en courbe est recommandée puisqu'elle limite les pertes de charge et les effets de coup de bélier. Pour les tubes de SDR (Rapport Dimensionnel Standardisé D/e) inférieur ou égal à 11, un rayon de courbure de 25 fois le diamètre nominal du tube est recommandé, selon la figure I.9.

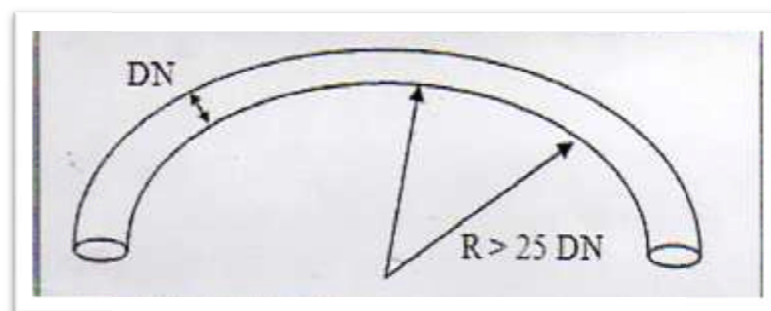


Figure I.9. Rayon de courbure [8].

### X.3. Effet du coup de bélier

Le calcul de la vitesse de l'onde de pression dans une canalisation en PE est basé sur la formule d'ALLIEVI. Elle est donnée ci-dessous, sous une forme plus pratique :

$$V = \sqrt{\frac{K}{\rho \cdot (1 + \frac{K \cdot d}{e \cdot E})}} \quad \text{I-6}$$

Où :

V : vitesse d'onde de pression (m/s) ;

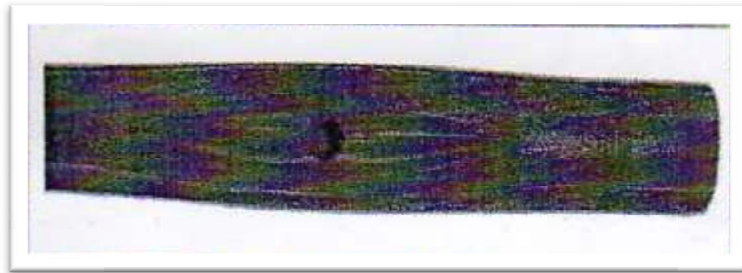
K : module d'élasticité à la compression du liquide (Pa) ;

$\rho$  : masse volumique du liquide (Kg/m<sup>3</sup>) ;

d : diamètre intérieur de la canalisation (mm) ;

e : épaisseur de la paroi du tube (mm) ;

E : module d'élasticité du tube (Pa).



**Figure I.10. Effet du coup de bélier [8].**

#### **X.4. Largeur et profondeur de la tranchée**

La largeur de la tranchée doit permettre une pose correcte et le compactage du remblai. Les surlargeurs en (mm) de part et d'autre du tube sont les suivantes (**Tableau I.1**) [8] .

<b>DN du tube en mm</b>	<b>Sur largeur en mm</b>
<b>20 à 160</b>	100
<b>180 à 600</b>	300
<b>&gt;600</b>	400

**Tableau I.1. Les surlargeurs de la tranchée [8].**

La profondeur minimale recommandée est de 0.8 m par rapport à la génératrice supérieure pour les canalisations d'adduction d'eau.

### **X.5. Remblayage des fouilles**

Les fouilles sont implantées avant exécution et matérialisées sur le terrain, et sont réalisées à une bonne profondeur : soit de 10 à 20 centimètres au-dessous de l'arase inférieure de la canalisation.

### **XI. Conclusion**

Les pipelines sont des structures soumises à beaucoup de sollicitations, et d'agressions internes, et externes, ce qui augmente le risque de leur corrosion et fissuration. Pour remédier à cela plusieurs méthodes de réparation sont utilisées notamment la réparation par collage de patches en matériaux composites, qui est censée être la méthode la plus appropriée vu son efficacité, sa facilité de mise en œuvre, et l'économie de temps et de main-d'œuvre.

# **Références**

# **Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

---

- [1] Nath, P. Trench Excavation Effects on Adjacent Buried Pipe: Finite Element Study , Journal of Geotechnile Engineering, New York, NY, 109(11), 1399-1415.
- [2] Macdonald, K.A., Cosham, A. Best practice for the assessment of defects in pipelines – gouges and dents, Engineering Failure Analysis Vol.12, 720–745, 2005.
- [3] Griffith, A. A., Phil Trans. Roy. Soc. London, A.221, pp163-198, 1920
- [4] Kiefner, J. F., Maxey, W. A., Eiber, R. J., Duffy, A.R., Failure stress loads of flaws in pressurised cylinders , ASTM STP vol. 536. Philadelphia, p. 461–81, 1973.
- [5] Cosham, Hopkins, P. The Pipeline Defect Assessment Manual, International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2002.
- [6] Cardier, D. R, Taylor, M.E. et Pocock, R.G. Response of a pipeline to Ground Movements Caused by Trenching in compressible Alluvium ,Department of the Environment of Transport TRRL Report LR 1047, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.1982.
- [7] Mustapha ALLOUTI, Étude de la nocivité de défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaisons, thèse de Doctorat, Spécialité : Sciences de l'Ingénieur, Option : Mécanique des matériaux, Université Paul Verlaine de Metz, page 1-20;
- [8] STPM Chiali, Catalogue technique, tunique Polyéthylène (PE) et accessoire, Certificat N CC1788-013469,013866. Edition 2005.
- [9] Julien CAPELLE, Étude de la nocivité d'un défaut de type éraflure sur une conduite destinée au transport de gaz naturel soumise à une pression d'hydrogène, thèse de Doctorat, Spécialité : Sciences de l'Ingénieur, Option : Mécanique des matériaux, Université Paul Verlaine de Metz, page 10, Soutenue à Metz le 4 Novembre 2008;

## **Chapitre II**

### **Adhésion et adhésif**

## I. Introduction

Le collage permet d'assembler deux substrats par l'intermédiaire d'un tiers corps, qui est le plus souvent un adhésif polymère (la colle). Pour que l'assemblage soit performant et durable, il est nécessaire d'obtenir un niveau d'adhésion satisfaisant entre adhérent et adhéru. Cette condition implique une bonne compréhension des mécanismes qui sont à l'origine du phénomène d'adhésion.

La qualité de la tenue en fatigue d'une structure collée ou réparée est limitée par celle de la colle. De nombreuses études ont été consacrées à l'étude théorique des contraintes dans le patch composite et dans la colle [1-4] car cette dernière est souvent le point faible dans une réparation. En effet, elle est souvent à l'origine des défaillances du patch composite [5] car c'est sa rupture ou sa décohésion qui provoque le détachement du renfort composite. En effet, 53% des défaillances constatées dans les structures ainsi réparées sont dues à la colle [5]. Ces défaillances sont essentiellement dues au transfert d'effort du substrat vers le patch composite. Cette zone de transfert d'effort entraîne en effet un pic de cisaillement à proximité du bord libre du patch composite. Le calcul des distributions de contraintes est donc un point important pour proposer une solution de renforcement adaptée. Plusieurs modèles ont été développés sous certaines hypothèses afin de faciliter la résolution du problème. L'approche la plus simple pour le calcul des contraintes dans la colle consiste à considérer qu'elle ne travaille qu'en cisaillement et que celui-ci est constant dans toute la zone de recouvrement. Cependant, les premiers travaux un peu plus élaborés sont généralement attribués à Volkersen [6], qui a proposé un modèle de joint collé à simple recouvrement dans le cadre des hypothèses suivantes : les matériaux ont tous un comportement élastique linéaire ; les adhérents travaillent en traction/compression ; la colle travaille en cisaillement ; les contraintes sont supposées constantes suivant l'épaisseur des matériaux et la flexion de l'assemblage est négligée. De Bruyne [7] a ensuite adapté ce modèle pour les joints à double recouvrement. Goland et Reissner [8] ont étudié l'influence de la flexion du joint collé sur la distribution des contraintes. En 1973, Hart-Smith [2-3] a intégré la plasticité de la colle et la dilatation thermique des adhérents pour les joints à simple et double recouvrement. La première étude partielle sur l'effet bidimensionnel dû au coefficient de Poisson date de 1973 [9]. Elle a depuis été étendue au calcul complet des champs de contraintes dans un assemblage collé de forme rectangulaire soumis à des chargements mécaniques. La plupart des modèles analytiques existant jusqu'alors étaient unidimensionnels. Le passage à un assemblage rectangulaire a permis d'analyser finement des effets 2D liés au couplage des contraintes entre les deux directions de l'assemblage [10]. De nombreux autres travaux ont été

mènes, notamment sur la prise en compte des grands déplacements [11] ou l'influence de la non-linéarité du comportement de la colle. Bigwood et Crocombe [12] ont modélisé la non-linéarité du comportement de la colle en résolvant numériquement un système non-linéaire de six équations différentielles. Adams et Mallick [13] ont considéré un comportement élastoplastique de la colle en introduisant la notion de module effectif équivalent en résolvant le problème par itérations. Des études numériques ont également été menées sur l'influence de la forme du bourrelet de colle [14] ou de la zone d'ancrage [15] sur les pics de contraintes dans la colle. Il faut noter cependant que ces modèles prévoient généralement un pic de contrainte dans la colle au niveau du bord libre et ne respectent pas la condition de contrainte nulle à l'extrémité libre du joint. Ils surestiment donc en général le pic de contrainte se produisant effectivement dans la colle. Il est important de noter que de telles théories sont unidirectionnelles, au sens où la structure renforcée est soumise à des conditions de chargement simples et que les contraintes sont calculées suivant un modèle de poutre renforcée. Les structures renforcées sont cependant plus complexes, elles sont typiquement des structures bidimensionnelles soumises à des états de contraintes plus compliqués que les tests usuels de cisaillement de joints collés [16,17].

Des études ont mis en évidence le comportement viscoélastique d'une colle époxyde, la FM 73 [18, 19]. Ce comportement viscoélastique dépend en outre de la température à laquelle la sollicitation est appliquée [20]. En effet, la rigidité de la colle chute lorsque la température augmente. De nombreux modèles rhéologiques permettent alors de modéliser quantitativement le comportement viscoélastique linéaire observé. Ils sont obtenus en combinant des éléments ressorts et amortisseurs de différentes manières. Cependant, des travaux sur le comportement de colles époxydes révèlent une non-linéarité des paramètres rhéologiques mesurés en fonction du niveau de chargement appliqué [21,22].

La résistance à la fatigue du composite ou celle de la colle sous chargement de fatigue, dépend de nombreux paramètres tels que la préparation de la surface, les défauts ou la forme du bourrelet de colle le long des bords libres du patch [23] ou encore la présence ou non d'un dégradé d'épaisseur vers le bord libre des patches composites. Il est bien connu qu'un pic de contrainte de cisaillement transverse prend naissance près des bords libres du patch composite [9]. Cet état de contrainte locale dans la colle doit influencer la réponse mécanique globale de la structure renforcée. La mise en place d'un bourrelet de colle à profil bien contrôlé ou d'un escalier le long du bord libre des patches composites réduit les contraintes de cisaillement [24]. Certaines études ont été réalisées sur la forme du bord libre du patch pour limiter le pic de contrainte de cisaillement dans la colle [25]. La réalisation d'un collage consiste à mettre en

contact des surfaces imparfaites et à établir des liaisons physiques ou chimiques entre ces surfaces par le biais de l'adhésif. Il existe de nombreuses théories relevant de la physico-chimie, de la tribologie et d'autres disciplines, qui rendent compte de ces interactions entre adhérent et adhérent. Cependant, aucune de ces théories ne permet d'expliquer à elle seule le phénomène d'adhésion, car celui-ci résulte de la superposition de nombreux mécanismes élémentaires.

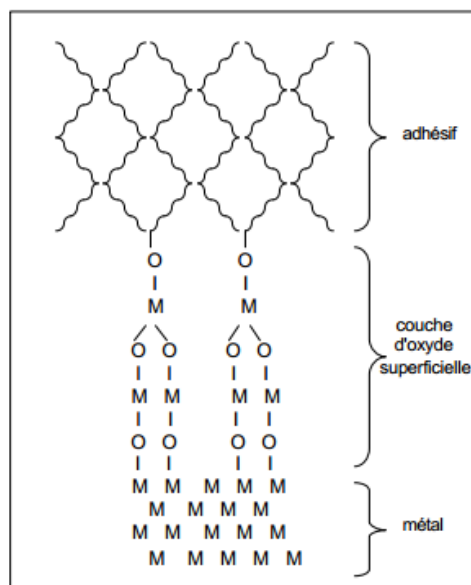
## II. Modèle d'adhésion

### II.1. Modèle de la liaison chimique

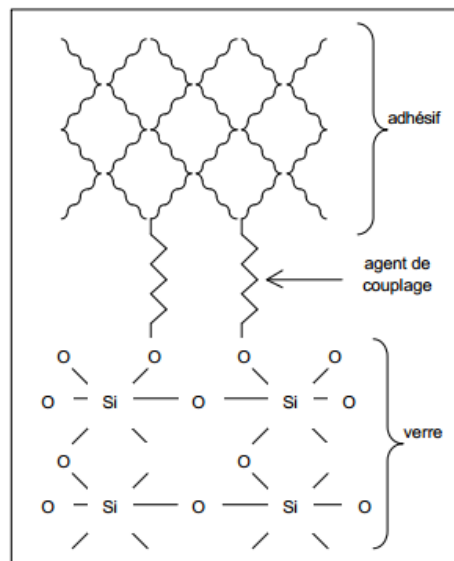
Il est parfois possible de créer à l'interface colle/substrat des liaisons covalentes ou ioniques lors de réactions chimiques. Ces liaisons seront autant de points d'ancrage qui assureront une grande résistance à la rupture et une bonne durabilité de l'assemblage.

Ces liaisons chimiques peuvent être créées de deux manières

- 1) par réaction directe entre l'adhésif et le substrat; c'est par exemple le cas entre une résine epoxyde et la couche d'oxyde superficielle d'un métal (figure II.1).
- 2) par l'intermédiaire d'un agent de couplage, c'est-à-dire d'une molécule compatible à la fois avec la colle et avec le substrat. C'est généralement la technique utilisée pour obtenir une bonne adhésion entre une matrice époxyde et des fibres de verre dans les matériaux composites (figure II.2)



**Figure II.1. Exemple de liaison chimique directe entre adhérent et adhérent [25].**

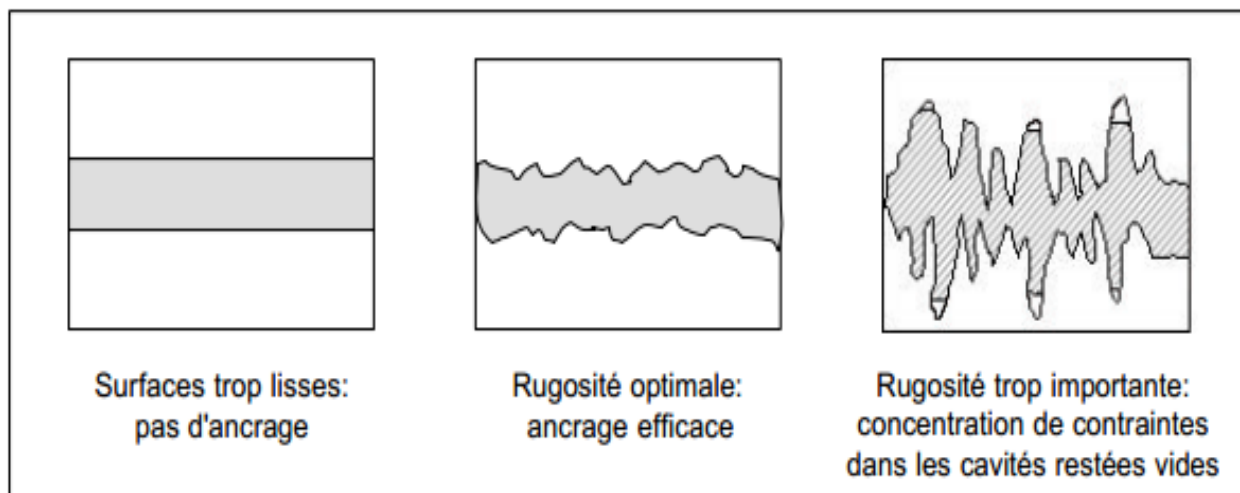


**Figure II.2. Utilisation d'un agent de couplage pour former une liaison chimique [25].**

## II.2. Modèle mécanique

Le modèle mécanique a été proposé par Mac Bain et Hopkins (1925) [27], il considère que l'adhésion résulte essentiellement d'un ancrage mécanique des matériaux mis en contact. Le mécanisme mis en jeu est lié à la pénétration de la colle dans les porosités et les aspérités des substrats, ce qui permet de constituer de nombreux points d'ancrage après solidification de l'adhésif. Si la liaison mécanique contribue à accroître l'adhésion par l'augmentation de l'aire de contact effective, et donc du nombre de liaisons interfaciales, elle peut également être un handicap. En effet, il est nécessaire que la colle mouille parfaitement les surfaces afin de ne pas piéger de bulles d'air dans les porosités, ce qui induirait des concentrations de contraintes et fragiliserait le joint. Une rugosité trop importante peut elle aussi être source de bulles d'air: il existe donc une rugosité optimale des substrats à assembler (figure II.3).

Cette théorie trouve des applications essentiellement dans les collages de matériaux poreux (pièces en bois, en papier, en tissus) ou encore de métaux anodisés comme l'aluminium.



**Figure II. 3. Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique [27].**

### III. Adhésifs structuraux

Les adhésifs structuraux, comme tous les polymères, présentent des propriétés physico-chimiques qui évoluent dans le temps en fonction de l'environnement auquel ils sont soumis. Ces phénomènes de vieillissement sont susceptibles d'affaiblir le joint de colle, et doivent donc être pris en compte dans les modèles de durabilité. Devant la multiplicité des phénomènes mis en jeu, il est nécessaire de réaliser un inventaire des connaissances actuelles, de manière à pouvoir dégager les paramètres les plus importants [28].

L'assemblage par collage présente de nombreux avantages par rapport aux techniques traditionnelles comme le rivetage ou le soudage. Elle est tout d'abord très rapide à mettre en œuvre, d'autant plus que son application est souvent automatisée. Elle s'adapte lorsqu'il faut assembler des matériaux différents, fragiles ou minces. L'assemblage entre les matériaux est continu ce qui permet de répartir uniformément les efforts et d'éviter les concentrations de contraintes. Il en résulte une résistance mécanique supérieure à celle produite par le rivetage par exemple. Elle ne nécessite pas d'échauffement local important, comme pour le soudage et ainsi ne modifie pas les propriétés des matériaux à assembler. Le gain en poids est important ; les adhésifs absorbent une partie des vibrations et apportent une isolation aussi bien thermique, phonique qu'électrique.

### III.1. Méthodologie associée au collage structural

Le collage nécessite toutefois quelques précautions d'utilisation. Tout d'abord, il faut choisir le bon adhésif en fonction de la nature des solides à assembler, des sollicitations auxquelles sera soumis l'assemblage, des conditions et des durées de solidification.

Après s'être assuré que les géométries des solides à unir ne vont pas entraîner la localisation de contraintes qui constitueraient des points de faiblesse, il est nécessaire dans la plupart des cas d'effectuer des traitements de surface préalables des solides à coller afin de permettre ou d'améliorer l'adhésion.

De nombreuses études ont démontré l'intérêt du traitement de surface quant à la tenue mécanique des assemblages collés. Le but des traitements est multiple, il s'agit :

- de dégraisser la surface du substrat,
- d'éliminer les couches de contamination en surface qui sont faiblement adhérentes,
- de changer la composition chimique superficielle pour former une couche de haute réactivité chimique,
- de modifier la morphologie de la surface en augmentant la rugosité.

Il ressort de ces études que le traitement de surface est primordial pour obtenir une bonne tenue mécanique. Les grandes catégories de traitements de surface les plus couramment utilisés sont :

- l'abrasion mécanique telle le sablage,
- les traitements chimiques et/ou électrochimiques
- les dépôts plasma,
- l'utilisation de primaires d'adhérence.

A l'issue de l'étape de mise en œuvre, différents défauts sont susceptibles d'être créés au niveau des différentes zones de l'assemblage (cf. figure II.4).

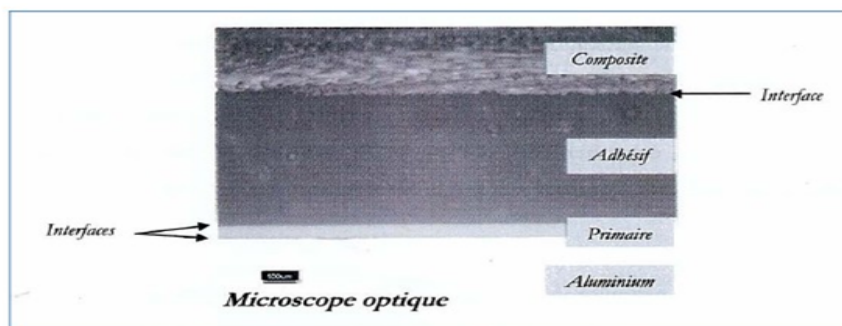


Figure II.4. Vue en coupe d'un assemblage structural [29].

### III.2. Colles structurales

Il existe de nombreuses familles d'adhésifs (ceux à base d'élastomères, tels que les néoprènes, les élastomères thermoplastiques, tel le SBS, les adhésifs thermo-fusibles, tels l'EVA ou les polyamides, les thermodurcissables, telles les résines epoxydes, ...) mais, pour remplir le rôle qui leur est demandé, à savoir joindre dans des conditions parfois sévères des substrats supportant d'importantes charges, les adhésifs structuraux se doivent d'être eux-mêmes mécaniquement résistants.

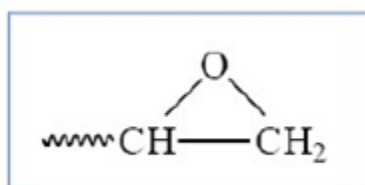
Cette contrainte fait que la plupart des adhésifs structuraux est à structure tridimensionnelle, il s'agit de produits réticulés. Dans la pratique, la majorité des adhésifs structuraux sont composés de résines epoxydes. Toutefois, les familles des polyuréthanes, des acryliques et des phénoliques peuvent être également employées à cette fin.

Un adhésif structural ne pouvant avoir à la fois de hautes performances mécaniques et être souple, l'hybridation des différents types de colle se développe actuellement afin de bénéficier d'une éventuelle complémentarité et additivité de leurs propriétés.

#### III.2.1 Epoxydes

##### III.2.1.1 Constituants

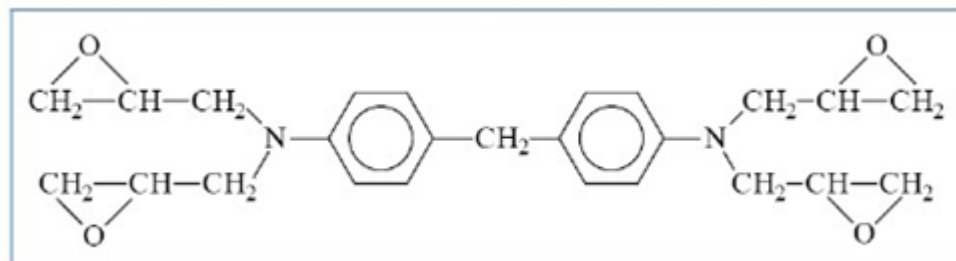
Les adhésifs epoxydes réticulent généralement en présence d'un durcisseur qui va permettre l'ouverture du cycle epoxy (cf. figure II.5) et va ainsi relier les monomères entre eux. Il faut pour cela que les durcisseurs possèdent au moins deux fonctions pouvant réagir avec les pré-polymères. Ce sont la plupart du temps des amines ou des anhydrides.



**Figure II.5. Structure chimique du groupe époxyde [28,50].**

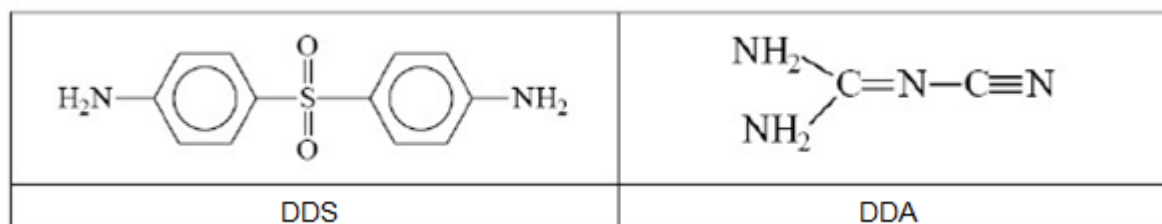
La nature des pré-polymères, celle des durcisseurs et les quantités requises de ces composants seront déterminantes quant aux propriétés finales du mélange. Selon le nombre de fonctions epoxydes que possède le pré-polymère (2, 3 ou 4), celui-ci est bi, tri ou tétra-fonctionnel. Il existe de nombreux pré-polymères epoxydes, le plus connu d'entre eux étant la DGEBA ou DiGlycidylEther du Bisphénol A. Dans l'industrie aéronautique, le plus couramment utilisé

est la TGMMA ou 4,4TétraGlycidylMéthylèneDiAniline (TGDDM en anglais, pour 4,4 TetraGlycidylDiaminoDiphenylMethane). C'est un pré-polymère tétra-fonctionnel de formule chimique dont la structure chimique est donnée par la figure II.6.



**Figure II.6. Structure chimique du TGMMA [29].**

Les principaux durcisseurs associés sont la DDS, ou 4,4 DiaminoDiphénylSulfone, et la DDA, ou DicyanDiAmide. Les structures chimiques de ces deux composés sont représentées sur la figure II.7.



**Figure II.7. Structure chimique des durcisseurs DDS et DDA [29].**

Selon les propriétés physiques, chimiques et/ou mécaniques attendues, d'autres composants peuvent éventuellement être introduits dans la formulation. On retiendra principalement l'addition :

a) de charges minérales : Elles peuvent intervenir à des taux très importants (de l'ordre de 65% en masse de la formulation de la résine) et permettent d'augmenter la viscosité de la résine non réticulée, ainsi que la tenue thermique et les propriétés mécaniques du réseau réticulé. Enfin, elles baissent fortement le prix de la résine. Il s'agit généralement de particules de silice mais on trouve aussi des charges à base d'aluminium (Al pur,  $Al_2O_3$ ,  $Al(OH)_3$ ), de magnésium, ...

b) de catalyseurs : Ils servent à augmenter la vitesse de réticulation. Leur nature dépend des constituants de la résine. Les catalyseurs généralement utilisés avec la TGMMA sont des composés de type  $BF_3$  quand le durcisseur est la DDS et des méthylurées (Monuron et

Diuron, respectivement 4-chlorophényle-1,1-diméthylurée et 3,4-dichlorophényle-1,1-diméthylurée) quand le durcisseur est la DDA9.

c) de plastifiants : Employés modérément, de l'ordre de quelques pour cent, ils permettent de réduire la viscosité sans trop diminuer les caractéristiques mécaniques.

d) d'antioxydants : On distingue les stabilisants primaires, qui empêchent les scissions de chaînes par mécanismes radicalaires, des stabilisants secondaires, qui décomposent les hydroperoxydes. Citons comme exemples de stabilisants, le noir de carbone, certaines amines, des phosphites et des phénols encombrés comme le BHT.

e) d'agents ignifuges : ils ralentissent les phénomènes de combustion. Il peut s'agir de charges minérales, qui vont agir comme des puits de chaleur, ou de composés plus spécifiques comme l'alumine tri-hydratée,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , une autre charge minérale qui présente l'avantage de libérer de l'eau par une réaction fortement endothermique.

### III.2.1.2 Réticulation

Les adhésifs epoxydes se présentent sous deux formes : les mono-composants et les bi-composants. Dans le cas des adhésifs à deux composants, le durcisseur est ajouté au moment de l'emploi, mélangé intimement à la résine, la réticulation s'effectuant à température ambiante (quelques heures). Les adhésifs mono-composants contiennent à la fois la résine epoxyde et le durcisseur. La réticulation se fait généralement à chaud en une ou deux heures au plus. La réaction entre pré-polymère epoxyde et durcisseur amine conduisant au réseau tridimensionnel est illustrée sur la figure II.8. Il existe d'autres réactions chimiques plus marginales, telles que l'homo-polymérisation, la réaction avec les groupements hydroxyles, ...

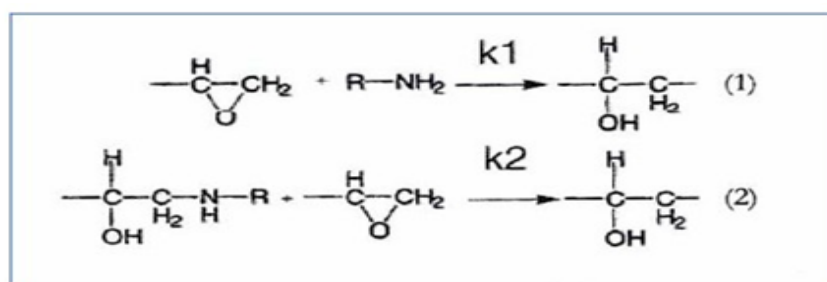


Figure II.8. Réaction de polyaddition entre bouts de chaînes amine et epoxydes [29].

### III.2.2 Les polyuréthanes

Les adhésifs à base de polyuréthane sont disponibles en systèmes mono ou bi composants. Ils sont obtenus par polyaddition entre un iso-cyanate et des polyesters ou des polyéthers branchés comprenant plusieurs groupements hydroxyles (cf. figure II.9). La réticulation est catalysée par l'humidité ambiante. Pour éviter la formation de bulles lors de la réticulation il faut maintenir l'assemblage sous pression à l'aide d'un dispositif approprié.

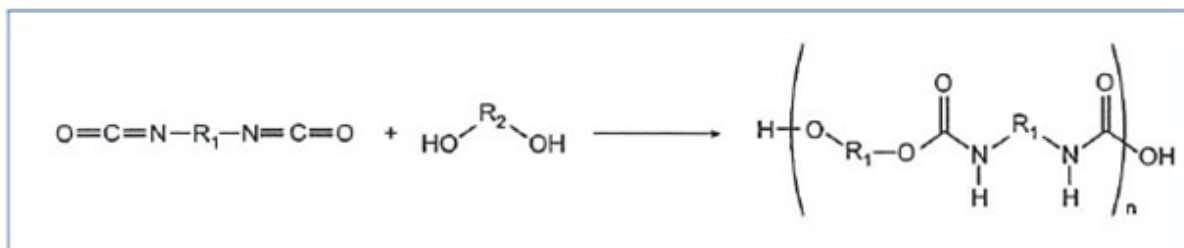


Figure II.9. Synthèse des polyuréthanes [29].

Ces adhésifs peuvent être souples ou rigides, ce qui permet par exemple l'assemblage de matériaux présentant des coefficients de dilatation très différents. Moins résistants que les époxydes, ils sont toutefois utilisés pour l'assemblage d'éléments sandwichs constitués de panneaux stratifiés (plastiques) ou de métaux (aluminium).

### III.2.2.3 Les acryliques

Ce sont des adhésifs bi-composants. Dans certains cas, la résine acrylique est appliquée sur l'un des substrats et le durcisseur sur l'autre (cf. figure II.10). Lorsque les deux supports sont pressés, le catalyseur diffuse dans la résine et initie la réticulation en quelques minutes. Les joints souples obtenus ont une très bonne résistance au cisaillement et au pelage. Les adhésifs acryliques les plus courants sont les cyanoacrylates et les méthacrylates. Ils sont obtenus par polymérisation anionique (cas des cyanoacrylates) ou par polymérisation radicalaire (cas des méthacrylates).

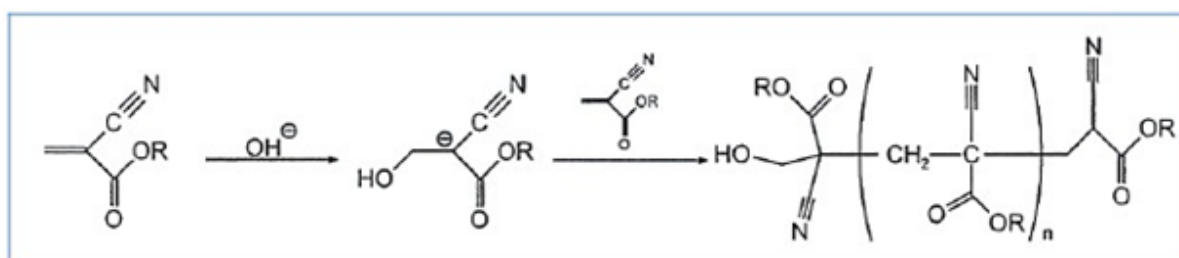


Figure II.10. Synthèse des méthacrylates [29].

### III.2.2.4 Les phénoliques

Les adhésifs phénoliques sont des produits de polycondensation du phénol et du formaldéhyde (formol). Schématiquement, la réaction consiste en une élimination d'eau entre deux cycles benzéniques et une molécule de formaldéhyde (cf. figure II.11).

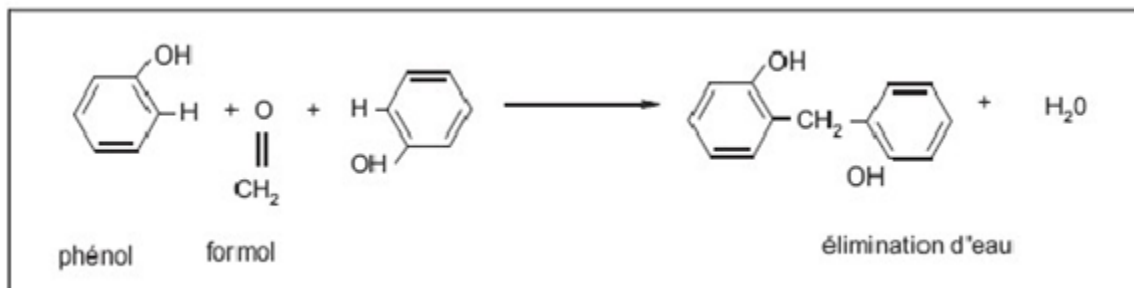


Figure II.11. Synthèse d'une résine phénolique [29].

Grâce à l'existence de trois sites réactifs sur chaque cycle, il se constitue un réseau complexe tridimensionnel réduit ci-dessous à une représentation fragmentaire et bidimensionnelle (cf. figure 12).

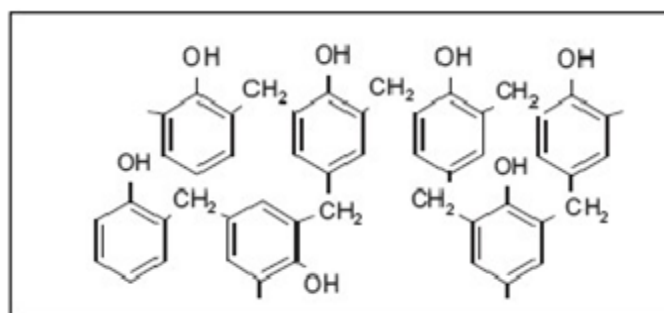


Figure II.12. Structure chimique globale d'une résine phénolique [29].

Les adhésifs phénoliques sont conditionnés sous formes de films ou de liquides. Le durcissement intervient à chaud et sous pression pour évacuer les sous-produits volatiles de condensation.

L'alliage des résines phénoliques permet leur utilisation dans le collage du métal en aéronautique. Pour ces applications, les résines sont modifiées par des élastomères ou par des thermoplastiques :

- les phénoliques nitriles permettent d'obtenir de bonnes performances mécaniques,

- les phénoliques néoprènes permettent d'obtenir une bonne résistance à basse température mais sont plus sensibles à l'humidité et aux agents chimiques,
- les phénoliques vinyliques permettent d'obtenir une excellente résistance mécanique et une bonne résistance à l'humidité.

### III.3. Défauts dans les assemblages collés

Depuis l'apparition des premiers films époxydes mono-composants, l'emploi d'adhésifs structuraux en aéronautique n'a cessé de se développer. Le collage massif d'alliages à base d'aluminium, et dans une moindre ampleur d'acier et de titane est apparu dans les années 50 avec le Fokker 27. Cette technique était principalement destinée à cette époque à l'assemblage de tôles de renfort destinées à limiter le flambage des ailes. L'A300, premier modèle d'Airbus, a incorporé dans les années 70 de nombreux assemblages collés aussi bien au niveau du fuselage que des ailes, ou des freins à air comprimé. Enfin, de nouveaux débouchés sont apparus dans les années 80 avec le développement des époxydes bi-composants basés sur une réticulation à froid du joint structural.

Le secteur aéronautique a été pionnier dans l'utilisation de composites à hautes performances (à base de fibres de carbone, kevlar et verre) assemblés assez souvent par collage. Cette méthode d'assemblage a été en effet développée en raison de son efficacité, de la solidité des assemblages mais surtout en raison de l'allègement des structures qu'elle procure par rapport aux structures métalliques. En outre, en raison de l'escalade du coût du carburant, l'utilisation de composites dans des structures d'avion ne cesse d'augmenter aussi bien dans le domaine civil que militaire. L'Airbus A300, par exemple, inclut environ 4 % de matériaux composites. Leur emploi s'élève entre 15 et 17% dans le cas des A320 et A340

Les adhésifs employés dans le cas de liaisons métal/métal peuvent être divisés en deux catégories :

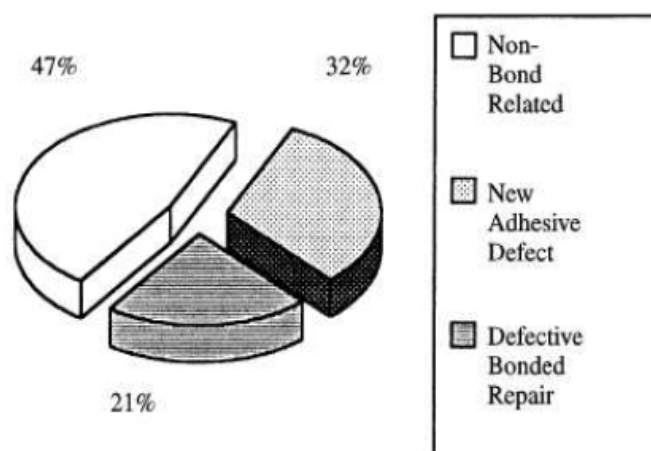
- Les adhésifs réticulés à chaud : Ils regroupent principalement des résines phénoliques ou époxydes mono-composants. La réticulation à chaud des systèmes phénoliques se produit via une réaction de condensation libérant de l'eau. Dans le cas particulier d'une liaison métal/nida métallique, seuls les adhésifs époxydes mono-composants sont employés. Ces derniers étant très fluides aux températures proches de leur température de réticulation, ils sont caractérisés par une bonne aptitude à l'écoulement au sein du nida. Les deux principaux grades identifiés pour ce type d'application sont Hexcel Redux 308, 3M AF3109-24.

- Les adhésifs réticulés à froid : De nombreux adhésifs époxydes bi composants ont été recensés, la gamme des ARALDITE commercialisée par HUNSTMAN étant la plus connue. Toutefois, les grades Hysol-Dexter EA9330.1 et 3M SW9323B/A-150 sont les plus utilisés en aéronautique. Leur réticulation se produit après mise en contact à température ambiante de la résine avec le catalyseur.

Les pièces composites collées que l'on retrouve régulièrement dans les avions actuels sont les suivantes : Panneaux sandwichs ; Surfaces de contrôle de vol (volets, ailerons, aérofreins, gouvernails) ; Fuselages et panneaux de fuselage ; Portes; trappes de train d'atterrissage; carénages divers; Panneaux acoustiques et capotage des nacelles moteurs; Inverseurs de flux

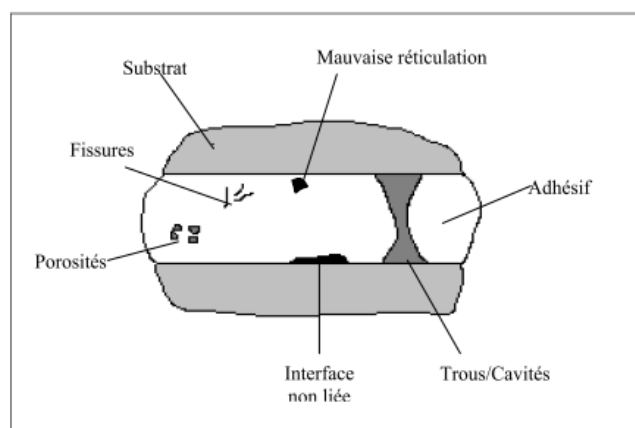
Les matrices les plus fréquemment utilisées pour le collage de composites sont les résines époxydes. Les deux principales gammes d'adhésifs les plus utilisées pour le collage des composites en aéronautique sont celles de la société Loctite Aerospace (anciennement DEXTER) et celles de la société Hexcel.

Dans le secteur aéronautique, l'assemblage par joint collé constitue une excellente alternative aux assemblages traditionnels car l'association de plusieurs avantages cités ci-dessus conduit à un résultat très satisfaisant. En général, la performance d'un joint collé dépend non seulement de la conception, qui a pour objectif d'optimiser l'ensemble de système, mais surtout du procédé de mise en œuvre qui garantit la répétitivité et la qualité du joint. Il a été montré que les défauts dans un joint, souvent inévitables, jouent un rôle primordial dans la durabilité de celui-ci [6]. Les travaux de Davis et Bond [6] montrent que si le joint collé est réalisé correctement, l'importance des défauts au sein du joint peut être inférieure à celle des joints mécaniques (Fig.II.13).



**Figure II.13. Importance des défauts dans les joints selon l'expérience de RAAF (Royal Australian Air Force) [6].**

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. En général, les défauts dans un joint collé (Porosité ; Pauvre curé; Vide; Microfissure; Décollement) [30] sont décrits dans la figure 14. A fin d'obtenir une bonne performance de réparation, il est nécessaire d'éviter ces défaut le mieux possible.



**Figure II.14. Défauts typiques dans un joint collé [29].**

La porosité est causée par le 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. De même, la formulation des adhésifs modernes permet de réduire la quantité de volatils créés au cours de la réticulation avec, par exemple, moins de 0.30% pour l'EA 9689 et 0.15% pour une autre colle à base de DGEBA, DDA et DDS. 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. Il est évident que ces types de défauts sont des zones privilégiées pour la dégradation de l'interface par l'eau ou par l'oxygène. 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. On obtient alors des zones plus faiblement réticulées au sein de l'assemblage collé.

Les défauts dans les assemblages collés où la concentration en une région donnée de porosités, peut conduire à la création de trous ou de cavités. Lorsqu'elles sont localisées au voisinage proche de l'interface, les cavités créent des interfaces non liées ou des

discontinuités géométriques. Elles peuvent donner naissance à des sites préférentiels à l'amorçage de fissure ou au décollement conduisant à la rupture de la jonction. Des essais de fatigue ont été réalisés sur des éprouvettes réparées par des patches en boron/epoxy, présentant des zones de décollement. L'effet de la localisation des zones de décollement par fatigue des éprouvettes réparées a été étudié par Baker [31]. Ces études ont montré que la durée de vie en fatigue d'une éprouvette réparée avec et sans décollement croît par rapport à celle non réparée par patch. Différentes configurations de décollement ont été analysées tel que le décollement aux extrémités de la ligne centrale du patch, celui-ci croît sur une grande largeur centrale et conduit au décollement des bords du patch [32-34]. Une méthode de réparation a été proposée par Bachir Bouiadjra et al. [33]. Il a consisté à diviser la couche adhésive en deux bandes avec des propriétés différentes. La première bande a été utilisée sur la région de fissure pour assurer le transfert de contrainte et la seconde bande a été utilisée au-delà de la région de fissure pour éviter la défaillance de l'adhésif. Les résultats ont montré que le taux de restitution d'énergie en pointe de fissure est fortement réduit par la différence de propriétés entre les deux bandes adhésives, ce qui peut impliquer l'amélioration de la résistance à la rupture de la structure fissurée.

Le développement des adhésifs dans les structures industriels ne peut se faire sans connaître les effets du vieillissement sur leurs propriétés. Plusieurs facteurs environnementaux ainsi que l'application de contraintes peuvent être à l'origine du vieillissement d'un assemblage. De nombreuses études menées sur des assemblages aluminium/ epoxy ont révélé que l'eau, la chaleur pouvaient détériorer ce joint. Doyle et al. [35] en étudiant la durabilité de joints epoxy/aluminium exposés à 7 fluides différents, à 65°C, ont observé plusieurs phénomènes à l'origine de cette dégradation, généralisables à la majorité des systèmes adhésif epoxy/métal. Ils indiquent que dans des environnements aqueux, la dégradation est le résultat d'une plastification de la résine, d'une diminution de la température de transition vitreuse (Tg) suite à la pénétration de l'eau et d'une corrosion du substrat. Les effets combinés du gonflement, de la baisse de la Tg et de la croissance de la couche d'oxyde accentuent la fissuration de l'adhésif et contribuent à une pénétration plus importante de l'eau et à terme, à la rupture du joint adhésif.

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.

L'application de contraintes mécaniques [36, 37] a été démontrée comme étant un facteur qui accélérerait les mécanismes de vieillissement de l'assemblage collé en milieu humide, chaud ou salé. Les tests de vieillissement accéléré sont souvent sujets à controverse, notamment à cause de la faible connaissance de leur validité par rapport aux tests de vieillissement naturel [38,39]. Les tests accélérés ont tendance à surestimer la réduction des propriétés d'adhésion dans l'assemblage collé, avec des conséquences négatives sur le dimensionnement des assemblages collés et sur leur performance. Ashcroft, Digby et Shaw [39] ont comparé des tests de vieillissement accéléré et naturel ; ils concluent qu'il n'y a pas de corrélation simple entre les joints vieillis dans différents environnements. Ils estiment que les tests accélérés permettent au mieux d'éliminer les adhésifs susceptibles de mal se comporter dans des conditions de forte humidité et d'indiquer ceux qui sont capables d'atteindre de bonnes performances.

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) [38]. 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. Les manifestations du vieillissement et leur caractérisation sont dépendantes de nombreux paramètres intrinsèques aux matériaux utilisés, de la mise en œuvre, des traitements de surface des substrats [40]. La cinétique de dégradation dépend aussi du milieu (acide/neutre/basique, pourcentage d'humidité, température...) [36].

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

- Une plastification du réseau (vieillissement physique théoriquement réversible) :
- Un gonflement du réseau :

Du fait de leur exposition à des températures extrêmes, les adhésifs structuraux sont susceptibles de subir une dégradation thermique (par thermolyse ou thermo-oxydation dans l'hypothèse où un contact avec l'oxygène est observé) en conditions de service. Ce type de

dégradation peut également être initié lors de l'étape de post-cuisson où l'adhésif est exposé à des fortes températures. En effet, dans le cas d'une colle époxyde mono-composant, l'établissement du réseau initial par chauffage du mélange d'une résine de type DGEBA et du durcisseur peut être critique [41]. Bien que cette phase initiale soit de courte durée, le mélange est porté à haute température induisant par la même un risque de perte d'intégrité du réseau. Les effets potentiels d'une dégradation thermique sur un joint massique sont :

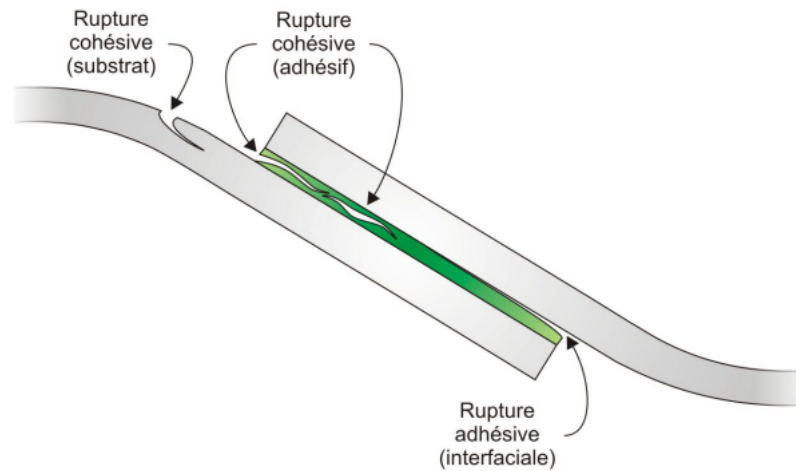
a) L'oxydation surfacique de l'adhésif : Ce phénomène, qui s'accompagne généralement d'un changement de couleur de l'adhésif, s'explique par la diffusion de l'oxygène de l'air au sein du polymère suivi par des réactions d'oxydation qui conduisent à la formation d'une couche oxydée en surface [42].

b) Scissions de chaînes et réticulation: Quatre familles de processus peuvent avoir lieu lors du vieillissement thermique sous atmosphère inerte, à savoir les coupures statistiques de chaînes, qui interviennent aléatoirement le long du réseau, la dépolymérisation, c'est à dire la reformation des unités structurales initiales, la réticulation et les réactions au niveau des groupements latéraux.

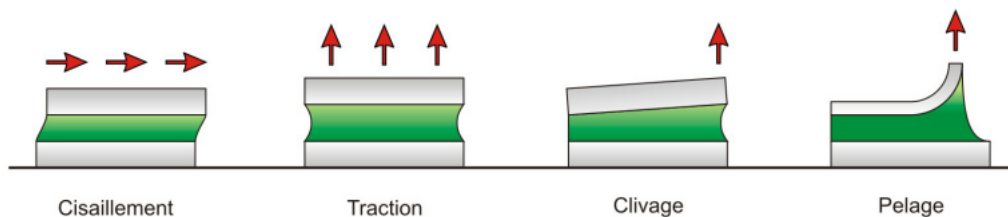
#### **IV. Caractérisation des assemblages collés**

L'évaluation des performances et de la durabilité d'un assemblage collé s'effectue :

- soit par des tests mécaniques destructifs. Il s'agit alors de mesurer un paramètre de force ou de déplacement maximal à la rupture. Le paramètre mesuré sera représentatif de l'adhérence (force ou travail qu'il faut fournir au système pour en séparer les deux constituants). La rupture peut être adhésive, c'est-à-dire si elle se produit à l'interface adhésif/substrat. Elle peut être cohésive, c'est-à-dire que, si elle survient au sein de l'adhésif (ou du substrat). La valeur mesurée de la rupture est caractéristique des propriétés intrinsèques du matériau dans laquelle a eu lieu (Fig. 15). Les principales sollicitations mécaniques sont la traction, le cisaillement, le clivage ou le pelage (Fig. II.15).
- soit par des Contrôles Non Destructifs (CND) qui, du fait de l'intérêt que leurs portent les industriels, se développent considérablement même s'ils ne sont pas encore totalement fiables. Citons, par exemple, la caractérisation d'assemblages collés par ultrasons.



**Figure II.15. Différents modes de ruptures.**



**Figure II.16. Différents modes de sollicitations mécaniques [29].**

Un des éléments importants de la réalisation d'assemblages collés est le traitement de surface du substrat. De nombreuses études ont porté sur l'influence du traitement de surface sur la tenue mécanique des assemblages collés [1]. Le but des traitements est multiple, il s'agit :

- de dégraisser la surface du substrat,
- d'éliminer les couches de contamination en surface qui sont faiblement adhérentes,
- de changer la composition chimique superficielle pour former une couche de haute réactivité chimique,
- de modifier la morphologie de la surface en augmentant la rugosité.

Il ressort de ces études que le traitement de surface est primordial pour obtenir une bonne tenue mécanique. Les traitements de surface les plus couramment utilisés sont l'ablation mécanique tel le sablage, les traitements chimiques et/ou électrochimiques, les dépôts plasma ou l'utilisation de primaire d'adhérence.

## V. Réparation des structures métalliques fissurées

Le renforcement des structures par patch composite peut s'avérer très bénéfique et plusieurs études sur le sujet ont donc été menées ces dernières années afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu [43]. En effet, certaines structures présentent des signes de vieillissement. Actuellement, de nouvelles techniques sont développées dans le but de réduire la vitesse de propagation de la fissure et prolonger la durée de vie des structures à l'exemple de celle du double patch qui améliore la réparation par simple patch.

L'un des problèmes récurrents est notamment l'apparition de fissures de fatigue qui, lorsqu'elles sont de dimensions significatives, provoquent l'endommagement de ces structures. Afin de prolonger la durée de vie de ces structures, plusieurs solutions existent:

- si la taille des fissures n'est pas trop importante, une des solutions utilisées en maintenance est l'alésage de la pointe de fissure, qui peut arrêter sa propagation;
- si le niveau de dommage est trop important, les voilures sont tout simplement remplacées, ce qui s'avère très coûteux. En effet, la fabrication d'une voilure complète représente un coût d'environ 1,5 million d'euros ;
- si des fissures apparaissent dans des zones non-critiques, elles peuvent être pontées par des matériaux composites, on parle alors de réparation ;
- si les fissures ne sont pas encore apparues, une solution actuellement est utilisée consisterait à coller un patch composite préventivement sur la zone la plus fragile, on parle alors de renforcement.

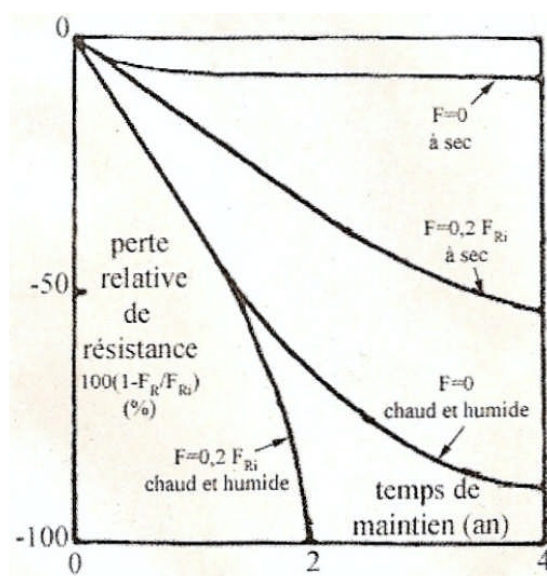
Une considération importante dans le choix des réparations est le niveau auquel la réparation peut être appliquée. Des activités de réparation des structures fissurées sont exécutées à l'un des niveaux suivants :

- Niveau de champ: Entamé directement sur la structure. De telles activités seront généralement limitées aux réparations assez mineures à la structure. Cependant, les réparations du dommage de la structure primaire doivent être entreprises très rapidement pour rendre structure opérationnel.
- Niveau de dépôt: Si le composant endommagé est trop grand ou difficile à enlever, des réparations sont mises en application directement sur la structure endommagée. C'est pour de telles raisons que la réparation par double patch est parfois impossible ce qui fait appel à des réparations par simple patch mais cette dernière est moins résistante.

## V.1. Travaux entrepris pour la technique du collage par patch en composite

### V.1.1. Durée de vie des structures collées

Juste après fabrication, la tenue mécanique de l'assemblage est généralement très satisfaisante. Le problème majeur est donc souvent la durabilité du joint. Les sollicitations mécaniques et environnementales (température, humidité, salinité de l'atmosphère, etc.) ont une influence considérable sur cette durabilité comme le montre la figure 17: la force de rupture en cisaillement d'un joint aluminium collé est parfaitement constante durant quatre années pour le joint maintenu en ambiance sèche et sans contrainte ; elle chute graduellement de 50% en quatre ans si le joint est soumis à une contrainte égale à 20% de la contrainte de rupture  $\sigma_R$ . En ambiance chaude et humide, elle chute de 50% en une année et demie et une contrainte égale à  $0.2 \sigma_R$  provoque sa rupture en deux ans.



**Figure II.17. Effet des sollicitations mécaniques et de l'environnement sur la diminution relative avec le temps de la résistance d'un joint collé selon l'essai de cisaillement [29].**

## V.2. Renforcement

Le renforcement préventif s'inscrit dans le cadre de la maintenance des structures. Dans ce cas, la fissure n'est pas encore apparue dans le substrat métallique et l'objectif est de coller un patch composite de façon préventive afin d'éliminer ou tout au moins de retarder l'amorçage de la fissure. Il est donc évident que les patches composites ne sont pas collés sur des composants neufs. Ce renforcement préventif intervient après que la structure ait connu un

certain nombre de cycles de sollicitation. Le patch composite peut être collé plus ou moins loin de la zone où la fissure doit apparaître. Dans ce cas, le flux initial de contrainte est dévié par le patch composite et la zone critique est soulagée. Une telle approche est obligatoire quand le patch composite ne peut pas être collé sur la zone fissurée. La zone étant peu accessible, il est prévu que le patch composite soit collé un peu à l'écart afin de soulager au maximum cette zone critique, et d'augmenter par conséquent la durée de vie de la structure. La technique consistant à renforcer les structures loin de la zone fortement sollicitée a récemment été étudiée dans plusieurs documents et sa viabilité a été mise en évidence [44,45].

### **V.3. Réparation**

Les patches composites sont largement utilisés pour réparer les structures métalliques endommagées par fatigue. Ces patches permettent de retarder la propagation des fissures et par conséquent d'augmenter la durée de vie des structures ainsi réparées. L'influence de plusieurs paramètres sur le comportement de la propagation de la fissure a été soigneusement étudiée dans la plupart des études. Par exemple, l'influence de la taille du patch composite [46], du nombre de plis [47], de la dissymétrie de la structure réparée [48], de la mise en tension du composant avant collage du patch composite [49], de la plasticité [29], du collage imparfait du patch composite [51] ou des contraintes résiduelles [52] a été examinée dans la littérature récente.

#### **V.3.1 . Comparaison entre un patch en composite et un patch métallique**

Les avantages des matériaux composites en graphite/epoxy et de boron/epoxy pour les patches en comparaison avec les alliages métalliques sont [53] :

- Rigidité élevée permettant l'utilisation de patch de faible épaisseur (important pour des réparations externes) et permettant d'appliquer le renfort dans les directions désirées ;
- Déformation élevée à la rupture et durabilité sous des chargements cycliques permettant de réduire le risque de décollement du patch.
- Faibles densités.
- Excellente malléabilité (formabilité) permettant une fabrication moins coûteuse des patches de formes complexes.
- Absence de traitement de surface pour les patches à base de matériaux composites.

Dans la plupart des réparations, l'utilisation de patch unidirectionnel est optimale puisque ceci fournit l'efficacité de renfort la plus élevée dans la direction de chargement, et minimise la rigidité inutile dans d'autres directions. Cependant, dans certains cas sous chargement biaxial élevé et d'un changement de l'orientation probable de la fissure, il est indispensable de fournir le renfort transversal et/ou de cisaillement. Ceci peut être réalisé en employant un stratifié avec un nombre approprié de plis de  $\pm 45^0$  et de  $90^0$ .

L'inconvénient principal d'employer graphite/epoxy et de boron/epoxy résulte de la différence des coefficients de dilatation thermique entre le composite et le métal [53,54]. Les contraintes résiduelles sont de tension dans le métal et de compression dans le composite. Ces contraintes sont particulièrement nuisibles quand les températures de traitement des adhésifs sont élevées et les températures de fonctionnement sont très basses, en général de  $-10$  à  $-50^{\circ}\text{C}$ . Par ailleurs, le chargement thermique cyclique de la région réparée engendre des contraintes provoquant la propagation de la fissure, indépendamment de la contrainte externe.

Le renforcement et la réparation des structures métalliques par patch à base de composite peuvent être considérés comme une méthode rentable et souple. Les renforts ou les patches sont idéalement mis en application in situ, évitant ainsi de recourir au démontage coûteux des structures d'avions.

Des applications potentielles peuvent être récapitulées comme suit [53]:

#### **Réduire l'intensité des contraintes**

- Dans les régions présentant des fissures de fatigue ;
- Dans les régions présentant des fissures dues aux corrosions ;
- En augmentant la tolérance à l'endommagement (fournir les caractéristiques d'une propagation lente des fissures) afin de prolonger la durée de fonctionnement de l'avion ou en cas de structure contenant plusieurs sites de dommages.

#### **Restauration de la force et de la rigidité**

- Après élimination des dommages de corrosion ;
- Après suppression des impuretés ;
- Après remise en forme des corps métalliques pour réduire les concentrations de contraintes ;
- Après le dommage causé par la chaleur.

### Renforcement des régions à conception médiocre

- Pour réduire la déformation aux zones de concentrations de contraintes ;
- Pour réduire la vibration et empêcher des dommages acoustiques.

### VI. Diverses formes de patchs composites utilisés dans les réparations

Certaines études ont été réalisées sur la forme du bord libre du patch pour limiter le pic de contrainte de cisaillement dans la colle. Ces travaux ont pour but d'évaluer l'influence de la forme des bords libres du patch composite sur la diminution de ces pics. Xiong et Raizenne [25] ont montré que des patchs présentant une épaisseur dégressive amoindrissaient les contraintes dans la colle car la singularité géométrique est alors moins marquée (figure 18). Ils ont par exemple optimisé l'angle et la longueur de la diminution d'épaisseur du patch composite. D'autres travaux ont été menés sur l'optimisation de la forme du patch composite [55]. La figure II.19 présente ainsi plusieurs formes de patchs étudiées [55]. Ces travaux ont montré que les patchs composites arrêtant au mieux la propagation des fissures sont les patchs composites en forme d'étoile.

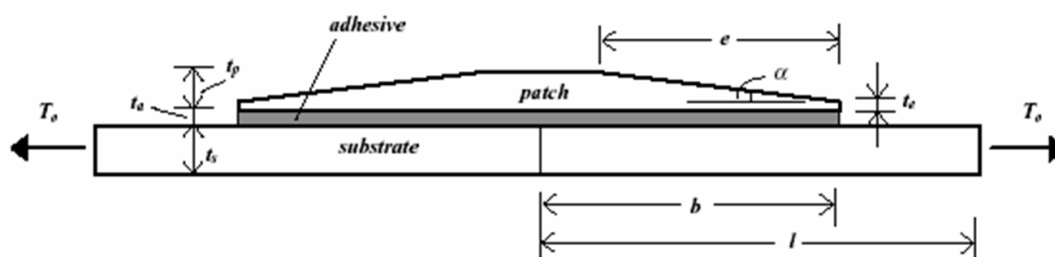
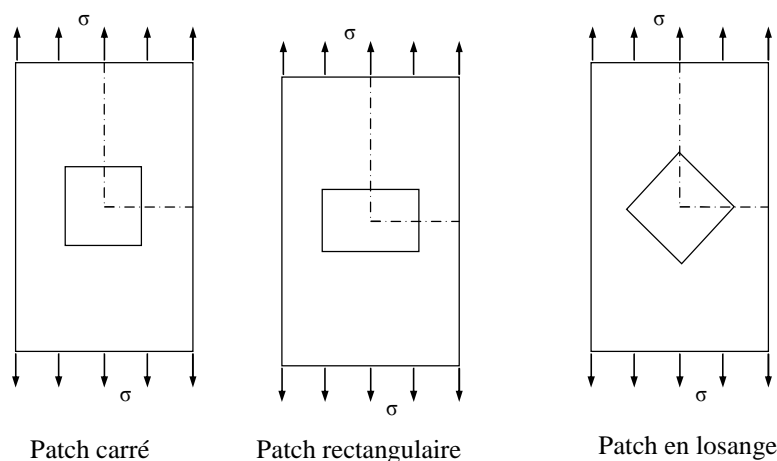
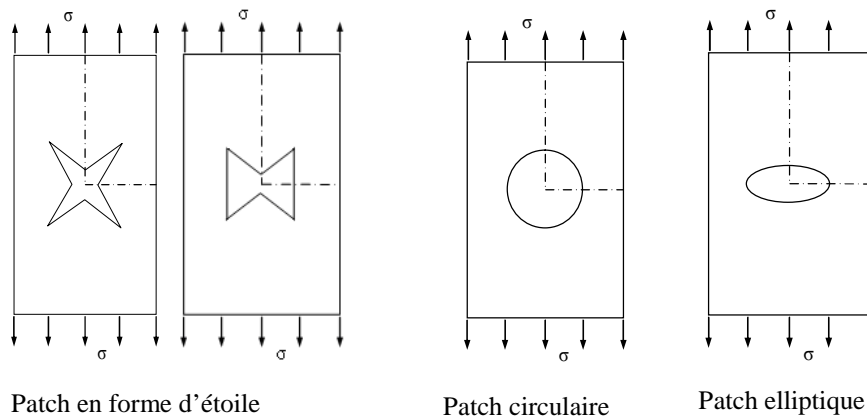


Figure II.18. Patch composite avec une épaisseur dégressive [25].



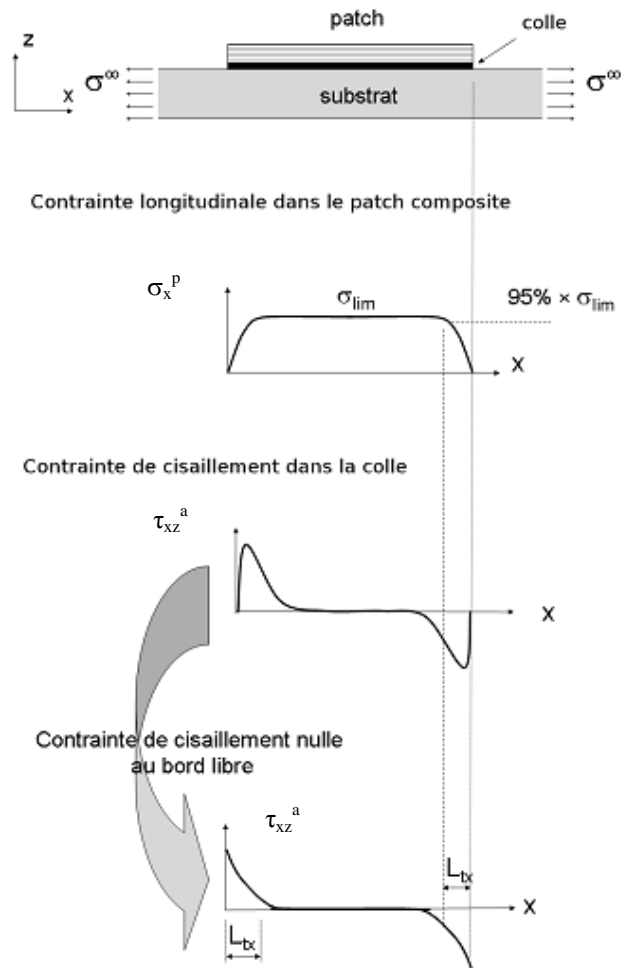


**Figure II.19. Diverses formes de patches composites d'après [55].**

### VII. Transfert de charge du renfort collé

De nombreuses études ont été consacrées à l'étude théorique des contraintes dans le patch composite et dans la colle [1-5] car cette dernière est souvent le point faible dans une réparation. En effet, elle est souvent à l'origine des défaillances du patch composite [5] car c'est sa rupture ou sa décohésion qui provoque le détachement du renfort composite. En effet, 53% des défaillances constatées dans les structures aéronautiques ainsi réparées sont dues à la colle [5]. Ces défaillances sont essentiellement dues au transfert d'effort du substrat vers le patch composite. Cette zone de transfert d'effort entraîne en effet un pic de cisaillement à proximité du bord libre du patch composite.

Le comportement des trois matériaux est supposé linéaire élastique. Il s'agit d'un modèle unidimensionnel, les contraintes des trois matériaux ne dépendant que de la direction  $x$ . La figure II.20 représente les principaux mécanismes qui entrent en jeu lors du renforcement d'une structure par matériaux composites. La contrainte longitudinale dans le patch est nulle au niveau des bords libres, puis augmente de manière exponentielle jusqu'à une valeur limite, on parle alors de transfert d'effort. La contrainte de cisaillement dans la colle est nulle au niveau du bord libre et présente un pic légèrement décalé par rapport à ce dernier. Afin de simplifier les calculs, une hypothèse souvent employée dans la littérature est de considérer que le cisaillement est maximal aux bords libres [1]. Les analyses basées sur cette hypothèse tendent toute fois à surestimer le pic de contrainte dans la colle [5].



**Figure II.20. Modèle unidimensionnel d'une structure renforcée par un patch composite [5].**

L'équation différentielle qui en résulte régit le comportement du renfort :

$$\frac{\partial^2 \sigma_x^p}{dx^2} - \eta \sigma_x^p = \chi \quad (1)$$

Avec: 
$$\eta = \frac{G_a}{e_a} \left( \frac{1}{e_p E_p} + \frac{1}{e_s E_s} \right) \quad \text{et} \quad \chi = -\frac{G_a}{e_a e_p E_s} \sigma_x^\infty \quad (2)$$

La solution de l'équation différentielle (1) peut s'écrire comme une combinaison de cosinus hyperboliques et de sinus hyperboliques, en tenant compte des conditions aux limites

$$\sigma_x^p = 0 \quad \text{pour} \quad x=0 \quad \text{et} \quad x=L_x$$

$$\sigma_x^p = \frac{\chi}{\eta} \left[ \cos(\sqrt{\eta} \cdot x) + \left( \frac{1 - \cosh(\sqrt{\eta} \cdot L_x)}{\sinh(\sqrt{\eta} \cdot L_x)} \right) \sinh(\sqrt{\eta} \cdot x) \right] - \frac{\chi}{\eta} \quad (3)$$

La contrainte dans le patch composite est donc nulle au niveau du bord libre puis augmente exponentiellement jusqu'à atteindre une valeur limite loin de ce dernier. Cette contrainte atteint 95% de sa valeur limite au bout d'une longueur  $L_{tx}$  dite longueur de transfert qui est égale à :  $L_{tx}$

$$L_{tx} \approx \frac{3}{\eta}$$

La contrainte de cisaillement  $\tau_{xz}^a$  dans la colle est obtenue à partir de la contrainte longitudinale dans le patch composite avec la relation suivante :

$$\tau_{xz}^a = e_p \frac{d\sigma_x^p}{dx} \quad (4)$$

$$\tau_{xz}^a(x) = e_p \frac{\chi}{\sqrt{\eta}} \left[ \sinh(\sqrt{\eta} \cdot x) + \left( \frac{1 - \cosh(\sqrt{\eta} \cdot L_x)}{\sinh(\sqrt{\eta} \cdot L_x)} \right) \cosh(\sqrt{\eta} \cdot x) \right] \quad (5)$$

La déformation longitudinale  $\varepsilon_x^p$  du patch est donc déduite et s'écrit comme suit :

$$\xi_x^p = \frac{\sigma_x^p}{E_p} \quad (6)$$

$$\xi_x^p = \frac{\chi}{\eta E_p} \left[ \cosh(\sqrt{\eta} \cdot x) + \left( \frac{1 - \cosh(\sqrt{\eta} \cdot L_x)}{\sinh(\sqrt{\eta} \cdot L_x)} \right) \sinh(\sqrt{\eta} \cdot x) \right] - \frac{\chi}{\eta E_p} \quad (7)$$

Où:

$e_p$ ,  $e_a$  et  $e_s$ : représentent respectivement les épaisseurs du patch composite, de la colle et du substrat ou la plaque réparée;

$E_p$  et  $E_s$  : représentent respectivement les modules de Young du patch composite et du substrat;

$G_a$  : représente le module de cisaillement de la colle;

$L_x$  : représente la longueur de la zone renforcée;

$\sigma_x^p$  : représente la contrainte longitudinale dans le patch composite ;

$\tau_{xz}^a$  : représente le cisaillement dans la colle ;

$\sigma_x^\infty$  : représente la contrainte longitudinale imposée au substrat;

$\varepsilon_x^p$  : est déformation longitudinale dans le patch ;

$u_x^p$  : est le déplacement longitudinal du patch.

La déformation maximale du patch est atteinte au milieu de la zone renforcée. Elle est donc donnée par  $\varepsilon_x^p$  ( $x = L_x/2$ ). Lorsque la longueur de transfert est très inférieure à la longueur du patch, la déformation atteint un seuil maximal donné par :

$$\xi_x^p(x) \left( x = \frac{L_x}{2} \right) = -\frac{\chi}{\eta E_p} \quad (8)$$

Cette déformation maximale ne dépend donc ni du module de cisaillement de la colle, ni de son épaisseur puisque les termes  $G_a/e_a$  des constantes  $\chi$  et  $\eta$  de la relation (2) se simplifient.

Le déplacement longitudinal du patch est alors obtenu par intégration de la déformation.

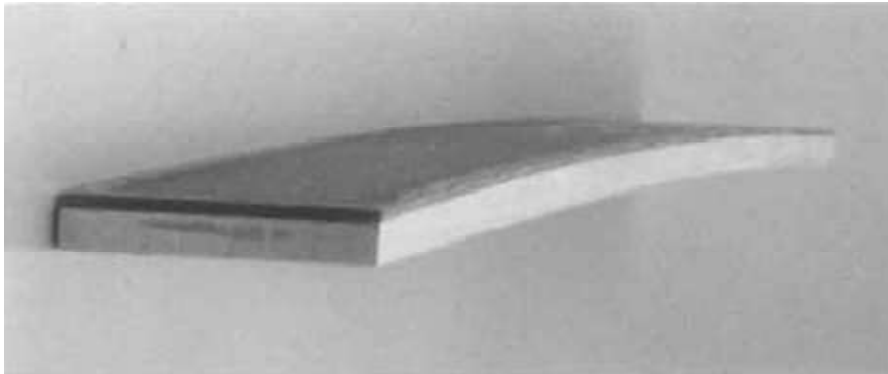
$$u_x^p(x) = \frac{\chi}{E_p \sqrt{\eta^3}} \left[ \sinh(\sqrt{\eta} \cdot x) + \left( \frac{1 - \cosh(\sqrt{\eta} \cdot L_x)}{\sinh(\sqrt{\eta} \cdot L_x)} \right) \cosh(\sqrt{\eta} \cdot x) \right] - \frac{\chi}{\eta E_p} x \quad (9)$$

Un modèle basé sur les mêmes hypothèses que celui développé précédemment, a été développé par Mathias et al. [10, 44,45], pour une géométrie plane rectangulaire. Il met en évidence des effets bidimensionnels. Une solution analytique pour les distributions de contraintes dans les trois éléments, substrat, colle et patch composite, est proposée pour deux cas de chargements plans appliqués au substrat : en contraintes longitudinales ou en cisaillements.

### VII.1. Effet des contraintes résiduelles

La figure 21 représente une structure d'aluminium 2024 renforcée par patch en boron/époxy soumise à des niveaux élevés des contraintes résiduelles après refroidissement, ces contraintes sont induites thermiquement durant l'élaboration de la pièce à une température de 121°C pour polymériser l'adhésif FM73. La naissance de ces contraintes internes est due à la différence entre les coefficients de dilatation thermique du substrat et du patch. Les conséquences de ces contraintes sont présentées par la figure II.21. Souvent ces contraintes peuvent apparaissent soit après le refroidissement de la pièce élaborée à une température élevée soit une réparation élaborée à température ambiante mais fonctionnent à des températures significativement différentes de celle à laquelle la polymérisation de l'adhésif a été obtenue. Le niveau de ces contraintes augmente avec l'augmentation de la différence entre les coefficients de dilatation thermique du substrat et du patch. L'utilisation d'un patch unidirectionnel en graphite/époxy peut entraîner un niveau très élevé des contraintes résiduelles lorsqu'il est collé à l'aluminium [56].

Ces contraintes résiduelles favorisent la propagation des fissures dans la structure réparée et éventuellement sa résistance en fatigue. Ainsi il est important qu'elles soient examinées lors de la conception des pièces réparées.



**Figure II.21. Photo d'un patch en Boron/Epoxy d'épaisseur de 0.6 mm [56].**

Il existe plusieurs façons de réduire le niveau de contraintes résiduelles dans une réparation. Un patch qui a un coefficient de dilatation plus proche que l'aluminium est choisi. La température de polymérisation des adhésifs est réduite de manière à maintenir les niveaux de contraintes résiduelles aussi bas que possible en choisissant des colles qui travaillent à de faibles températures. Si l'étendue de la structure à chauffer est réduite au minimum, ceci agira pour maintenir les contraintes résiduelles basses, par exemple si on chauffe une zone en aluminium d'une aile d'avion pour la réparer, cette zone n'est pas en mesure de s'étendre d'une façon suffisante, car la température de la structure entourant la zone chauffée sera plus faible et agira donc en frein à l'expansion de la zone réparée.

Enfin, il est possible d'appliquer une charge initiale à la structure pour compenser la dilatation thermique prévue. Ceci a été fait avec succès [31] sur une aile d'avion avant la réparation, en plaçant la partie de l'aile en compression. Normalement, le substrat métallique est en tension à la suite du traitement de l'adhésif. En libérant la charge initiale compressive après la réparation, l'étendue des contraintes résiduelles de traction a été sensiblement réduite.

### **VII.2. Influence du traitement thermique à 120°C**

Le collage du patch composite sur l'aluminium se fait par polymérisation à chaud, ce qui engendre un léger traitement thermique de l'éprouvette en aluminium. Il est nécessaire de vérifier l'influence éventuelle de ce traitement thermique sur les propriétés de fatigue de l'aluminium avant d'évaluer la réparation par patchs composites.

Des essais de fatigue ont été réalisés par M.L.PASTOR [34] afin de montrer l'effet du traitement thermique sur la tenue en fatigue des éprouvettes.

Des essais ont été conduits sur des éprouvettes non préalablement endommagées (éprouvettes vierges) et également sur des éprouvettes pré-endommagées par fatigue pour une durée de vie donnée.

Ces essais devaient permettre d'apprécier l'influence du traitement thermique sur la tenue en fatigue. Les essais de fatigue ont été réalisés à 195 MPa (la limite d'élasticité de l'alliage d'aluminium vaut 345 MPa). Le tableau II.1 présente les résultats de ces essais.

Eprouvettes	Durée de vie moyenne (nombre de cycles)
vierges	496 200
vierges affectées thermiquement	452 100
endommagées affectées thermiquement	422 100

**Tableau II.1. Influence du traitement thermique sur la tenue en fatigue des éprouvettes en aluminium [34].**

Il apparaît que ce traitement thermique n'affecte pas de façon notable la tenue en fatigue des éprouvettes vierges ainsi que des éprouvettes pré-endommagées. Les éprouvettes non réparées et non renforcées et celles réparées et renforcées par patches composites ont des caractéristiques métallurgiques n'influençant pas leur tenue en fatigue.

### VIII. Conclusion

La région qui est à l'origine de l'adhésion est en général beaucoup plus mince que les deux objets qui adhèrent. Le phénomène de séparation des deux objets apparaît comme une rupture et étudié avec les outils correspondants, qui constituent un domaine à part entière : la mécanique de la rupture. En particulier, le critère de décollement de deux objets ne met pas en jeu simplement la contrainte appliquée, mais aussi l'énergie dissipée lors de la propagation du décollement.

L'efficacité de l'adhésion se mesure en général davantage par l'énergie dissipée lors de la séparation que par le mode exact de rupture (adhésive ou cohésive). Il est fréquent, néanmoins, que le maximum d'énergie dissipée se situe dans le régime cohésif (pour lequel des mécanismes de dissipation se développent au sein du matériau), à proximité immédiate du régime adhésif. Généralement dans le régime adhésif, la dissipation à l'interface est comparativement plus faible. Les déformations au sein du matériau sont modérées et ne déclenchent pas de mécanismes dissipatifs efficaces.

Une rupture entre deux matériaux assemblés de manière indirecte peut se propager de deux manières : soit à l'intérieur du joint dans l'adhésif (il s'agit alors d'une rupture cohésive), soit à

la surface (rupture adhésive). En ce qui concerne l'adhésion directe, la rupture est nécessairement adhésive.

Une rupture cohésive indique que l'interface s'est comportée de manière plus forte que le cœur de la couche adhésive ou de la colle ; inversement, pour une rupture adhésive, c'est l'interface qui a été moins résistante.

# **Références**

# **Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

---

- [1] Adams, R., and Wake, W. Structural adhesive joints in engineering. Elsevier, 1984.
- [2] Hart-Smith, L. Adhesive-bonded single-lap joints. Tech. Rep. CR-112236, NASA, 1973.
- [3] Hart-Smith, L. A peel-type durability test coupon to assess interfaces in bonded, co-bonded, and co-cured composite structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 19 (1999), 181–191.
- [4] Oplinger, D. Effects of adherent deflection in single lap joints. *International Journal of Solids and Structures* 31, 18 (1994), 2565–2587.
- [5] Tsai, M. Y., Oplinger, D. W., and Morton, J. Improved theoretical solutions for adhesive lap joints. *International Journal of Solids and Structures* 35, 12 (1998), 1163–1185.
- [6] Davis, M., and Bond, D. Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 19 (1999), 91–105.
- [7] O. Volkersen. Die niekraft in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15:41-47, 1938.
- [8] NA. de Bruyne. The strength of glued joints. *Aircraft Engineering*, pages 115-118, 1944.
- [9] Goland and Reissner. The stress in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics*, vol 11 :A17–A27, 1944.
- [10] RD. Adams and NA. Papiatt. Effect of poisson's ratio strains in adherends on stresses of an idealized lap joint. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 8(2):134-139, 1973.
- [11] JD. Mathias, M. Grédiac, and X. Balandraud. On the bidirectional stress distribution in rectangular bonded composite patches. *International Journal of Solids and Structures*, 43:6921-6947, 2006.
- [12] DW. Oplinger. Effects of adherent deection in single lap joints. *International Journal of Solids and Structures*, 31(18):2565-2587, 1994.
- [13] DA. Bigwood and AD. Crocombe. Non-linear adhesive bonded joint design analyses. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 10:31-41, 1990.
- [14] RD. Adams and V. Mallick. A method for the stress analysis of lap joints. *The Journal of Adhesion*, 38:199-217, 1992.
- [15] MY. Tsai and J. Morton. The effect of a spew llet on adhesive stress distribution in laminated composite single-lap joints. *Composite Structures*, 32:123-131, 1995.

## Références Bibliographiques

---

- [16] Lucas F.M. da Silva and R.D. Adams. Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27:227-235, 2007.
- [17] Bartolomeusz, R. A., Baker, A. A., Chester, R. J., and Searl, A. Bonded joints with through-thickness adhesive stresses - reinforcing the f/a-18 y470.5 bulkhead. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 19 (1999),173–180.
- [18] D. Peretz and Y. Weitsman. The nonlinear viscoelastic characterization of FM 73 adhesive. *Journal of rheology*, 26(3):245-261, 1982.
- [19] WK. Chiu and R. Jones. Unified constitutive model for thermoset adhesive, FM73. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 15(3):131-136, 1995.
- [20] D. Peretz and Y. Weitsman. The nonlinear thermo viscoelastic characterization of FM 73 adhesive. *Journal of rheology*, 27(2):97-114, 1983.
- [21] AD. Crocombe. Modelling and predicting the effects of test speed on the strength of joints made with FM 73 adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 15:21-27, 1995.
- [22] XX. Yu, AD. Crocombe, and G. Richardson. Material modelling for rate-dependent adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21:179-210, 2001.
- [23] P.R. Underhill and D.L. DuQuesnay. The dependence of the fatigue life of adhesive joints on surface preparation. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 26 :62–66, 2006.
- [24] R.H. Kaye and M., Heller. Through-thickness shape optimization of bonded repairs and lap-joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 22 :7–21, 2002.
- [25] J. Wang, A.N. Rider, M. Heller, and R. Kaye. Theoretical and experimental research into optimal edge taper of bonded repair patches subject to fatigue loadings. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 25 :410–426, 2006.
- [26] Xiong, Y., and Raizenne, D. Stress and failure analysis of bonded composite-to-metal joints. AGARD specialist meeting on bolted/bonded joints in polymeric composites, AGARD conference proceedings 590, Florence, Italy, September, 1996, pp. 1-11.
- [27] MAC BAIN J.W., HOPKINS D.G. On adhesives and adhesive action *Journal of Physical Chemistry* , 1925, 29, 2, pp 188-204],

## Références Bibliographiques

---

- [28] MONTERNOT H., BENALET D., ANCENAY H. Guide du collage du CETIM Paris: Lavoisier, 1978 - 232p].
- [29] M.A. Bruneaux, «Durabilité des assemblages collés : modélisation mécanique et physico chimique», Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- [30] Marie pierre foulc, Jose alcorta. Durabilite des assemblages par colles : etat de l'art. note scientifique & technique de synthese. direction des applications militaires,cea le ripault ,departement materiaux , 2009 .
- [31] Joannès S. Caractérisation mécanique et outil d'aide au dimensionnement des collages structuraux. Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de paris 2007.
- [32] Baker A.A. Bonded composite repair of metallic aircraft components-an Overview of Australian Activities. Proceeding of the AGARD, Specialist meeting on composite repair of military aircraft structures. SEVILLE, 1994 Spain.
- [33] B. Bachir Bouiadjra, H. Fekirini, M. Belhouari, B. Boutabout, B. Serier. Fracture energy for repaired cracks with bonded composite patch having two adhesive bands in aircraft structures Computational Materials Science, Volume 40, Issue 1, July 2007, pp 20-26.
- [34] MARIE-LAETITIA PASTOR. Contribution à l'étude en fatigue de structures en aluminium renforcées par patchs composites Université BLAISE PASCAL - CLERMONT II. 2007.
- [35] G. Doyle, R.A. Pethrick. Environmental effects on the ageing of epoxy adhesive joint. Int. J. Adh. Adh. 29(2009) 77-90.
- [36] J. Bertho, Vieillissement hygrothermique d'un assemblage acier galvanisé /adhésif epoxy : évolution de la tenue mécanique en fonction de l'état physico-chimique de l'adhésif. . Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2011.
- [37] A.J. Kinloch. Durability of structural adhesives. Introduction. Ed. A.J. Kinloch. Applied Science Publishers, London and New York (1983) 18-35.
- [38] WR Broughton and RD Mera. NPL Report CMMT(A)61. Review of durability test methods and standards for assessing long term performance of adhesive joints. 1997

## Références Bibliographiques

---

- [39] RD Adams. Adhesive Bonding. Science , technology and applications.: Environmental (durability) effects (J. Comyn). Adams R.D (Ed.). GBR : Woodhead Publishing (2005) 123-142.
- [40] A. A. Roche, J. Bouchet, and S. Bentadjine, International Journal of Adhesion and Adhesives 22, 431-441(2002).
- [41] B. Hilaire ,“Etude du vieillissement thermique d’une résine polyimide thermostable, l’IP 960”, Thèse de Doctorat de l’E.N.S.A.M., Paris, 1991.
- [42] N. Piccirelli, “Propriétés mécaniques et physico-chimiques d’un adhésif structural thermostable : fluage et oxydation”, Thèse de Doctorat de l’E.N.S.M.P., Paris, 1997.
- [43] MARIE-LAETITIA PASTOR. Contribution à l’étude en fatigue de structures en aluminium renforcées par patchs composites Université BLAISE PASCAL - CLERMONT II. 2007.
- [44] Jean-Denis MATHIAS. Etude du comportement mécanique de patchs composites utilisés pour le renforcement de structures métalliques aéronautiques Université BLAISE PASCAL - Clermont II 2005.
- [45] J.D.Mathias,X. Balandraud, and M. Grédiac. Experimental investigation of composite patches with a full-field measurement method. Composites Part A, vol 37 :177–190, 2006.
- [46] K.H. Chung and W.H. Yang. A study of the fatigue crack growth behaviour of thick aluminium panels repaired with a composite patch. Composite Structures, vol 60:1–7, 2003.
- [47] H. Hosseini Toudeshky, G. Sadeghi, and H.R. Daghyani. Experimental fatigue crack growth and crack-front shape analysis of asymmetric repaired aluminium panels with glass-epoxy composite patches. Composite Structures, vol 71:401–406, 2005.
- [48] D.C. Seo, J.J. Lee, and H.R. Daghyani. Fatigue crack growth behaviour of cracked aluminium plate repaired with composite patch. Composite Structures, vol 57:323–330, 2003.
- [49] H. Bléhaut, D. Gognau, P. Flahaut, L. Khouchaf, S. Hariri. Characterisation of the effects of grinding on residual stresses, Proc. 6 th European Conference on Residual Stresses, A. M. Dias, J. Pina, A. C. Batista, E. Diogo, eds., Trans Tech Publications, 2002.

## Références Bibliographiques

---

- [50] P. Colombi. Plasticity induced fatigue crack growth retardation model for steel elements reinforced by composite patch. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol 43:63–76, 2005.
- [51] S. Naboulsi and S. Mall. Fatigue growth of adhesively repaired panel using perfectly and imperfectly composite patches, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol 28 :13–28, 1997.
- [52] V. Sabelkin, S. Mall, M.A. Hansen, R.M. Vanderwaker, and M. Derriso. Investigation into cracked aluminium plate repaired with bonded composite patch. *Composite Structures*, vol 79:55–66, 2007.
- [53] Grabovac, I., R. A. Bartholomeusz, and A. A. Baker. Composite Reinforcement of a Ship Superstructure-Project Overview. *Composites*, 24: 501-509, (Number 6, 1993).
- [54] Schubbe, J J. Thickness Effects on Cracked Aluminum Plate With Composite Patch Repair. Air Force Institute of Technology (AU), Wright-Patterson AFB OH, May 1997 (AFIT/DS/ENY/97-4).
- [55] Kumar, A., and Hakeem, S. Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet. *Composite Structures* 49 (2000), 285–292.
- [56] Baker A.A., L.R.F. Rose and .R. Jones, A. *Advances in the bonded composite repair of metallic aircraft structures*, Published by Elsevier 2002.

## **Chapitre III**

# **Analyse élastique de la réparation des pipelines fissurés**

## I. Introduction

Aujourd'hui, la plupart des compagnies pipelinières utilisent des matériaux composites dans le cadre de leurs programmes de réhabilitation. Cependant, l'un des défis auxquels est confrontée l'industrie est de déterminer quand les matériaux composites peuvent être utilisés et quels systèmes sont les mieux placés pour réparer un mécanisme d'endommagement donné.

Bon nombre de travaux ont été menés pour évaluer l'utilisation des matériaux composites dans les applications offshore [1-2], principalement destinés aux canalisations verticales, élévateurs et tubes enroulables. En parallèle, pendant plus d'une décennie, les composites ont également été examinés et adoptés pour réparer des pipelines endommagés.

Durant les 15 dernières années, le cerceau de fibre de verre renforcé dans les matériaux composites est apparu comme une méthode acceptable pour la réparation réussie de pipelines onshore corrodés et mécaniquement endommagés lorsque la charge principale est la pression interne [3]. La faisabilité de l'extension de ces réparations de tuyaux en mer tels que les canalisations verticales, nécessite une connaissance approfondie des profils complexes combinés de charge, superposition de tension importante, flexion interne et pression extérieure.

Le Gas Research Institute (GRI, aujourd'hui connu sous le nom de Gas Technology Institute) a préparé un rapport final, "Development of Fibreglass Systems for Natural Gas Pipeline Service", pour le service de gazoduc, " pour évaluer le système de réparation. Ce document a nécessité une période de temps allant de janvier 1987 à mars 1994. Au milieu des années 1990, l'industrie a commencé à utiliser le système de layup humide. Ce système a subi des tests extensifs, y compris les essais à grande échelle pour étudier son utilisation dans la réparation des dommages mécaniques. En 1997, le système «Armure système Plate Pipe rap est lancé [4]».

Ce système utilise un matériau de fibres de verre qui est un domaine imprégné de systèmes epoxy uniques pour résister à des conditions environnementales spécifiques, y compris les applications sous-marines, des températures élevées, et la température froide. Une fois que l'édition de l'Office of Pipeline Safety (OPS) est sortie, l'utilisation de matériaux composites dans la réparation des pipelines a augmenté de manière significative. Par conséquent, le nombre de fabricants intéressés par cette technologie de réparation a également augmenté. En 2000, a commencé un programme d'essais pour évaluer les capacités de Perma-Wrap, qui est un système similaire à l'horloge de printemps en ce qu'il utilise une coquille dure avec un adhésif installé entre les couches [4].

À l'heure actuelle, on utilise le B31.4 de l'ASME pour les systèmes de transports de liquides pour les hydrocarbures, gaz de pétrole liquéfié, de l'ammoniac anhydre, et des alcools et l'ASME B31.8, pour le transport de gaz et la tuyauterie de distribution [5]. Ces codes ont été approuvés pour leur utilisation à nouveau pour réparer des pipelines corrodés dans le but de rétablir la pression d'exploitation partiellement ou totalement. De plus, les dommages

mécaniques (par exemple, les bosselures avec des gouges) ont été réparés in situ en utilisant des matériaux composites et validés expérimentalement en utilisant à la fois le pipeline éclaté dans des essais de fatigue cyclique de pression. Alexandre et Francini [6] présentent l'historique des réparations de pipelines on shore en utilisant des matériaux composites. Même si la performance à long terme des composites incorporant la dégradation physique et chimique est d'une grande importance dans les applications de pipeline. Cependant, les données reflétant les conditions environnementales pertinentes demeurent clairsemées.

Toutanji et Dempsey [2] ont travaillé sur l'établissement de composites renforcés de fibres en polymères comme un moyen efficace pour la réparation et la réhabilitation des pipelines. Ils ont développé un modèle théorique avec des expressions de contraintes et des courbes de contrainte circonférentielle. Cette étude a porté sur l'application de fibres de renfort en polymère sur les pipelines en acier.

Dans la conception d'un système de réparation composite pour tuyaux offshore, les charges de fatigue, l'impact et le potentiel de corrosion galvanique forment la base pour des examens supplémentaires. Des facteurs tels que le mouvement d'onde et le contact avec d'autres structures, telles que les navires et autres canalisations verticales sont des sources réalistes pour des dommages d'impact. La corrosion galvanique résultant du couplage électrochimique de fibres de carbone avec des alliages d'acier est un autre mécanisme où le «design» d'interfaces, de la technologie de traitement, et les conditions environnementales sont soigneusement caractérisés. L'effet des charges de pression cycliques sur la performance d'un système de réparation composite est très important dans l'adaptation de sa rigidité et sa résistance, en particulier pour les fibres de renfort radiales et hors axe. De nombreuses études ont été réalisées pour l'initiation de l'endommagement et la propagation durant la fatigue du composite.

Il n'y a pas d'accord général sur la validation des résultats de l'essai d'un système de réparation avant de l'utiliser sur un pipeline. Il est recommandé de considérer la méthode de fourniture et l'installation de chaque système. Chaque fournisseur doit être en mesure de fournir des rapports d'essais suffisants pour démontrer la performance de leur système de réparation dans une situation similaire. Un bilan de l'utilisation des réparations semblables est souhaitable. Ces notes indiquent les domaines critiques qui devraient être abordés dans le cas des réparations de composites.

L'objet de cette étude est la présentation d'un modèle complet en éléments finis et l'analyse du comportement d'une fissure réparée par patch en composite dans les pipelines soumis à plusieurs chargements, tel que : le moment de flexion, la pression interne et la traction.

En outre, on augmente la performance à long terme des systèmes de réparation dans les matériaux composites. Enfin, une tentative sera faite pour fournir à l'industrie un aperçu de l'état actuel de l'art dans la technologie de réparation et de restauration de l'intégrité des pipelines avec des matériaux composites.

## II. Modèles géométriques d'éléments finis

Cette étude présente une analyse tridimensionnelle par éléments finis en utilisant le code de calcul Abaqus [8] pour les fissures complètes semi-circulaires dans les pipelines réparés avec patch en Carbone/epoxy. Le pipeline est soumis à un moment de flexion donnant une contrainte appliquée de  $\sigma = 100$  MPa, figure III.1. La figure III.2 présente le modèle géométrique du pipeline fissuré.

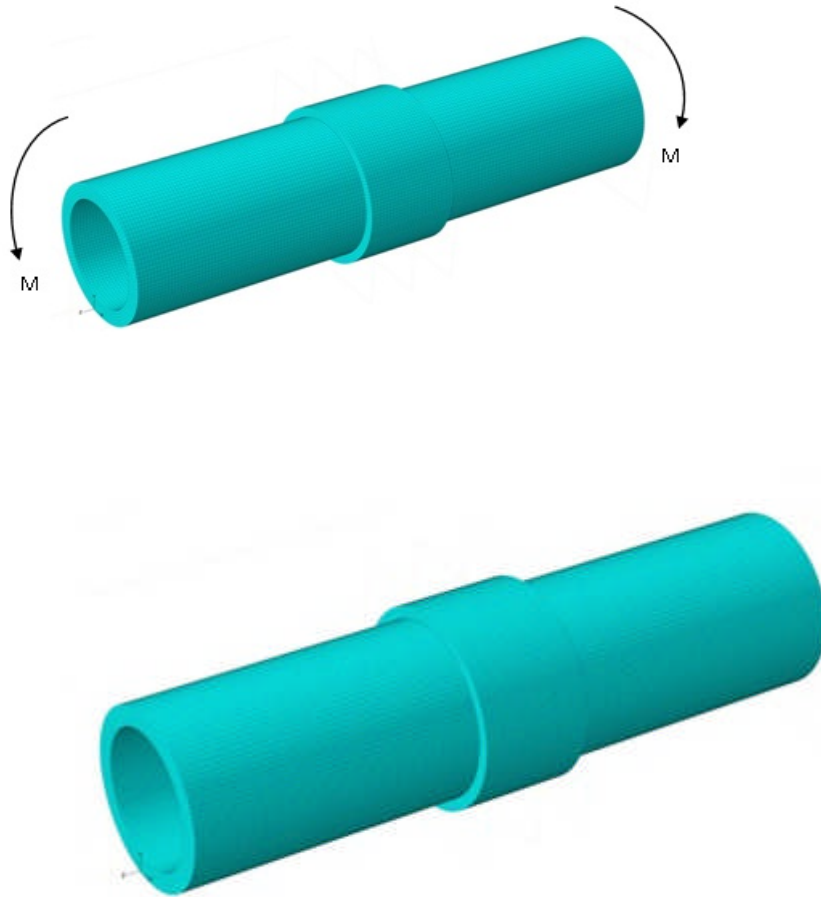
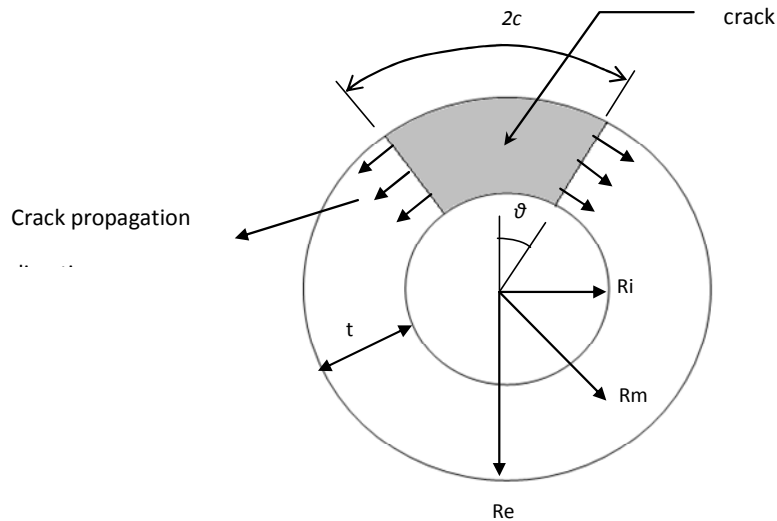


Figure III.1. Pipeline réparé soumis à un moment de flexion.



**Figure III-2. Modèle géométrique du pipeline en présence de la fissure.**

Les caractéristiques géométriques du pipeline fissuré sont:

- Diamètre extérieur  $D_0 = 620$  mm
- Diamètre intérieur  $D_i = 480$  mm
- Diamètre moyen  $D_m = 550$  mm

La taille de la fissure est représentée à un angle  $\theta$ . Le pipeline est en acier inoxydable SA 312 type 304. Le patch de réparation est lié au pipeline avec l'adhésif FM73. Le tableau III.1 regroupe les propriétés élastiques du pipeline, du patch et de l'adhésif.

**Tableau III-1. Propriétés des matériaux.**

	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_3$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$G_{12}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$G_{13}$ (GPa)
<b>Patch</b> (Boron /epoxy)	150	25	25	0,21	0,21	0,21	7,2	5,5	5,5
Adhesive (FM73)	2,55			0,32					
<b>Pipeline</b> (Acier inoxydable <b>SA312 Type 304</b> )	204			0,3					

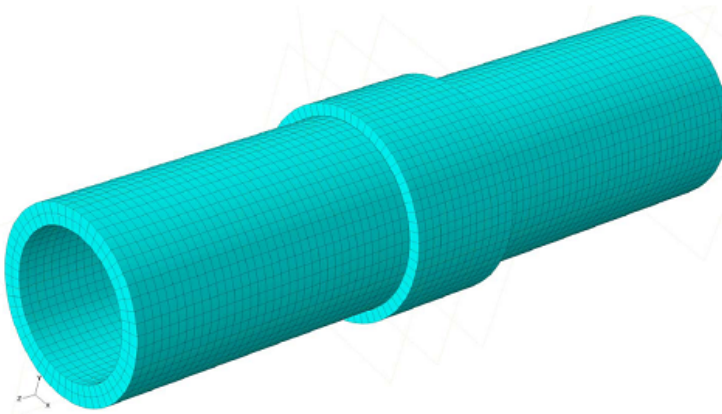
L'étude est basée sur l'application de la méthode des éléments finis tridimensionnelle afin d'analyser le pipeline réparé en utilisant le code ABAQUS. Le modèle des éléments finis se

compose de trois parties à savoir, le pipeline fissuré, l'adhésif et le patch en composite de réparation.

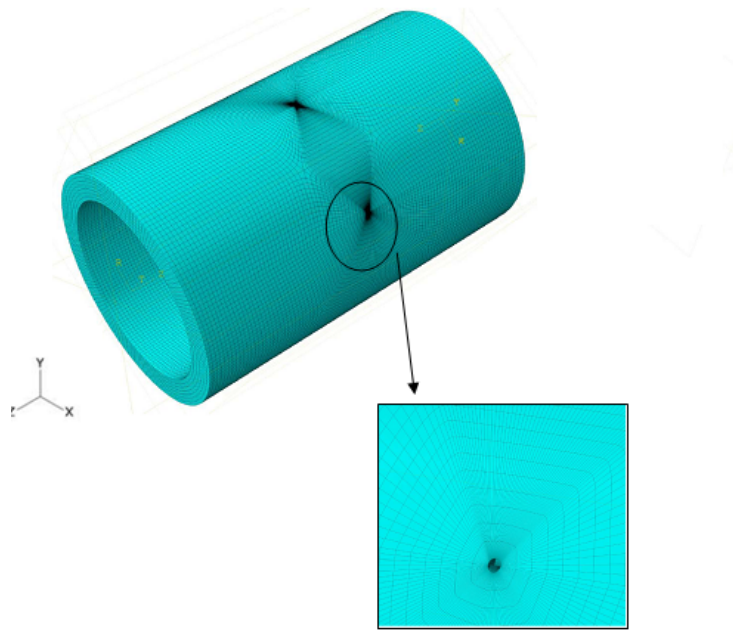
Le modèle est composé par des éléments-briques à vingt nœuds, ayant 62289 nœuds pour le pipeline réparé, qui induit un nombre total de 103797 degrés de liberté (06 degrés de liberté par nœud). Un nombre de 17195 dans le pipeline, 9406 dans la couche adhésive, et 7998 dans le patch. La plaque est subdivisée en quatre couches d'éléments finis dans la direction de l'épaisseur, l'adhésif a une seule couche d'éléments à travers l'épaisseur et le patch a deux couches d'éléments finis à travers l'épaisseur.

Pour générer le front de fissure, certains éléments-briques sont remplacés par des «blocs» de fissures. Ces dernières sont maillées par des éléments-briques qui sont projetés dans le plan du pipeline à défaut géométrique. Les conditions aux limites et les charges sont transférées vers les éléments de fissure. Le maillage a été raffiné à proximité de la zone de la pointe de fissure avec une taille de l'élément de 0,053 mm. Nous avons utilisé au minimum quinze éléments finis à l'avant et à l'arrière du front de fissure.

La figure III.3, montre le maillage global de l'échantillon et la figure III.4, présente le raffinement de maillage dans la région de la pointe de fissure. Le facteur d'intensité de contrainte (FIC) en tête de fissure a été déterminé en utilisant la technique de fermeture de fissure virtuelle (VCCT). Le critère de VCCT utilise les principes de la mécanique élastique linéaire de la rupture (LEFM) et, par conséquent, il est approprié pour les problèmes dans lesquels la propagation de fissures fragiles se produit le long des surfaces prédéfinies.



**Figure III-3. Modèle de maillage typique de la structure globale.**



**Figure III-4. Modèle du maillage en front de fissure.**

La VCCT est basée sur l'hypothèse que lorsqu'une fissure se propage d'une certaine longueur, l'énergie de déformation développée est la même que celle nécessaire pour fermer une fissure de même longueur. Dans cette technique, les facteurs d'intensité de contraintes sont obtenus pour les trois modes d'ouvertures à partir de l'équation de la rupture:

$$G_i = \frac{K_i^2}{E} \quad \dots \text{III-(1)}$$

Où  $G_i$  est le taux de restitution d'énergie pour le mode  $i$ ,  $K_i$  est le facteur d'intensité de contrainte pour le mode  $i$ , et  $E$  le module d'élasticité. Lorsque le facteur intensité de contraintes augmente, l'énergie en pointe de fissure augmente aussi et par conséquent la croissance de la fissure devient plus importante ce qui conduit à une réduction de la durée de vie résiduelle de la structure. La durée de vie résiduelle du pipeline est définie à partir de l'initiation de la fissure à la longueur de fissure critique qui exige la substitution du pipeline endommagé.

### III. Résultats et discussions

#### III.1. Pour un chargement en flexion

##### III.1.1 Comparaison entre fissure réparée et fissure non réparée

Les FIC calculés ont été effectués pour les fissures réparées et non réparées dans le pipeline sous moment de flexion afin d'estimer les performances de réparation. La figure 5, présente la répartition du facteur d'intensité de contrainte le long du front de fissure pour les fissures réparées et non réparées. L'angle de la fissure  $\theta$  est pris égal à  $(30^\circ)$ . On peut voir que, pour la fissure non réparée, la différence entre les valeurs du facteur d'intensité de contrainte aux bouts externe et interne de la fissure n'est pas assez sensible. Cette différence est d'environ 5%. La présence de patch composite lié, réduit considérablement le facteur d'intensité de contrainte à l'avant de la fissure en particulier en bout de fissure externe. La réduction du FIC en pointe de fissure interne est presque négligeable.

Ce comportement est dû au fait que la pointe de fissure externe est directement en contact avec la couche adhésive et avec le patch en composite. Le transfert de contrainte du pipeline fissuré au patch composite à travers la couche adhésive est maximal en pointe de fissure externe, ce qui explique la réduction importante du FIC à ce bout. Quantitativement, le FIC est réduit en pointe de fissure externe à partir de  $17 \text{ MPa (m)}^{1/2}$  -  $7,8 \text{ MPa (m)}^{1/2}$ , la réduction relative est d'environ 54%. Le taux de réduction du FIC diminue proportionnellement à la distance le long du front de fissure.

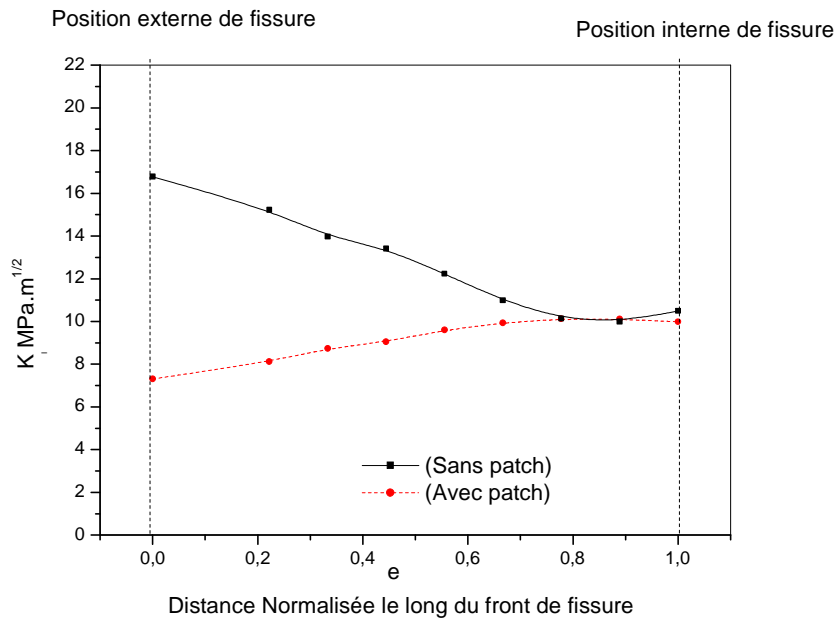
La plus grande différence de FIC entre les pointes de fissures interne et externe présente un inconvénient majeur pour la réparation des pipelines et rend la prévision de la trajectoire de propagation des fissures très difficile. Dans l'application aéronautique, ce problème est résolu par la technique du patch en double face composite. Cette technique permet l'équilibre de transfert de contraintes entre les faces des plaques réparées.

L'application de cette technique pour les pipelines (canalisations) endommagées est pratiquement impossible. On peut confirmer que la réparation de fissures externes dans la canalisation est plus efficace que les fissures internes. En outre, la détection de fissures externes est plus simple. Ces observations peuvent être généralisées aux tuyaux corrodés. En effet, la réparation des tuyaux corrodés avec patch en composite lié est plus efficace pour la corrosion externe sous contraintes. Le patch en composite atténue l'intensité des contraintes dans la zone corrodée de la conduite ; ce qui réduit le risque d'initiation et de propagation de fissure. Selon les observations précédentes, on peut conclure que les performances de réparation sont meilleures pour les tuyaux à parois minces.

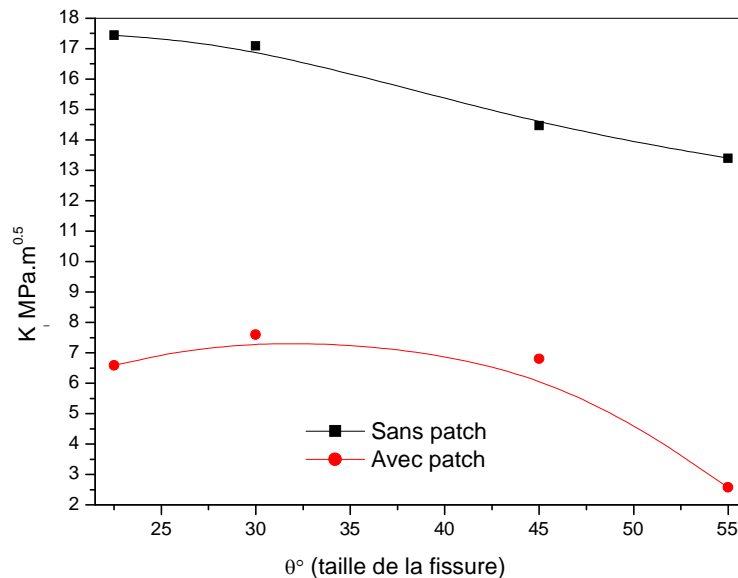
##### III.1.2. Effet de la taille de la fissure

Il est connu que la résistance des composites réparés par collage dans les structures endommagées dépend essentiellement de la nature des défauts et de leurs tailles. L'application de cette technique ne sera pas efficace si la taille du défaut à réparer dépasse une valeur

critique. Dans cette section, l'effet de la taille de la fissure représentée par l'angle  $\theta$  de fissure sur la variation du FIC est analysé. La figure III.6, présente la variation du FIC en pointe de fissure externe selon l'angle de propagation pour des fissures réparées et non réparées. La réduction du FIC par le patch est très importante pour cette pointe de fissure. Ceci confirme les résultats de la figure III.5.

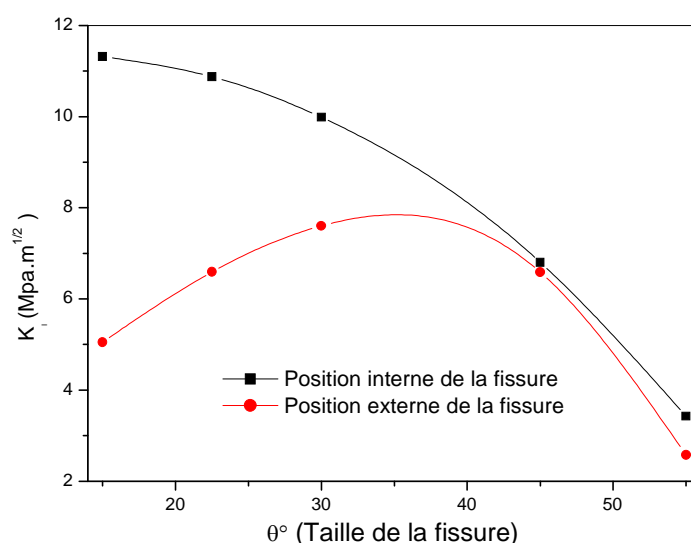


**Figure III-5. Répartition du FIC le long du front de fissure pour les fissures réparées et non réparées.**



**Figure III-6. FIC par rapport à l'angle  $\theta$  de fissuration en pointe de fissure externe.**

Cette réduction est plus importante lorsque l'angle de la fissure augmente. Le taux de réduction du FIC est d'environ 45% lorsque l'angle  $\theta$  de la fissure est inférieur à  $25^\circ$  et environ 75% lorsque l'angle  $\theta$  de la fissure dépasse la valeur de  $45^\circ$ . Selon les résultats de la figure III.7, la variation du FIC pour la fissure réparée selon l'angle  $\theta$  de la fissure est approximativement linéaire à faible pente. Ce comportement diffère de celui de la plaque réparée en traction où le FIC présente un comportement asymptotique et que la longueur de fissure augmente [12-15]. La différence est due au fait que pour la plaque réparée soumise à une charge de traction, il y'a un mode I pur de la propagation des fissures, et le FIC en front de fissure est très important ; ce qui permet un transfert élevé de contrainte de la plaque fissurée au patch en composite.



**Figure III-7. FIC par rapport à l'angle  $\theta$  de fissuration en pointe de fissures réparées interne et externe.**

L'extraction de la solution analytique exacte est très difficile en raison du nombre important de paramètres qui affectent le comportement des fissures réparées. Afin d'aider les concepteurs de la réparation de la conduite, nous avons essayé d'extraire de la solution en éléments finis des résultats, une des formulations semi-analytiques du facteur d'intensité pour les fissures réparées dans un tuyau soumis à un moment de flexion.

$$K_I = \sigma F \left( \left( \frac{R_o}{t} \right), \psi(\theta/\pi), \chi \right) \sqrt{\pi(\theta.R_o)} \quad \dots\dots \text{III-(2)}$$

Où:

$$\psi(\theta/\pi) = \frac{1}{4}(\theta/\pi)^2 - \frac{1}{3}(\theta/\pi) + \frac{1}{100}$$

et

$$\chi = \left( \frac{E_{r1}}{G_{r12}} \right) \left( \frac{E_a}{E_p} \right) \left( \frac{e_r}{e_a} \right) \nu_p$$

$E_{r1}$  : Le module longitudinal de Young du patch en composite ;

$G_{r2}$  : Le module longitudinal de cisaillement du patch en composite ;

$E_a$  et  $E_p$  : sont respectivement le module de Young de l'adhésive et du pipeline ;

$e_r$  et  $e_p$  : sont respectivement les épaisseurs du composite et du pipeline ;

La comparaison entre cette expression semi-analytique et les calculs en éléments finis a montré la différence maximale de 7.2132 %.

Plusieurs calculs ont été effectués pour déterminer les FIC de mode II et de mode III. Tous ces calculs ont montré que les valeurs de KII et KIII sont faibles comparées aux valeurs de KI. C'est pourquoi notre étude a été limitée au facteur d'intensité de contrainte en mode I.

La figure III.7 présente une comparaison de la variation du FIC entre les bouts de fissure interne et externe pour le pipeline réparé. On montre que la différence de FIC entre les deux bouts de première classe est significative pour un faible angle de première classe. La différence relative est environ 30%, pour  $\theta = 15^\circ$  ; cette différence devient nulle quand l'angle  $\theta$  de fissure est plus élevé que  $40^\circ$ .

Ce comportement est dû au fait que pour un angle supérieur de fissure, le transfert de contrainte en direction du patch en composite est très important, ce qui permet une distribution quasi-uniforme des contraintes le long de l'épaisseur du pipeline fissuré.

Le facteur d'intensité de contrainte en pointe de fissure externe augmente avec la longueur de fissure, atteint un maximum pour  $\theta = 40^\circ$  et diminue au-delà de cet angle de fissure.

Ce comportement peut être expliqué par le fait que pour de faibles longueurs de fissure, le transfert de contrainte entre le composite et le pipeline fissurée n'est pas très important. Le facteur d'intensité de contrainte suit une trajectoire ascendante. Lorsque l'angle de la fissure atteint la valeur de  $40^\circ$ , le transfert de contrainte vers le patch en composite sera plus important et le facteur d'intensité de contrainte en pointe de fissure réparée diminue avec l'augmentation de la longueur de fissure.

### III.1.3. Effet des propriétés mécaniques de l'adhésif

Il est connu que les adhésifs les plus forts sont caractérisés par une rigidité faible (faible module de Young). Ils permettent d'atténuer les contraintes transmises à l'adhésif. Dans le cas de fissures réparées, l'objectif est de transmettre le maximum des contraintes à l'adhésif et par conséquent au patch afin de les réduire en pointe de fissure.

En théorie, il est préférable d'utiliser des adhésifs à module de cisaillement élevé pour la réparation de fissures ou de défauts. La figure III.8, présente la variation de l'intensité de contrainte le long du front de fissure pour différents modules de cisaillement de l'adhésif. Les résultats présentés sur cette figure confirment ce qui a été avancé précédemment. En effet, le facteur d'intensité de contrainte diminue à mesure que le module de Young des adhésifs augmente, mais la diminution du FIC selon  $E_a$ , tend à devenir nulle quand  $E_a$  augmente indéfiniment comme le montre la figure III.9. En fait, une augmentation du module de cisaillement de l'adhésif réduit la force d'adhérence, ce qui peut générer la rupture de l'adhérence.

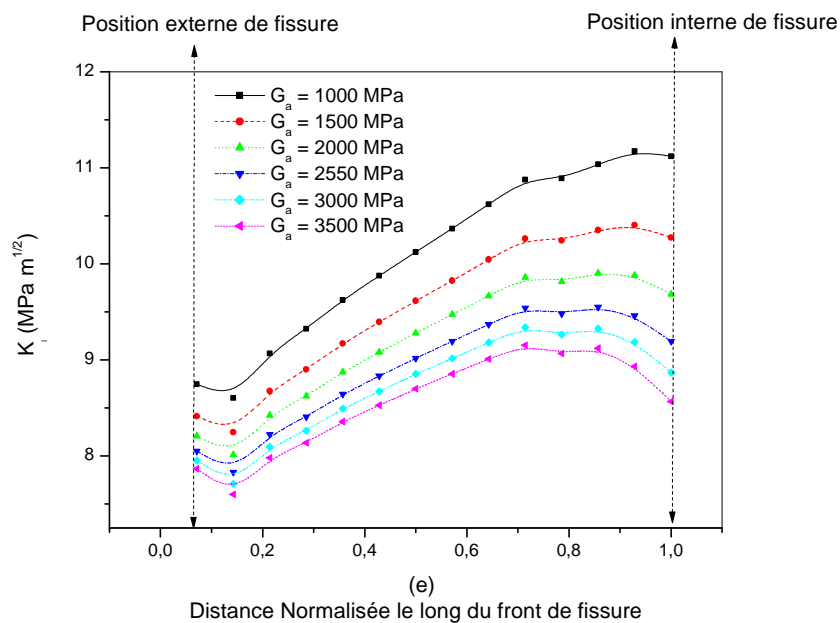
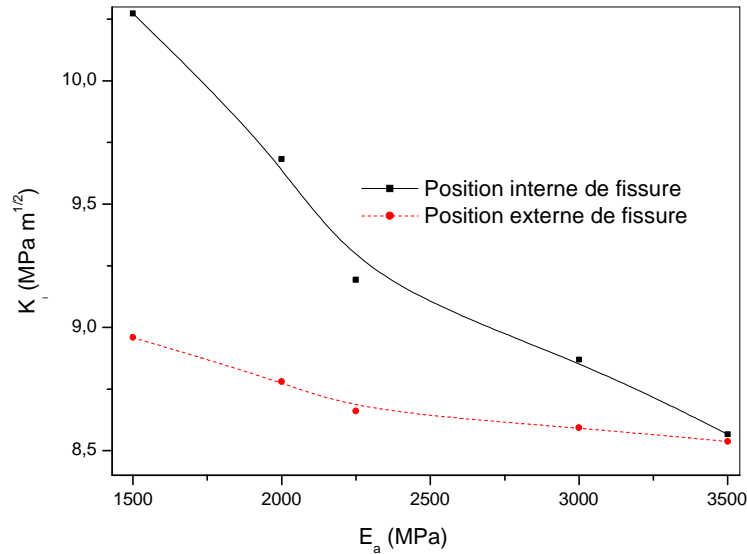


Figure III-8. Distribution du FIC le long du front de fissure pour différents modules de cisaillement de l'adhésif.



**Figure III-9. FIC par rapport au module de Young de l'adhésif.**

Les contraintes de l'adhésif sont liées au module de Young de l'adhésif par l'expression suivante:

$$\tau = \frac{E_a(U_1 - U_2)}{2(1 + \nu)e_a} \quad \text{III- (3)}$$

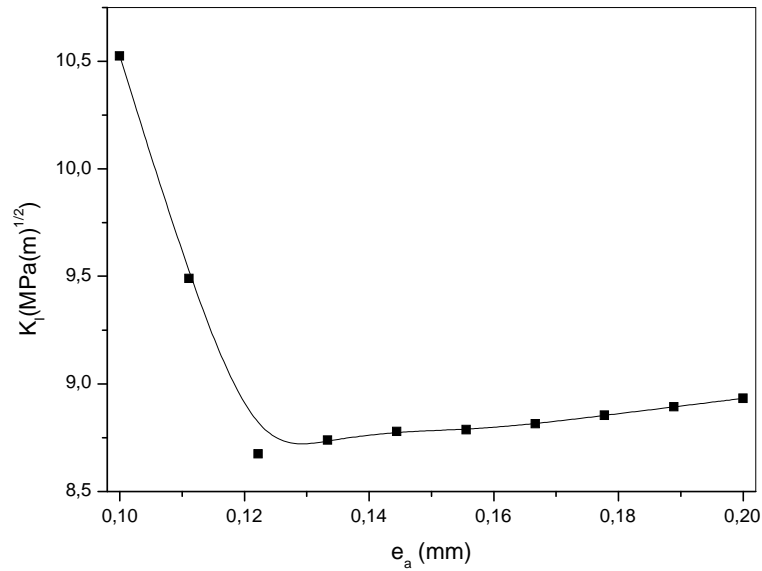
Où  $U_1$  et  $U_2$  sont les déplacements dans les surfaces adhésives,  $\nu$  est le coefficient de Poisson et  $E_a$  est l'épaisseur de l'adhésif. Quand le module de Young de l'adhésif augmente, le transfert de contrainte augmente entre le pipeline réparé et les patches en composites, ce qui réduit la contrainte autour du front de fissure. Le facteur d'intensité de contrainte en front de fissure diminue.

L'augmentation du module de Young peut améliorer la durée de vie résiduelle des pipelines réparés. Le choix de l'adhésif (caractérisé par son module de cisaillement) pour la réparation de fissures dans les pipelines en flexion doit être optimisé afin de permettre la transmission des contraintes vers le patch et pour éviter la rupture de l'adhésion en raison de l'augmentation des contraintes dans la couche adhésive.

#### III.1.4. Effet de l'épaisseur de l'adhésif

Les adhésifs utilisés dans les réparations collées sont souvent nécessaires pour avoir un niveau élevé de contraintes. L'effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la répartition de la contrainte sur la couche d'adhésive est très important. Cet effet aura une incidence significative sur les performances de réparation. La figure III.10, montre la variation des facteurs d'intensité de contrainte en fonction de l'épaisseur de l'adhésif en pointe de fissure externe. On peut voir que l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif entraîne la diminution du facteur d'intensité de contrainte, lorsque l'épaisseur de l'adhésif varie entre 0,1 et 0,14 mm.

Cela signifie qu'une épaisseur inférieure de l'adhésif est souhaitable pour la réparation de fissure. Bachir Bouiadjra et al. [7] a mis en évidence cet effet pour les structures d'aéronefs réparés. Lorsque l'épaisseur de l'adhésif est supérieure à la valeur de 0,14 mm, son effet sur les variations de FIC devient insignifiant. De plus, il est recommandé par les concepteurs de la réparation par patch en composite que l'épaisseur de l'adhésif soit entre 0,1 et 0,2mm afin d'éviter l'augmentation des contraintes de pelage. Cette norme élimine l'effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation thermique du FIC.



**Figure III-10. FIC par rapport à l'épaisseur de l'adhésif en pointe de la fissure externe.**

### III.1.5 Effet de l'épaisseur du patch

La figure III.11, illustre cet effet en présentant la variation du FIC le long du front de fissure pour diverses épaisseurs de patch. On peut voir que l'augmentation de l'épaisseur du patch réduit de manière significative le facteur d'intensité de contrainte en tête de fissure. Par exemple, la réduction relative du FIC est d'environ 30% lorsque l'épaisseur du patch varie entre 2 et 7mm. Ces résultats nous permettent de confirmer que le choix de patches plus épais permet d'augmenter significativement leurs performances. Pour une meilleure distribution des contraintes, il est préférable d'utiliser de multiples couches en composites collés pour réparer les fissures.

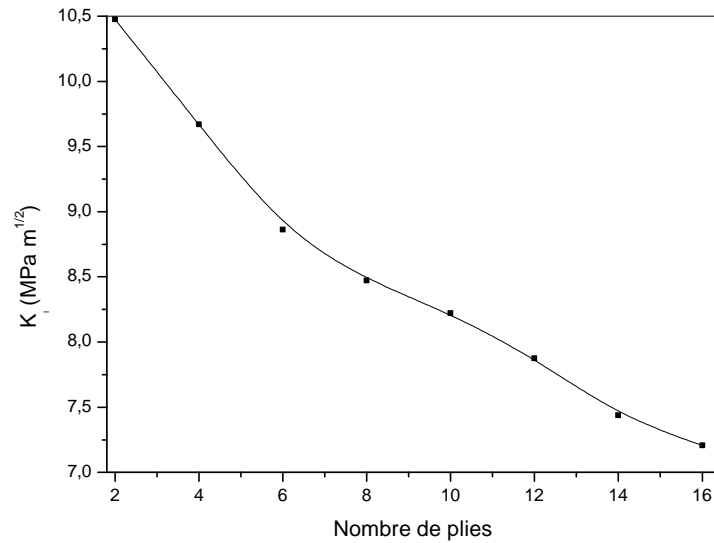


Figure III-11. FIC par rapport à l'épaisseur du patch en pointe de fissure externe.

### III.2. Réparation des pipelines par patch en composite sous l'effet de la pression interne, la traction

Les figures III.12.a et III.12.b montrent le pipeline réparé sous la pression interne et la traction respectivement.

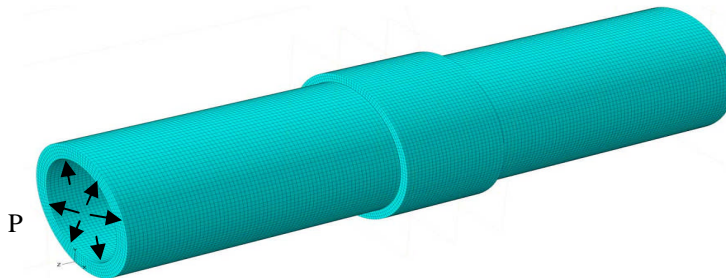


Figure III-12-a. Effet de la pression interne.

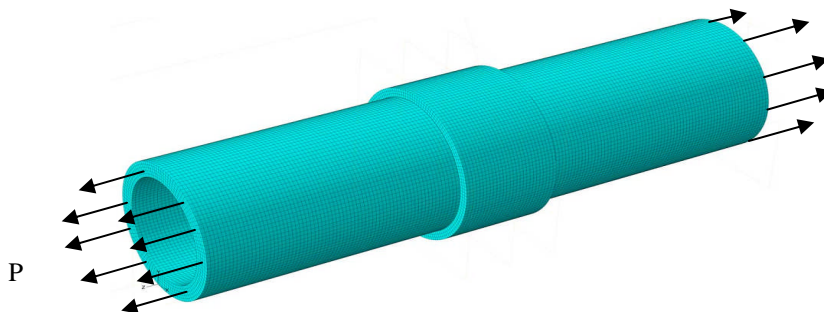


Figure III-12-b. Effet de la traction.

Figure III-12. Pipeline réparé sous l'effet de : a)- la pression, c)- la traction

### III.2.1 La réparation des pipelines sous l'effet de la pression interne

On a abordé dans cette partie, la performance de la réparation par patch en composite des pipelines fissurés réparé et non réparé sous l'effet de la pression interne et la variation de la longueur de la fissure ainsi que les paramètres géométriques et physiques sur le système, par l'étude des facteurs d'intensité de contraintes en front de fissure.

#### III.2.1.1. Comparaison entre des pipelines fissurés réparé et non réparé

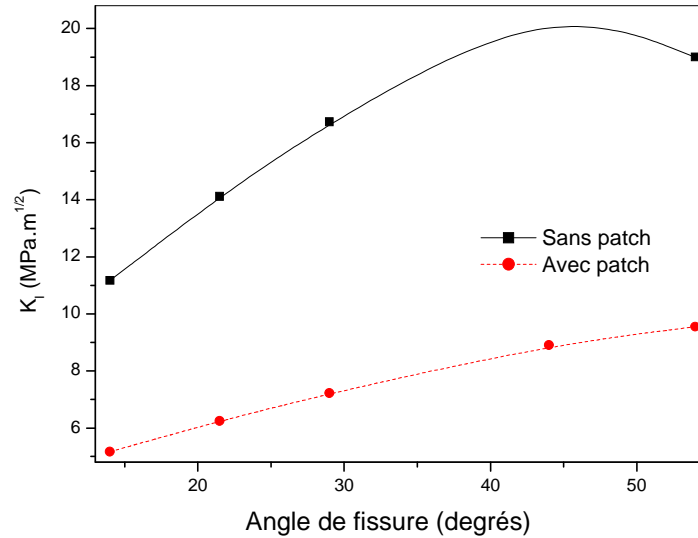
La distribution du facteur d'intensité des contraintes au front d'une fissure externe de deux structures, l'une réparée et l'autre non réparée, est illustrée sur la figure III-13. Dans cette position de la fissure, la réparation par patch en matériau composite offre un FIC très bas. La réduction du FIC pour une fissure en position interne n'est pas significative et la réparation est de qualité comparable que celle montrée sur la figure III-6. C'est le contact entre la face externe de la fissure avec la couche adhésive et le patch qui est à l'origine de ce comportement. La contrainte de la fissure dans le pipeline est transférée vers le patch en matériau composite de façon maximale au front de la fissure externe. La valeur du FIC dans cette position est réduite de  $15.11 \text{ MPa(m)}^{1/2}$  à  $7.24 \text{ MPa(m)}^{1/2}$  pour un angle de fissure de  $22^\circ$ , représentant un taux relatif de réduction de 52%. La réduction de ce taux est proportionnelle à la taille de la fissure. La différence sensible de FIC entre les positions interne et externe du front de fissure est un gros désavantage dans le cas des réparations des pipelines. Ce désavantage n'apparaît plus lorsqu'on utilise le double patch composite dans l'aviation. Ceci conduit à une intensité équivalente de transfert des contraintes pour les deux faces de la plaque réparée [28-33]; mais l'application de cette technique du double patch ne peut pas se faire dans la réparation des pipelines. Ainsi, l'utilisation du patch en composite dans la réparation en position externe des structures endommagées est satisfaisante. L'intensité des contraintes dans les zones endommagées est réduite dans le cas de l'emploi de patch en composite et par conséquent, l'amorçage et la propagation de fissures sont réduits.

La variation du FIC en front de fissure externe réparée est illustrée sur la figure III.13 ; elle est quasiment linéaire. Elle peut être exprimée par la relation suivante :

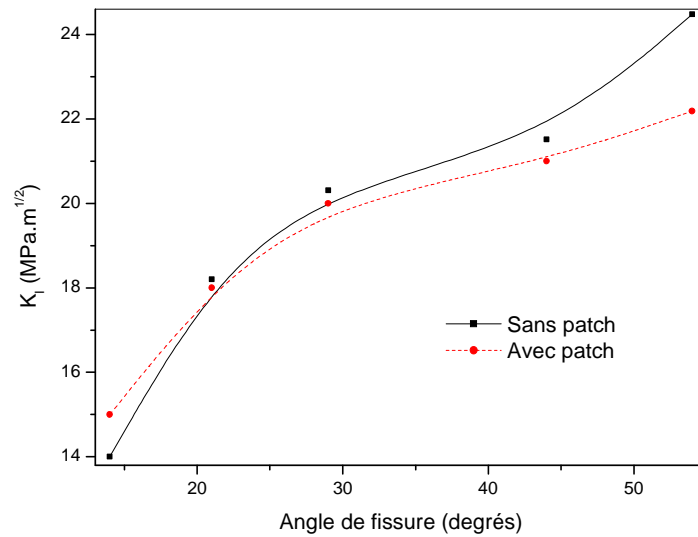
$$K = A.x + B$$

Avec  $x$  est la longueur de la fissure,  $A$  et  $B$  sont des coefficients qui dépendent des propriétés mécaniques et géométriques du pipeline, du patch composite et de l'adhésif ainsi que de la pression appliquée.

On prévoit dans le futur des études plus avancées sur la performance des paramètres afin d'établir des équations analytiques du FIC pour la réparation des fissures.



**Figure III-13. FIC en fonction de l'angle de fissure en position externe réparée et non réparée.**



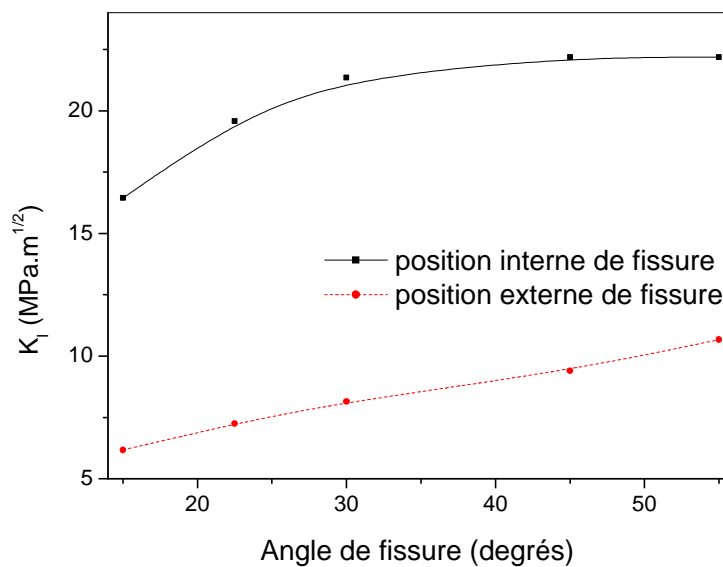
**Figure III-14. FIC en fonction de l'angle pour des fissures en position interne réparée et non réparée**

### III.2.1.2 Effet de la dimension de la fissure

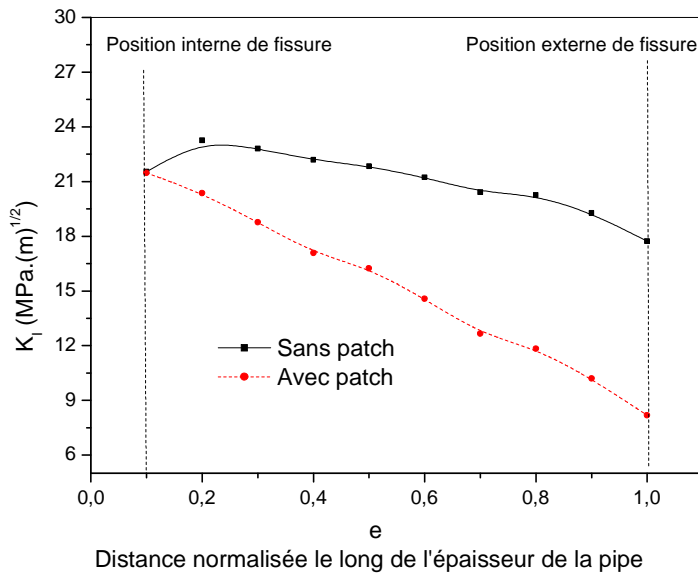
La nature et de la dimension des défauts sont les paramètres qui déterminent la durabilité des réparations par patch en composite des structures endommagées. Dans le cas où la taille du défaut à réparer dépasse une valeur critique, l'utilisation de cette technique ne présente plus d'intérêt. Dans cette partie, l'effet de l'angle de fissure  $\theta$ , représentant la dimension de la fissure pour détermination la variation du FIC.

La variation du FIC au front de fissure en position interne en fonction de l'angle de fissure  $\theta$  pour des fissures réparées et non réparées est illustrée sur la figure III-15. La réduction du FIC est faible ; cependant, partant des proches alentours de  $40^\circ$ , le comportement devient asymptotique avec l'augmentation de la taille de la fissure. Cela est dû au transfert de contrainte de la zone fissurée du pipeline en allant vers le patch en matériau composite en augmentant proportionnellement avec la longueur de la fissure. En outre, ce transfert de contrainte peut aller jusqu'à la fissure interne.

La figure III-15 présente l'évolution du FIC entre des fissures en positions interne et externe de pipelines réparés par patch en composite. L'écart entre les facteurs d'intensité de contraintes des fissures réparées en positions interne et externe est significatif quelle que soit la valeur de l'angle de fissure  $\theta$ . L'écart relatif est d'environ 57%.



**Figure III-15. FIC en fonction de l'angle de fissure réparée en positions interne et externe.**



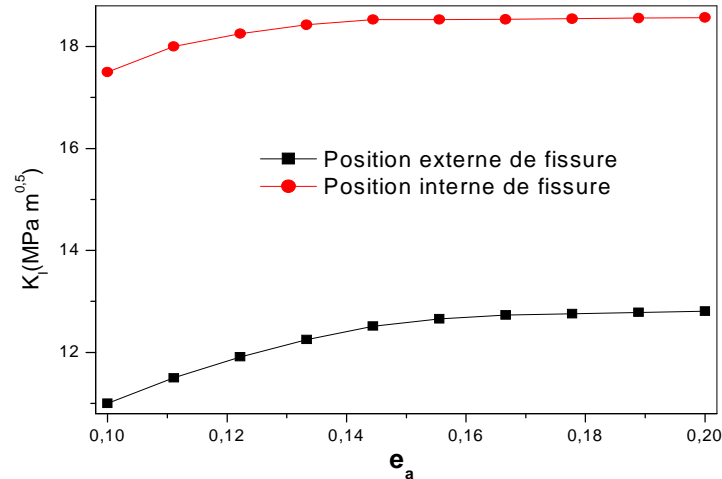
**Figure III-16. Distribution du FIC le long de l'épaisseur du pipeline pour des fissures réparées et non réparées.**

La distribution du FIC le long du front de fissure pour des structures réparées et non réparées par patch composite est illustrée sur la figure III-16. La valeur de l'angle de fissure est supposé égal à  $\theta/2=30^\circ$ . Ainsi, la diminution d'environ 54% des contraintes est très importante dans la fissure externe en contact avec le patch au loin de l'effet de la pression.

### III.2.2. Effet de l'épaisseur de l'adhésif

L'épaisseur de l'adhésif, recommandée dans le domaine de la réparation par patch composite, doit être limitée entre 0.1 et 0.2 mm pour ne pas avoir d'augmentation des contraintes de pelage.

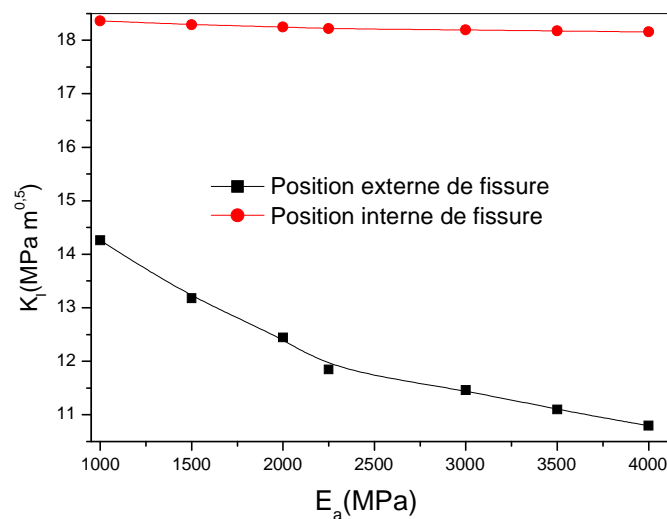
La variation du FIC en fonction de l'épaisseur de la couche adhésive pour des fissures internes et externes est présentée sur la figure III-17. L'augmentation de l'épaisseur de la couche adhésive fait augmenter le FIC dans l'intervalle de 0.1 à 0.14 mm, ensuite, l'effet diminue et devient négligeable particulièrement en position externe de la fissure. Une couche adhésive de faible épaisseur permet un transfert de contrainte correcte.



**Figure III-17. Variation du FIC en fonction de l'épaisseur de la couche adhésive pour une fissure réparée.**

### III.2.3 Effet du module de Young de l'adhésif

Un module de Young élevé (forte rigidité) est bénéfique pour l'adhésif de réparation. En effet, il permet un bon transfert des contraintes de la couche adhésive au patch de réparation. La variation du FIC en fonction du module de Young ( $E_a$ ) pour des fissures internes et externes réparées est illustrée sur la figure III-18. L'effet du module de Young est négligeable pour des fissures internes. Tandis que, l'augmentation du module de Young fait diminuer le FIC pour des fissures externes. A titre d'exemple, le taux de réduction du FIC entre 1000 MPa et 4000 MPa est d'environ 40%. Pour confirmer ce résultat, la figure III.19 illustre la distribution du FIC le long du front de fissure pour différents modules de Cisaillement de la couche adhésive.



**Figure III-18. FIC en fonction du module de Young de l'adhésif.**

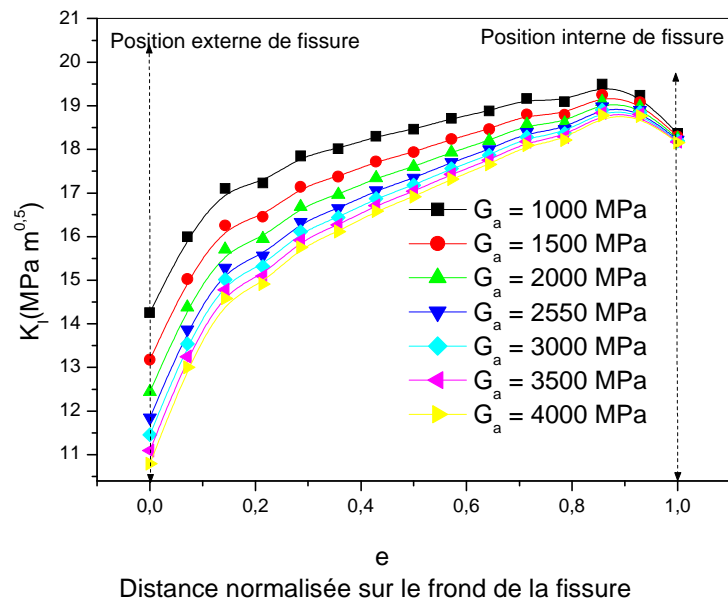


Figure III-19. Distribution du FIC le long du front de fissure pour différents modules de cisaillement de l'adhésif.

### III.2.4 Effet de l'épaisseur du patch

La variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch pour des fissures interne et externe est présentée sur la figure III-20. Une augmentation de l'épaisseur du patch entraîne la diminution du FIC pour des fissures aux positions interne et externe. Une épaisseur importante du patch est à l'origine d'une bonne absorption des contraintes.

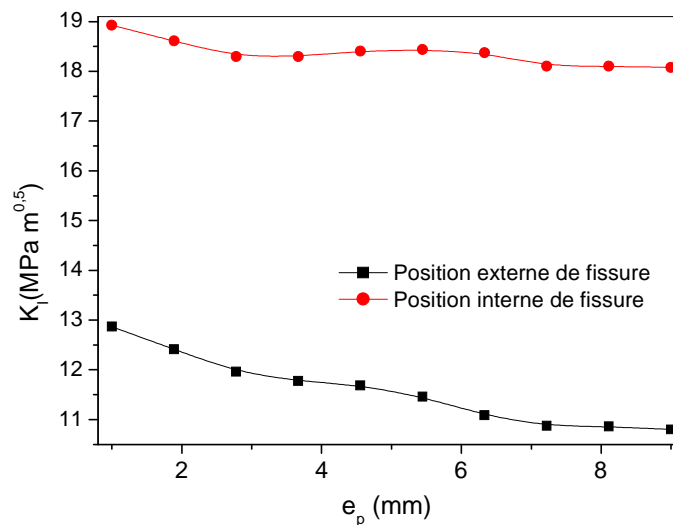


Figure III-20. Variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch.

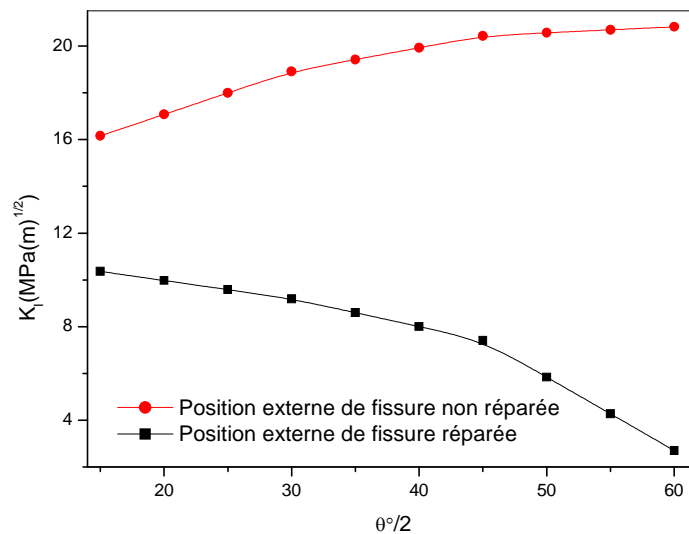
### III.3. Réparation des pipelines sous l'effet du moment de flexion

#### III.3.1 Résultats & interprétations

Cette partie porte sur l'étude de la réparation de pipelines fissurés sous l'effet du moment de flexion en faisant varier les paramètres influençant le système composé de pipeline, patch et couche adhésive.

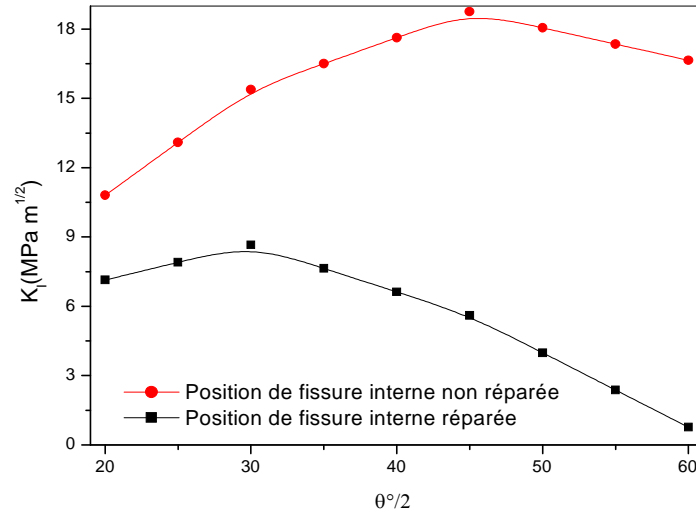
##### III.3.1.1 Comparaison entre pipelines fissurés réparé et non réparé

L'étude de l'effet du moment sur la réparation des pipelines fissurés par patch en matériau composite, a permis d'obtenir les résultats suivants :



**Figure III.21. Variation du FIC en fonction de l'angle de fissures externe réparée et non réparée.**

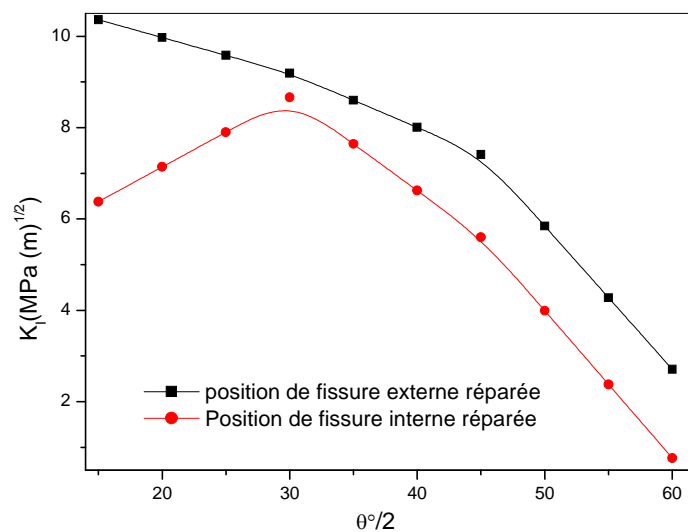
La distribution du FIC pour des fissures externes réparées et non réparées en fonction de l'angle de fissure est illustrée sur la figure III-21. La concentration des contraintes diminue notablement ce qui montre la fiabilité de la réparation par patch en matériau composite des pipelines fissurés sous l'effet du moment. A titre d'exemple, pour un angle de fissure de 45° le taux de réduction est de l'ordre de 63%.



**Figure III.22. Variation du FIC en fonction de l'angle de fissures internes réparée et non réparée**

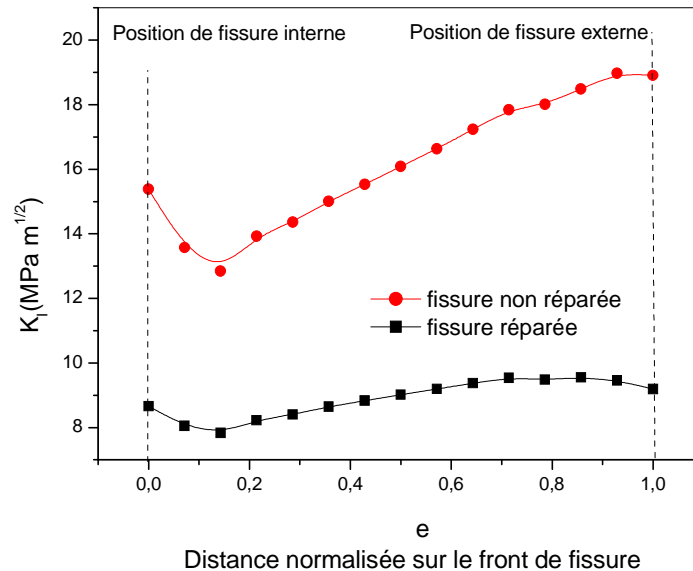
La distribution du FIC pour des fissures internes réparée et non réparée en fonction de l'angle de fissure est illustrée sur la figure III-22. Cette figure montre une réduction de la concentration de contraintes du côté interne de la fissure. Les valeurs du FIC diminuent dans le cas de la fissure interne non réparée à partir d'un angle de 45°. Ceci est probablement dû à la tendance de la fissure à se refermer sous l'effet du mode de chargement en moment. Les deux lèvres de la fissure s'écrasent l'une contre l'autre. Ceci s'accélère pour la réparation de la fissure.

La réparation par patch en matériau composite engendre la diminution de la concentration des contraintes même du côté interne de la fissure.



**Figure III.23. Variation du FIC en fonction de l'angle de fissures externe et interne réparées.**

La comparaison des deux fissures interne et externe réparées est montrée sur la figure III.23. La différence entre les FIC des fissures interne et externe entraîne une diminution proportionnelle à l'augmentation de l'angle de la fissure jusqu'à  $30^\circ$  ; ensuite, cette différence tend à se stabiliser. Par exemple, pour un angle de fissure de  $30^\circ$ , la différence est de 5.8% et pour  $45^\circ$ , elle est de 24%. Ainsi, l'effet de la réparation par patch en composite est fiable pour les fissures interne et externe.

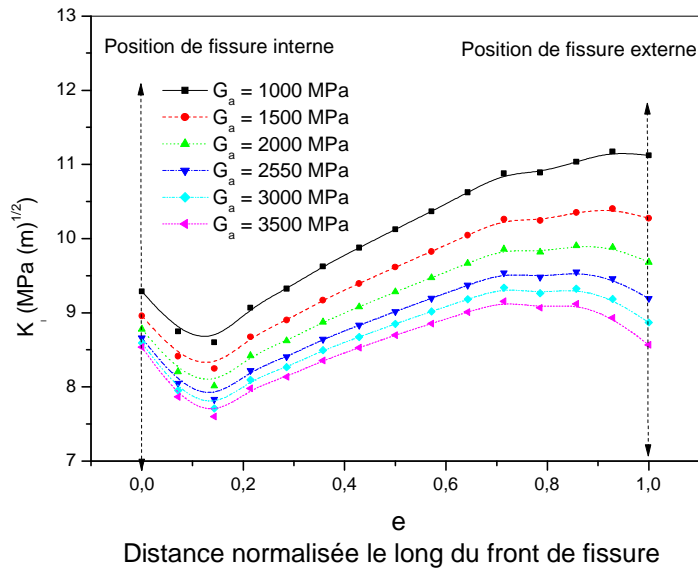


**Figure III.24. Variation du FIC le long de l'épaisseur du pipeline fissuré.**

La distribution du FIC le long du front de fissure pour des structures réparée et non réparée par patch en matériau composite est illustrée sur la figure III-24. L'angle de fissure est considéré égal à  $30^\circ$ . La réduction des contraintes est considérable sur les deux positions de fissures particulièrement sur la face externe en contact avec le patch. La réparation de la fissure par patch en composite est satisfaisante sous l'effet du moment. Ainsi, le FIC diminue au niveau de la fissure externe de  $18,91 \text{ MPa (m)}^{1/2}$  à  $9,19 \text{ MPa (m)}^{1/2}$  représentant un taux de diminution de 51% et au niveau de la fissure interne de  $15,38 \text{ MPa (m)}^{1/2}$  à  $8,7 \text{ MPa (m)}^{1/2}$  ce qui représente un taux de diminution de 43%.

### III.3.1.2 Effet du module de Young

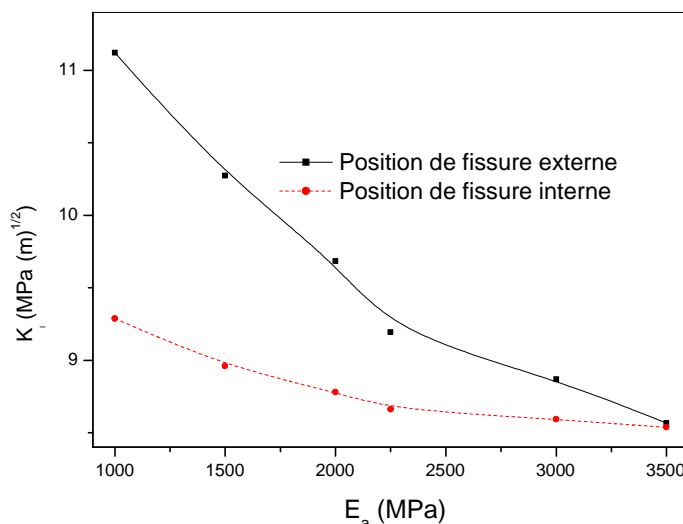
Dans le cas de la réparation de fissure l'objectif est de transmettre le maximum de contraintes à travers l'adhésif vers le patch en matériau composite pour soulager le front de fissure. D'abord, il est plus intéressant d'employer un adhésif ayant un module de cisaillement élevé pour réparer des fissures ou des défauts mais ensuite, il faut être attentif à l'effet du décollement pouvant conduire à la rupture.



**Figure III.25. Distribution du FIC sur le front de fissure pour différents modules de Cisaillement.**

La variation du facteur d'intensité des contraintes le long du front de fissure pour différentes valeurs du module de Young est illustrée sur la figure III-25. En effet, le FIC décroît avec la croissance du module de Young de la couche adhésive. Toutefois, il devient autonome dans le cas de valeurs élevées des modules de Young, figure III.26.

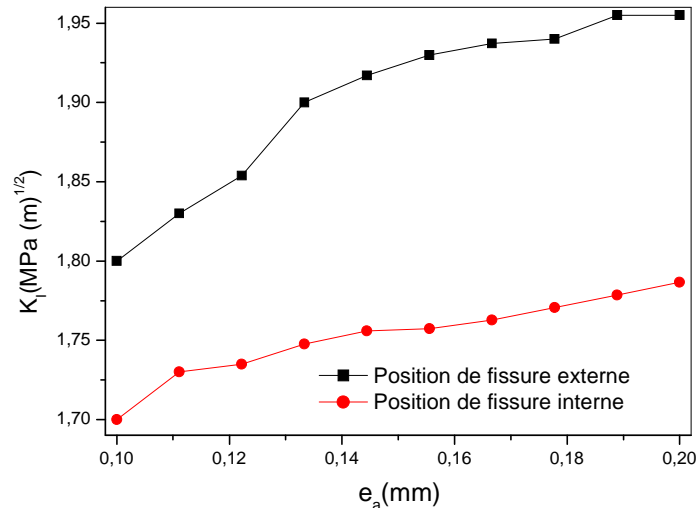
Il est souhaitable d'optimiser le module de Young pour permettre un transfert satisfaisant de contrainte vers le patch en matériau composite et d'obtenir l'équilibre de la réparation.



**Figure III.26. Variation du FIC en fonction du module de Young de l'adhésif pour des fissures internes et externes.**

### III.3.1.3 Effet de l'épaisseur de l'adhésif

L'épaisseur de l'adhésif est l'une des caractéristiques primordiales de l'efficacité du mécanisme de réparation. La figure III.27 montre la variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour des fissures en positions externe et interne. L'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif amplifie le FIC sur les deux positions de fissure. Une faible épaisseur de la couche adhésive favorise le transfert de contraintes et le soulagement du front de fissure



**Figure III.27. Variation du FIC en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour des fissures externe et interne réparées.**

### III.3.1.4 Effet de l'épaisseur du patch

La figure III.28 décrit la variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch pour des fissures interne et externe. L'augmentation de l'épaisseur du patch entraîne la réduction du FIC. Par exemple, des épaisseurs de patch qui varient entre 2mm et 7mm entraînent la réduction du FIC au niveau de la fissure externe d'environ 20%, et à la fissure en position interne il est réduit de 25%. Ce résultat permet de confirmer que le choix d'un patch épais augmente la performance de la réparation.

Les caractéristiques physique et géométrique de l'adhésif doivent être optimisées pour fournir une réparation efficace en toute sécurité et permettre le soulagement de la concentration de contraintes au front de la fissure.

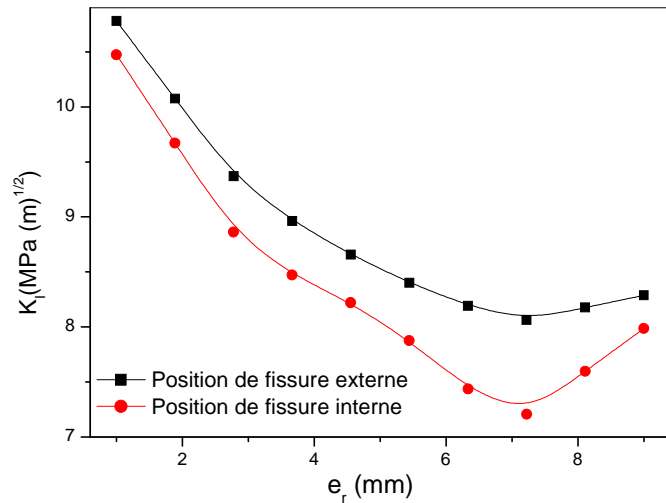


Figure III.28. Variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch.

### III.4. Réparation des pipelines sous l'effet de la traction

#### III.4.1 Résultats & interprétations

Cette partie porte sur l'étude de pipelines réparé et non réparé pour des positions de fissures internes et externes et sur l'analyse de l'efficacité de réparation vis-à-vis du chargement en traction sous variation des paramètres géométrique et physique.

##### III.4.1.1 Comparaison entre des pipelines fissurés réparé et non réparé

La figure III.29 illustre la variation du FIC pour des fissures en positions externe réparée et non réparée en fonction de l'angle de fissure.

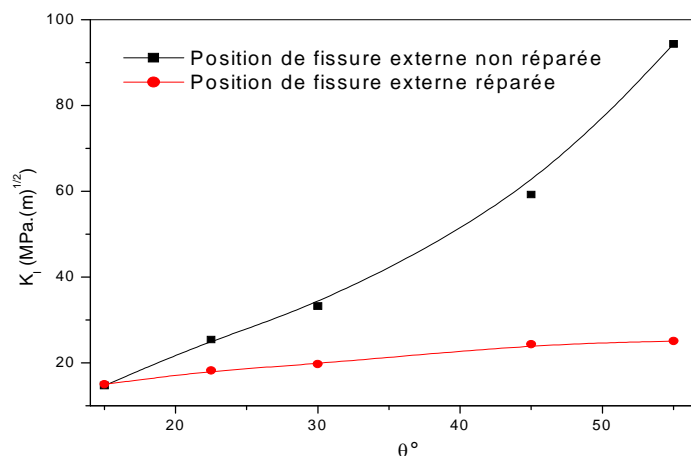
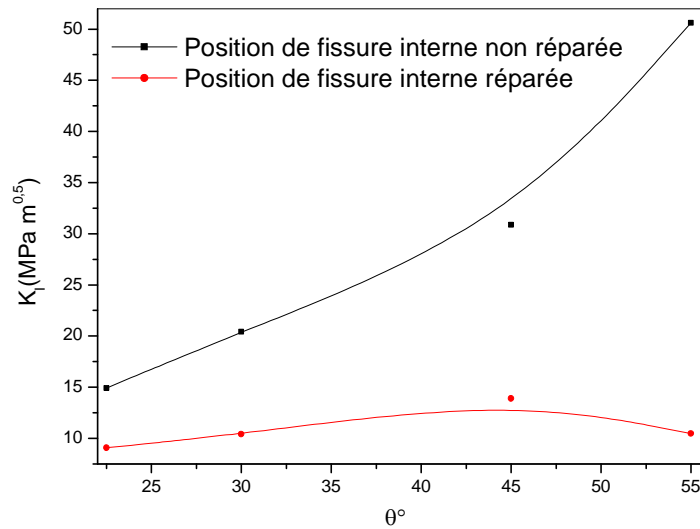


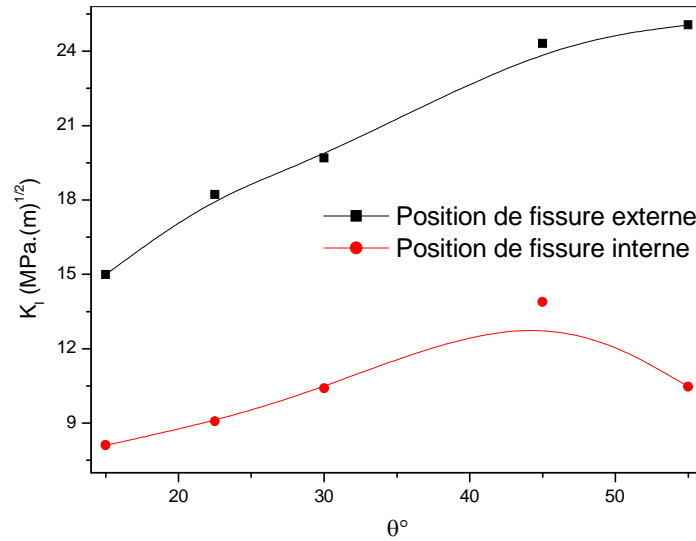
Figure III.29. Variation du FIC en fonction de l'angle de fissure en positions externes réparée et non réparée

Le facteur d'intensité des contraintes diminue fortement. Par exemple, pour un angle de fissure de  $45^\circ$  le taux de réduction est de l'ordre de 59%. Le comportement asymptotique de la courbe représente la fissure réparée montrant ainsi l'effet bénéfique de la réparation par patch en composite sous chargement en traction de la fissure en position externe.

L'effet de la réparation par patch composite sur les fissures en positions internes, est illustré sur la figure III.30. La réparation entraîne la réduction de la concentration des contraintes au niveau de la fissure en position interne. A titre d'exemple, pour un angle de fissure de  $45^\circ$  le taux de réduction est de l'ordre de 54%.

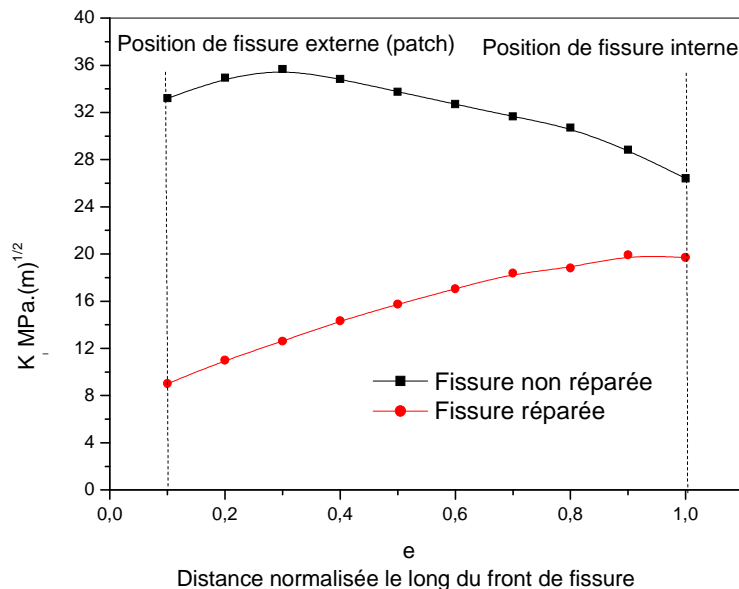


**Figure III.30. Variation du FIC en fonction de l'angle de fissure en position interne réparée et non réparée.**



**Figure III.31. Variation du FIC en fonction de l'angle de fissures réparées en positions interne et externe.**

La figure III.31 présente la comparaison de la variation des FIC entre des fissures en positions internes et externes de pipelines réparés par patch composite. La différence entre les facteurs d'intensité de contraintes des fissures réparées en positions interne et externe est considérable quelle que soit la valeur de l'angle de la fissure  $\theta$ . La différence relative est de l'ordre de 42% pour un angle de fissure de  $45^\circ$ .



**Figure III.32. Variation du FIC le long de l'épaisseur du pipeline fissuré.**

La figure III.32 présente la distribution du FIC le long du front de fissure pour des structures réparée et non réparée par patch composite pour un angle de fissure de  $45^\circ$ . La réduction des contraintes est considérable sur les deux positions de fissures particulièrement sur la face

externe en contact avec le patch. Ainsi, la réparation de la fissure par patch en composite est efficace sous l'effet de la traction. Sur le plan des valeurs, le FIC diminue à la position de fissure externe de  $9.02 \text{ MPa (m)}^{1/2}$  à  $33.20 \text{ MPa (m)}^{1/2}$  ; ce qui représente un taux de réduction de 72% et à la position de fissure interne de  $19.7 \text{ MPa (m)}^{1/2}$  à  $26.7 \text{ MPa (m)}^{1/2}$  soit un taux de réduction de 26%.

### III. 4.1.2 Effet de l'épaisseur de l'adhésif

La couche adhésive est le point qui permet le transfert de contraintes de la zone de concentration de contraintes vers le patch composite. La figure III.33 montre la variation du FIC en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour des positions de fissures interne et externe réparées. Ainsi, l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif entraîne celle du FIC, particulièrement aux positions de fissures internes.

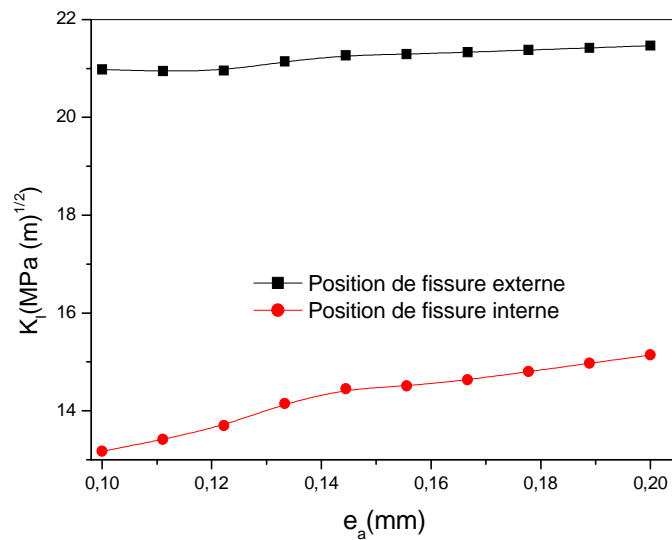


Figure III.33. Variation du FIC en fonction de l'épaisseur de l'adhésif.

La distribution des contraintes sur le front de fissure du pipeline avec la variation de l'épaisseur de l'adhésif est illustrée sur la figure III.34. Ainsi, la diminution de l'épaisseur de l'adhésif entraîne celle du FIC. La faible épaisseur de l'adhésif est bénéfique dans la réparation par patch composite.

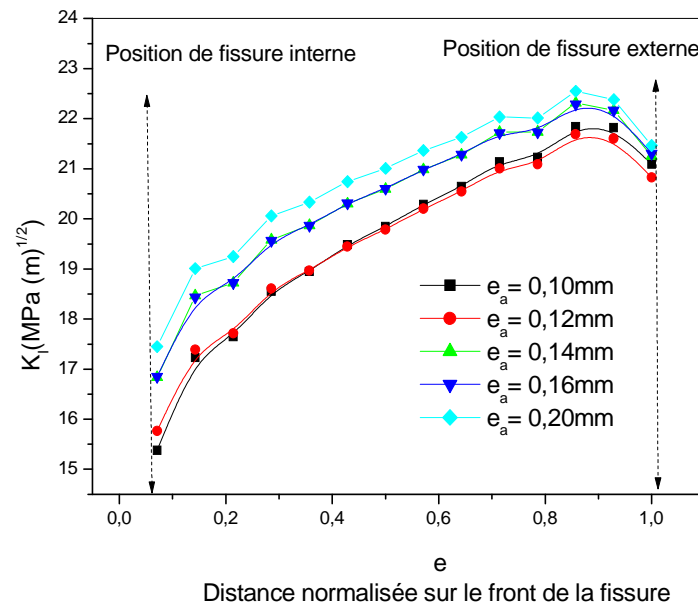


Figure III.34. Distribution du FIC sur le front de la fissure réparée.

#### III.4.1.3 Effet du module de Young de l'adhésif

La figure III.35 présente la variation du FIC en fonction du module de Young pour des positions des fissures interne et externe réparées. Ainsi, l'augmentation du module de Young de l'adhésif entraîne la diminution des concentrations de contraintes ; ce qui est bénéfique pour la réparation.

Par exemple, le taux de réduction du FIC entre  $E_a=1000$  MPa et  $E_a=3000$  MPa pour le cas de fissure en positions interne et externe est respectivement de l'ordre de 22% et de 3%.

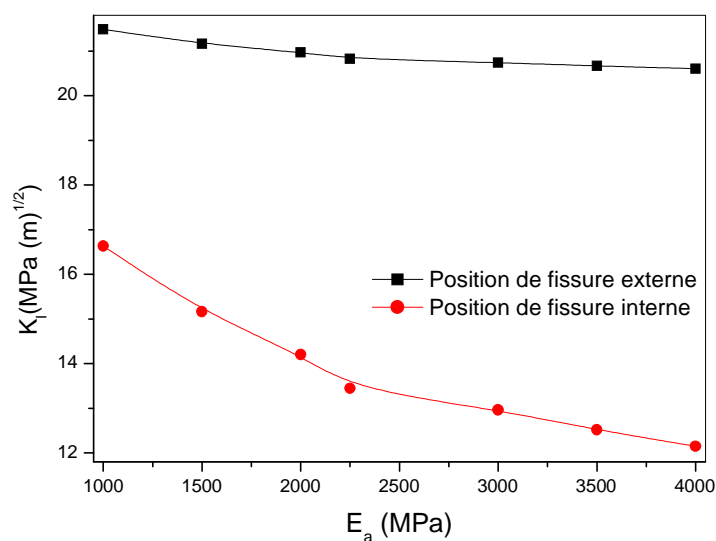


Figure III.35. Variation du FIC en fonction du module de Young de l'adhésif.

La figure III.36 montre la distribution du FIC en fonction des différents modules de Young sur le front de fissure. Le module de Young de l'adhésif est inversement proportionnel au FIC. Un module de Young élevé permet un bon transfert de contraintes et engendre la réduction du FIC.

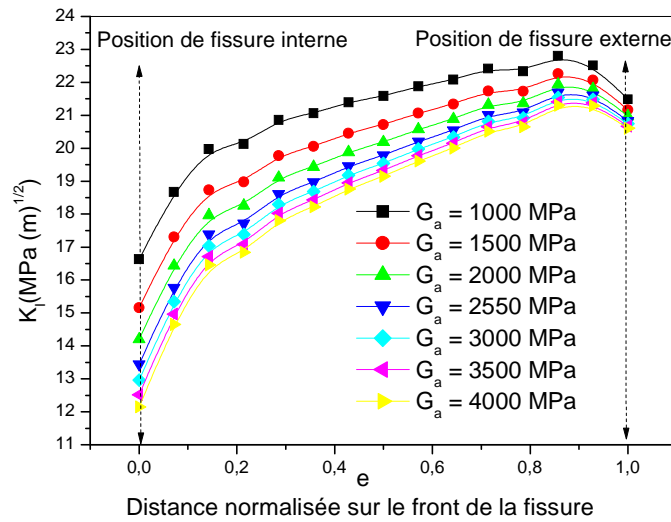


Figure III.36. Distribution du FIC sur le front de fissure.

#### III.4.1.4 Effet de l'épaisseur du patch

La figure III.37 montre la variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch pour des positions de fissures interne et externe réparées. L'augmentation de l'épaisseur du patch entraîne la diminution du FIC ; ce qui est bénéfique pour la réparation de la fissure dans les deux positions. Un patch épais permet une bonne absorption des contraintes.

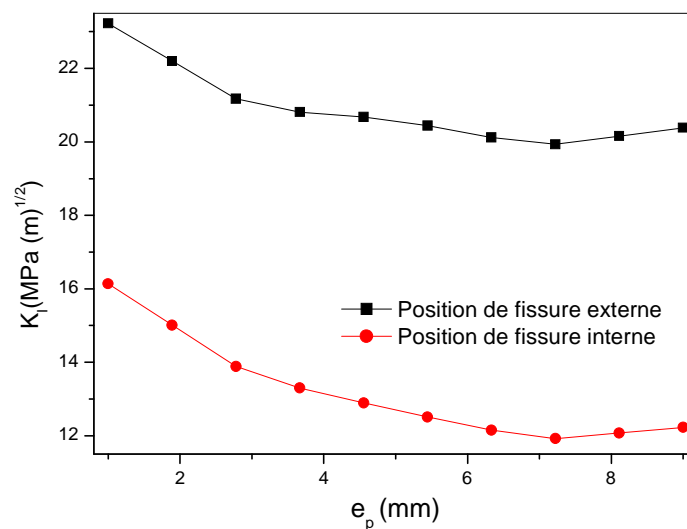


Figure III.37. Variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch.

### III.5 Comparaison entre les trois chargement : flexion, traction et pression

Les résultats montrés sur les figures III-38 et III-39, permettent de noter que la réduction du FIC en pointe de fissure externe est très importante par rapport à celle en pointe de fissure interne pour les différents cas de charge.

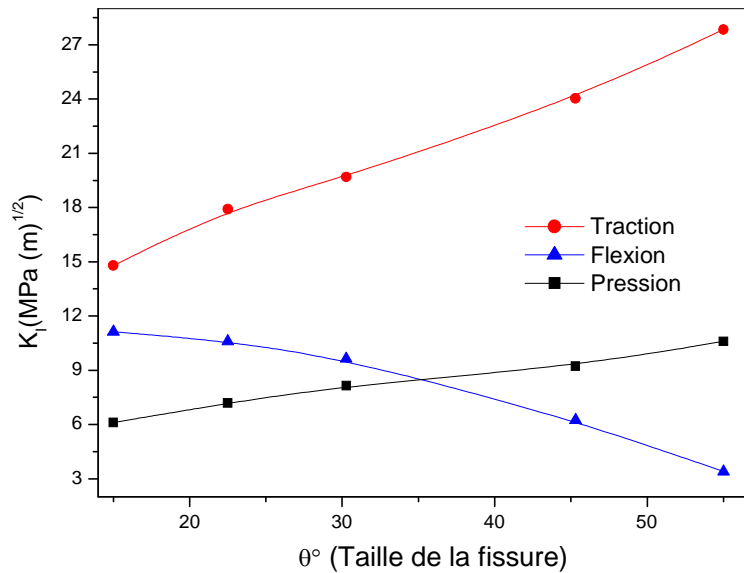


Figure III.38. FIC pour des fissures internes réparées par patch

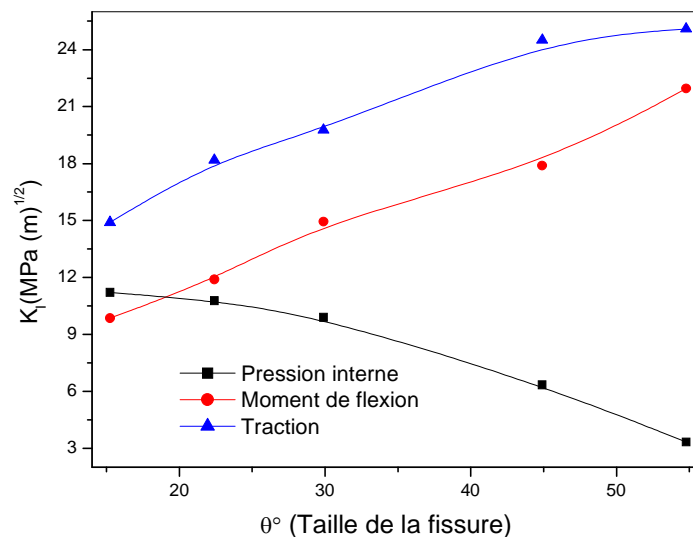


Figure III-39. FIC pour des fissures internes réparées avec patch composite

Le plus grand écart dans des valeurs du FIC entre les deux pointes des fissures interne et externe présente un inconvénient majeur pour la réparation des pipelines et rend la prédiction de la trajectoire de propagation des fissures très difficile.

Dans l'application aéronautique, ce problème est résolu par la technique de réparation par patch composite double. Cette technique permet l'équilibre du transfert de contraintes entre les faces des plaques réparées.

L'application de cette technique pour une canalisation endommagée est pratiquement impossible. On peut confirmer que la réparation des fissures externes dans le pipeline est plus efficace que pour les fissures internes. En outre, la détection de fissures externes est plus simple. Ces observations peuvent être généralisées au cas des pipelines corrodés. En effet, la réparation des pipelines corrodés par patch en composite est plus efficace pour la corrosion externe sous contraintes.

Le patch en composite atténue le facteur d'intensité de contraintes dans la région fissurée du pipeline ; ce qui réduit le risque d'initiation de fissure et de sa propagation.

La réduction du facteur d'intensité de contraintes par la réparation par patch en composite dans le pipeline est très importante en pointe de fissures, ceci améliore la durée de vie résiduelle des tuyaux réparés.

Le principal inconvénient de la technique de réparation par patch en composite dans le pipeline est l'impossibilité de coller le patch en composite à double face afin d'équilibrer le transfert de contraintes entre les pointes de fissure interne et externe.

L'optimisation des propriétés mécaniques de l'adhésif permet d'améliorer significativement les performances de réparation et de durabilité de la structure. Cette optimisation doit aboutir à l'équilibre entre la réduction de l'intensité de contraintes au niveau du défaut réparé et la réduction du risque de défaillance de l'adhésif. L'utilisation de plusieurs couches composites pour la réparation peut également améliorer les performances de réparation. Dans ce cas, les orientations des plis doivent être optimisées.

# **Références**

## **Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

---

- [1] Alexander C. R.,2009, Evaluating Damaged Subsea Pipelines Using an Engineering-Based Integrity Management Program , "ASME International Offshore Pipeline Forum", Paper No. IOPF2009-6002 Houston, Texas.
  
- [2] Houssam Toutanji , Sean Dempsey,Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composites materials, *Thin-Walled Structures* 39: 153–165. (2001)
  
- [3] Belhouari M., BachirBouiadjra B. and Serier B., 2004, Comparison of double and single bonded repairs to symmetric composite structures: A numerical analysis , *Composite Structures*, 65 (1), pp. 47–53.
  
- [4] Escoe A. K.; *Piping and Pipeline Assessment Guide*, Publisher: Gulf Professional Publishing of Elsevier; 1 edition, USA, (2006).
  
- [5] ASME B31.8. Gas transmission and distribution piping systems. New York: American Society of Mechanical Engineers; (2003).
  
- [6] Alexander CR, Francini R. State of the art assessment of composite systems used to repair transmission pipelines. Paper no. IPC2006-10484. In: *Proceedings of the 16th international pipeline conference*, Calgary, Canada September 25–29; (2006)
  
- [7] Bachir Bouiadjra B., Belhouari M., Serier B, .Computation of the stress intensity factor for repaired crack with bonded composite wrap in mode I and mixed mode. *Composite Structures*, ;56:401–6. (2002)
  
- [8] ABAQUS/CAE Ver 6.9 User's Manual. Hibbitt, Karlsson &Sorensen, Inc;( 2007)

## **Chapitre IV**

# **Analyse élastoplastique de la réparation des pipelines fissurés**

## **I. Introduction**

Depuis Rice [1], L'intégrale J est le critère le plus utilisé pour analyser le comportement en rupture des matériaux ductiles, ce critère « J » peut être déterminée analytiquement, numériquement et expérimentalement. En raison de la ductilité élevée des matériaux employés dans les pipelines, l'approche de l'intégrale J a été très utilisée comme méthode d'évaluation de la rupture des pipelines.

Dans ce chapitre notre étude a été conduite en vue d'analyser le comportement élastoplastique d'un pipeline fissuré et réparé par patch en composite. Plusieurs paramètres ont été mis en évidence sur la qualité de réparation à savoir les propriétés mécaniques du pipeline, du patch et de l'adhésif ainsi que leurs épaisseurs.

Dans cette partie nous considérons le même modèle géométrique du pipeline, les mêmes propriétés mécaniques et géométriques du patch ainsi que l'adhésif. Le pipeline en acier SA312 Gr. L'approche énergétique de la mécanique non linéaire de la rupture fondée sur l'intégrale J de Rice, est utilisée pour décrire le comportement en rupture du pipeline. La taille de la fissure et la pression interne sont mises en évidence par les variations de l'énergie de rupture pour une réparation par patches.

Cette partie de l'étude porte sur l'analyse du comportement élastoplastique du pipeline fissuré, et réparé avec patch en composite, en utilisant la méthode des éléments finis tridimensionnelle. le critère choisi est l'intégrale J, qui est un paramètre de la mécanique non linéaire de la rupture qui peut être employée pour l'évaluation de la rupture ductile. Plusieurs travaux sur les pipelines fissure, soumis aux chargements de flexion et de traction ont été réalisés [2,3].

L'influence de différents chargements de pression de service, moment fléchissant et traction, ainsi que celle de facteurs tels que l'épaisseur du patch et de l'adhésif de réparation, et la taille de la fissure sur les variations de l'énergie de rupture en pointe de fissure sont mises en évidence.

## **II. Matériaux utilisés**

### **II.1. Propriétés de l'acier**

Les propriétés élastoplastiques de l'acier sont obtenues à partir de la figure IV.1 qui représente la courbe contrainte-déformation de l'acier considéré.

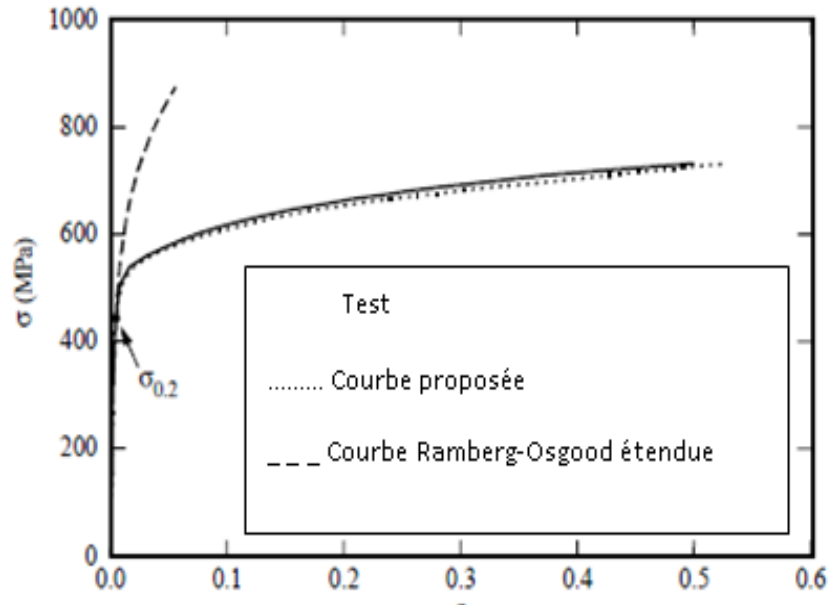


Figure IV.1. Contrainte-déformation pour un acier inoxydable SA312 Type 304 [4].

Le matériau a été choisi avec un comportement élastoplastique caractérisé par la relation contrainte-déformation Ramberg-Osgood:

$$\frac{\xi}{\xi_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (\text{IV.1})$$

Ou:

$\alpha$  : Facteur de Ramberg-Osgood

$n$  : Exposant d'écrouissage

$\xi_0$  : Déformation à la limite élastique, et  $\sigma_0$  la contrainte à la limite élastique.

## II.2. Propriétés du patch

Le tableau IV.1 présente les propriétés du patch en matériaux composite (boron epoxy)

Tableau IV.1. Propriétés mécaniques du boron-epoxy.

$E_1$ GPa	$E_2$ GPa	$E_3$ GPa	$\mu_{12}$	$\mu_{13}$	$\mu_{32}$	$G_{12}$ GPa	$G_{13}$ GPa	$G_{23}$ GPa
200	25	25	0.21	0.21	0.21	7.2	5.5	5.5

### III .Résultats

L'intégrale J est un paramètre de la mécanique de la rupture non linéaire qui peut être employé pour l'évaluation de rupture ductile en présence de déformation plastique importante. En raison de la ductilité élevée des matériaux employés dans les pipes, l'approche de l'intégrale J a été très utilisée comme méthode d'évaluation de la rupture des pipes. Conventionnellement, cette intégrale J peut être décomposée en deux termes :

$$J = J_e + J_p \quad (IV.2)$$

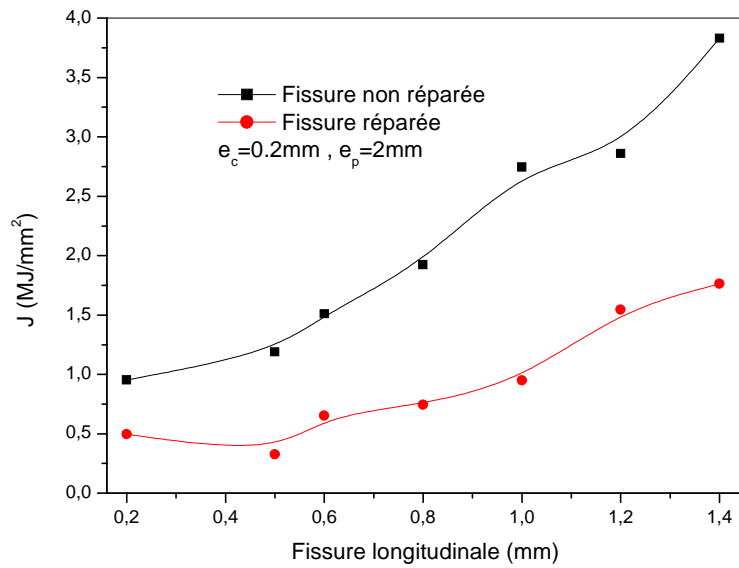
$J_e$ , est l'intégrale J en comportement élastique pouvant être déterminée à partir des relations déjà élaborées exigeant la connaissance du facteur d'intensité de contraintes  $K_I$ .

La difficulté réside dans l'évaluation de  $J_p$  en comportement plastique. Cette dernière est définie à partir de la grandeur élastique  $J_e$  corrigée. Cette correction tient compte de l'effet de la plastification.

#### III.1. Fissure longitudinale

##### III.1.1. Influence de la taille de la fissure

La figure IV.2, montre que les valeurs de l'intégrale de contour «J», augmentent avec l'augmentation de la taille de la fissure dans les deux cas du pipeline non réparé et réparé ( $e_c=0.2\text{mm}$  et  $e_p=2\text{mm}$ ). On remarque que cette augmentation est moins significative dans le cas du pipeline réparé. Ceci montre l'effet bénéfique de la réparation par patch en composite. La différence remarquable de l'ordre de 56 % pour les grandes valeurs de la longueur de fissure est due à l'absorption des contraintes par le patch.



**Figure IV .2. Variation de l'intégrale J en fonction de la taille de fissure sous effort de pression.**

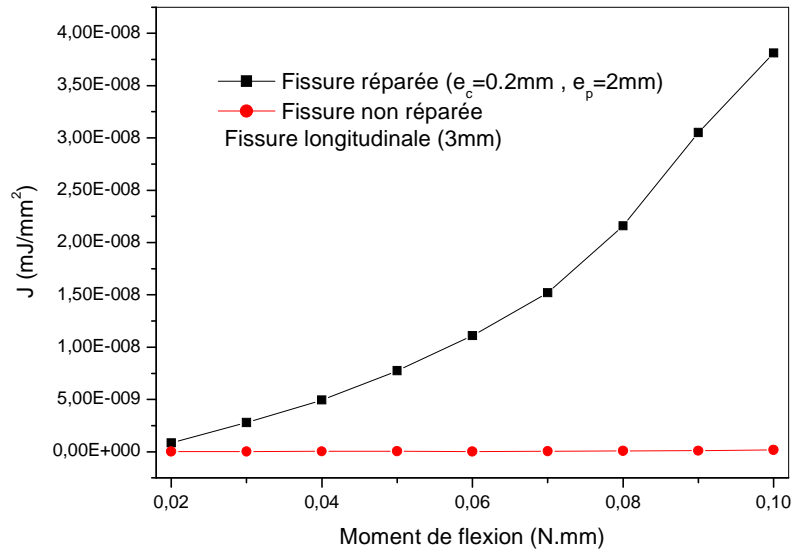
### III.1.2 Pipeline soumis à un moment de flexion

Comme dans le cas précédent, l'intégrale  $J_p$ , sera calculée en considérant un chargement caractérisé par son moment fléchissant seuil  $M_L$ . Dans ce cas la contrainte  $\sigma = \sigma_y$  devient :

$$\sigma_y = \frac{M_L}{\pi R^2 t} \quad \text{(IV.3)}$$

Les résultats que montre la figure IV.3 représentent la variation des résultats de "J" en fonction du chargement en flexion.

On Remarque que les valeurs de "J" augmentent avec l'augmentation des valeurs du moment de flexion et cela dans les deux cas (structure réparée et non réparée), on peut noter aussi que la différence des valeurs de « J » de la structure réparée sont nettement plus faibles que dans la structure sans réparation.



**Figure IV.3. Variation de l'intégrale J en fonction de la taille de fissure longitudinale sous moment de flexion**

### III.1.3. Influence de la pression

Pour tenir compte du comportement élastoplastique, on utilise la contrainte de référence  $\sigma_{ref}$  qui est une grandeur représentative de la plasticité globale dans une section de la structure analysée. Plusieurs méthodes de détermination de cette contrainte ont été utilisées. La différence entre ces méthodes réside dans la définition de la contrainte de référence. L'une de ces définitions repose sur la charge limite  $P_L$ , obtenue par analyse limite, calculée pour une contrainte  $\sigma = \sigma_y$  (limite élastique correspondant à 0.2% d'allongement). Cette dernière permet l'évaluation de la sévérité du chargement, en supposant un comportement élastoplastique compte tenu de la redistribution des contraintes pouvant apparaître dans la section fissurée lors de sa plastification. Des formulaires donnant les charges-limites et les contraintes de référence sont établis pour des formes et des tailles des défauts les plus répandues [5].

Dans son expression la plus simple, l'intégrale  $J_p$  est calculée à partir de la relation suivante :

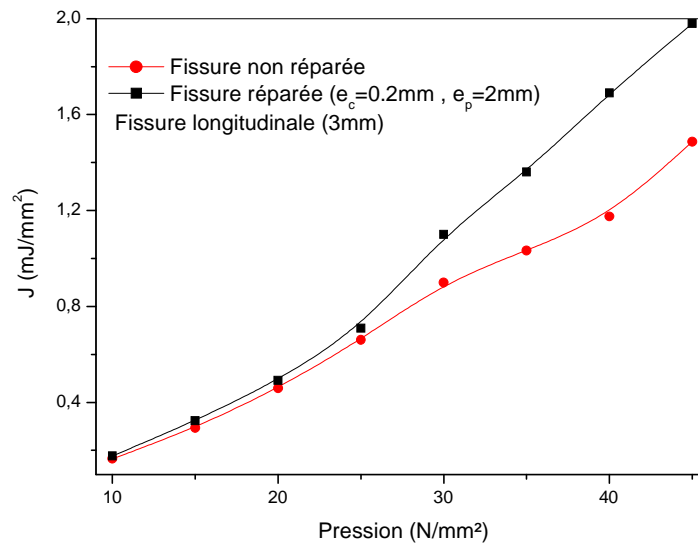
$$\frac{J_p}{J_e} = h(n) \cdot \left( \frac{P}{P_L} \right)^{n-1} \quad (\text{IV.4})$$

$$J_p = k \cdot J_e \quad (\text{IV.5})$$

Le facteur de correction  $k$  dépend de la contrainte de référence dans la section du défaut et de la déformation associée à cette contrainte résultante d'un essai de traction.

Où  $h(n)$  est une fonction qui dépend non seulement du coefficient d'écroûissage «  $n$  » mais également de la configuration géométrique de la fissure définie par le rapport  $a/c$  et  $P$  la pression qui s'applique à la structure.

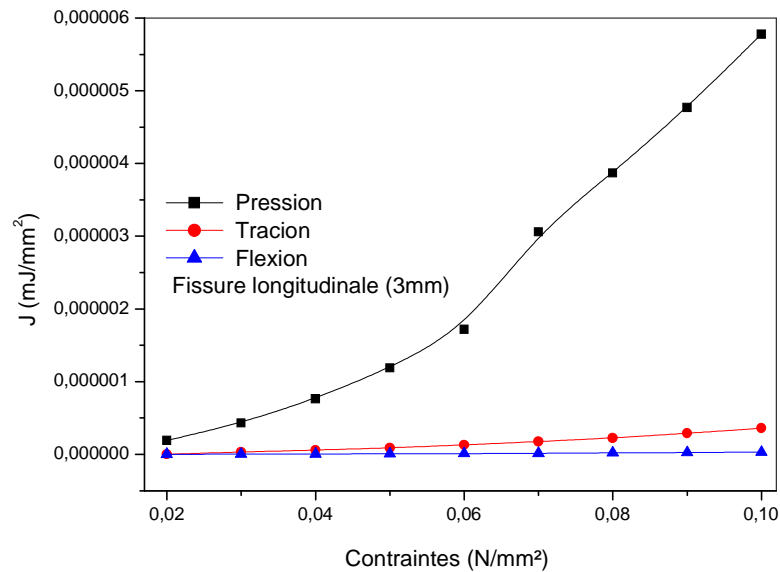
L'effet de la pression appliquée sur le pipeline est illustré sur la figure IV.4. Ce paramètre physique est fondamental pour la durée de vie du pipeline. Nous remarquons qu'à partir de la valeur de pression  $P = 1$  MPa jusqu'à la valeur 30 MPa, les valeurs du contour d'intégrale «  $J$  » augmentent graduellement et ne sont pas très écartées pour les trois tailles de fissure. Au-delà d'une pression de 30 MPa, le paramètre de rupture «  $J$  » croît fortement.



**Figure IV.4. Variation de l'intégrale  $J$  en fonction de la taille de fissure longitudinale sous pression.**

### III.1.4. Comparaison entre les résultats de "J" pour les 03 cas de chargements

La figure IV.5 représente la variation des valeurs de «  $J$  » en fonction des trois contraintes (pression, traction et flexion)



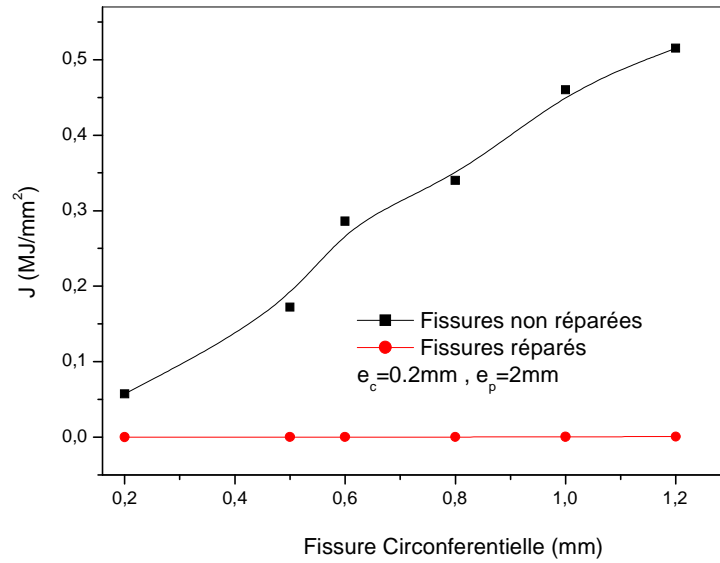
**Figure IV.5. Comparaison entre les résultats de "J" pour les trois cas de charges (pression, traction et flexion)**

Pour une fissure longitudinale ( $a=3\text{mm}$ ), les valeurs de "J" augmentent linéairement avec l'augmentation des valeurs des trois contraintes (pression, flexion et traction), l'augmentation est radicale et maximale sous la charge de pression, puis moins apparente sous la charge de traction puis de flexion successivement.

### III.2. Fissure circonférentielle

#### III.2.1. Influence de la taille de la fissure

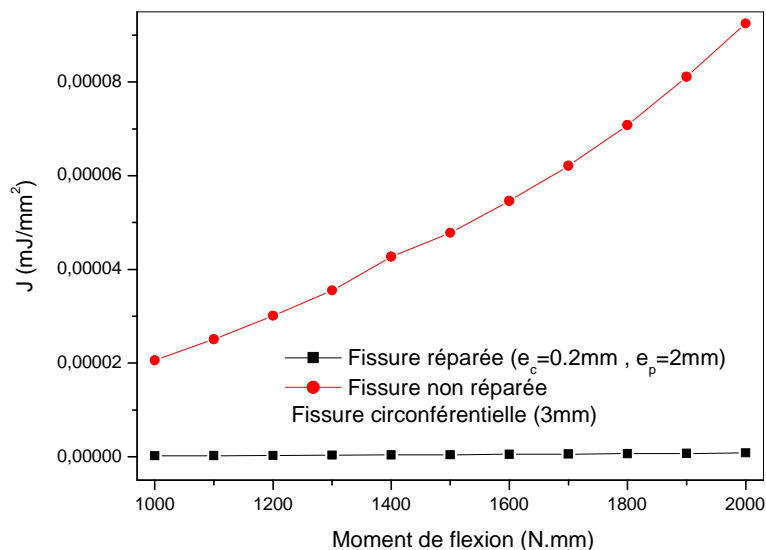
La figure IV.6, montre que les valeurs de l'intégrale de contour «J», augmentent avec l'augmentation de la taille de la fissure dans les deux cas du pipeline non réparé et réparé ( $e_c=0.2\text{mm}$  et  $e_p=2\text{mm}$ ). On remarque que cette augmentation est moins significative que pour celle des fissures longitudinales, et l'on remarque aussi qu'elles sont effectivement réduites dans le cas du pipeline réparé. Ceci montre l'effet bénéfique de la réparation par patch en composite. La différence remarquable est due à l'absorption des contraintes par le patch.



**Figure IV.6. Variation de l'intégrale J en fonction de la taille de fissure circonférentielle sous effort de pression.**

### III.2.2. Influence du moment de flexion

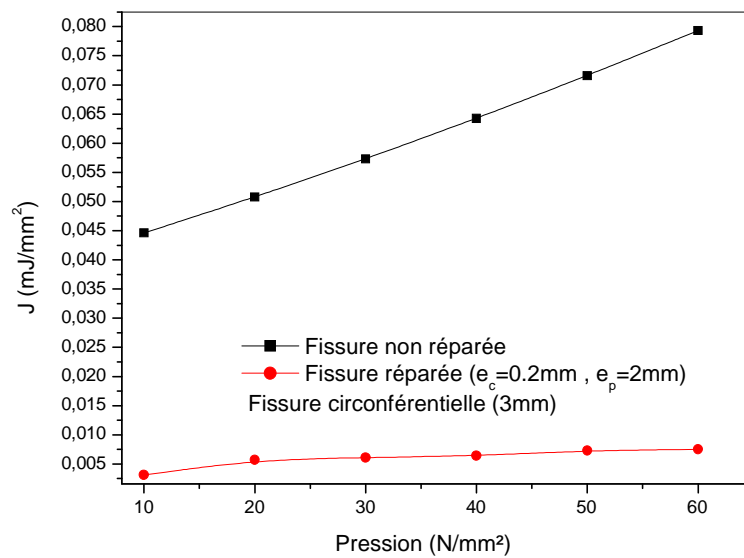
La figure IV.7 ci-dessous représente les résultats de l'intégrale «J» en fonction du moment de flexion pour la même fissure circonférentielle  $a=3\text{mm}$ , et ceci dans les deux cas de structure réparée et non réparée. L'effet de la réparation est confirmé par le grand écart entre les résultats, les valeurs de « J » sont nettement plus faibles dans la structure réparée.



**Figure IV.7. Variation de l'intégrale J en fonction de la taille de fissure circonférentielle sous un moment de flexion.**

### III.2.3. Effet de la pression

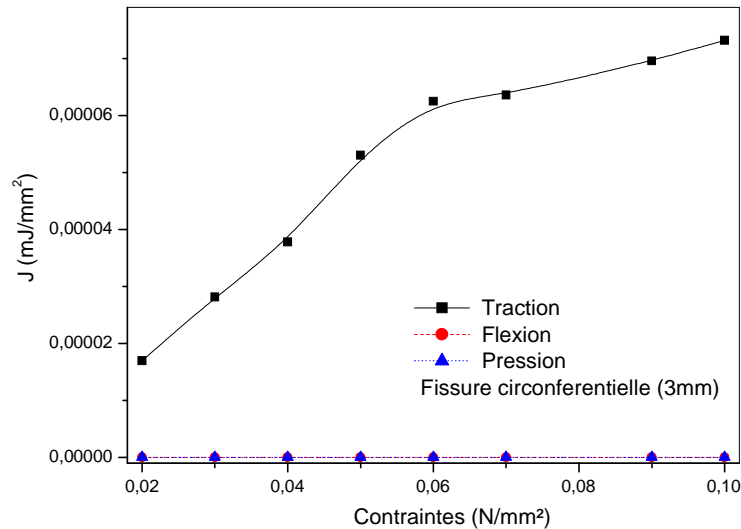
La figure IV.8 représente la variation des valeurs de « J » en fonction du chargement en pression. Nous pouvons constater qu'une augmentation de la pression du pipeline entraîne systématiquement un accroissement de l'intégrale J en pointe de fissure pour un pipeline non réparé. L'augmentation du champ de contraintes et déformation en pointe de fissure entraînant une augmentation de l'énergie de rupture. Une telle augmentation peut provoquer l'endommagement ou la rupture brutale de la structure. Par contre un pipeline réparé avec patch, stabilise et diminue les valeurs de l'intégrale J. L'effet bénéfique du patch est clairement apparent dans ce cas.



**Figure IV.8. Variation de l'intégrale J en fonction de la taille de fissure circumférentielle sous pression.**

### III.2.4. Comparaison entre les résultats de "J" pour les 03 cas de chargements

La figure IV.9 représente la variation des valeurs de « J » en fonction des trois contraintes (pression, traction et flexion) pour une fissure circumférentielle  $a=3\text{mm}$



**Figure IV.9. Comparaison entre les résultats de "J" pour les trois cas de charges (pression, traction et flexion)**

On peut remarquer que, les valeurs de "J" augmentent linéairement avec l'augmentation des valeurs des trois contraintes (pression, flexion et traction), l'augmentation est radicale et maximale sous la charge de traction, et presque les mêmes valeurs pour les deux cas de chargement en flexion et en pression.

### III.2.5. Influence de l'épaisseur de l'adhésif

La figure IV.10, montre la variation de (J) en fonction de l'épaisseur de l'adhésif ( $e_a$ ) pour un patch d'épaisseur de 0,3 mm. On remarque que J augmente de façon graduelle (très lente), avec l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif. Entre  $e_a = 0,08\text{mm}$  et  $e_a = 0,22\text{ mm}$  la variation est presque stable. Au-delà de 0,22 mm la valeur de l'énergie de rupture en pointe de fissure augmente rapidement et de façon linéaire.

Cette analyse montre qu'une épaisseur de l'adhésif de 0.2 mm représente l'optimum, car il est inutile d'augmenter ( $e_a$ ) au-delà de cette valeur du fait que «J», n'est plus influencée par la réparation.

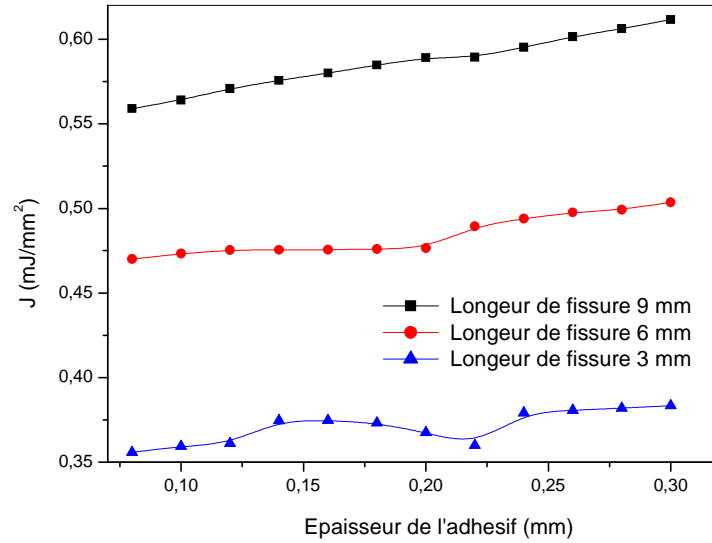


Figure IV.10. Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur « J ».

### III.2.6. Influence de l'épaisseur du patch sur l'intégrale de contour

La figure IV.11, représente la variation de « J » en fonction de l'épaisseur du patch. L'effet bénéfique de la réparation par patch est confirmé par la forte diminution de l'intégrale de contour avec l'augmentation de l'épaisseur du patch ; l'effet de l'augmentation de l'épaisseur du patch est très apparent. Nos résultats montrent l'efficacité de l'utilisation de la méthode de réparation par patch en composite. Cette méthode permet aussi d'optimiser la valeur de l'épaisseur du patch  $e_p$ , car il est clair que l'emploi d'une épaisseur  $e_p$  plus grande que la valeur  $e_p=3\text{mm}$  n'aura pas d'effet significatif sur la réduction de (J).

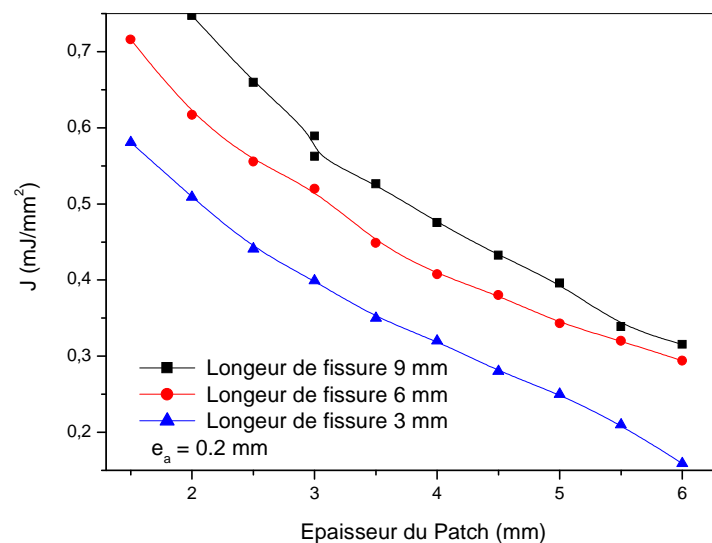


Figure IV.11. Effet de l'épaisseur du patch sur « J ».

# **Références**

# **Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

---

- [1] Rice, J. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by notches and cracks, J. of App. Mech 35, 379-386, 1968.
- [2] Rahman, S and Brust, F.W. Approximate methods for predicting J-integral of a circumferentially surface-cracked pipe subject to bending .International Journal of Fracture 85,111-130, 1997.
- [3] Gullerud, A.S., Koppenhoefer, K.C., Roy, A and Dodds Jr, R.H., 3-D Dynamic Nonlinear Fracture Analysis of solids using parallel Computers and Workstations, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2000.
- [4] Rasmussen, K.JR. Full-range Stress-strain Curves for Stainless Steel Alloys, MScEng, PhD, University of Sydney, p13, Nov, 2001.
- [5] Kaddouri K. étude du comportement en rupture des pipes. Thèse de doctorat, université djillali liabes de sidi bel abbés, faculté des sciences de l'ingénieur, département génie mécanique 2007.

# **Conclusion générale**

## CONCLUSION GENERALE

---

La réduction de l'intensité de contraintes par la réparation par patch en composite dans le pipeline est très significative en pointe de fissure, ce qui améliore la durée de vie résiduelle des conduites réparées. Le principal inconvénient de la technique de réparation par composite du pipeline endommagé est l'impossibilité de lier le patch composite en double faces afin d'équilibrer le transfert de contrainte entre les pointes de fissure interne et externe. L'optimisation des propriétés mécaniques de l'adhésif peut améliorer considérablement les performances et la durabilité de réparation.

Cette optimisation doit faire l'équilibre entre la réduction de l'intensité de contrainte au niveau du défaut réparé et la réduction du risque de rupture adhésive. L'utilisation de plusieurs couches de composites pour la réparation peut également améliorer les performances de réparation. Dans ce cas, les orientations des plis doivent être optimisées. Une expression semi-analytique du facteur d'intensité de contrainte pour les fissures réparées a été extraite du calcul FE.

Les pipelines sont soumis en service à des sollicitations mécaniques donnant lieu à des contraintes généralement multiaxiales et à amplitude variable, ce qui conduit à l'apparition de fissures provoquant leurs endommagements ou leurs ruptures. Une alternative à la réparation de ces pipelines consiste à les renforcer au préalable, afin de retarder l'apparition ou la propagation de fissures. Ainsi, les patches en matériaux composites sont utilisés dans ce but. Cette réparation permet de retarder la propagation de fissure et augmenter la durée de vie des pipelines ainsi réparés.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la réparation des pipelines par patches en composites afin de ralentir la propagation de fissure. Deux lois de comportement du matériau réparé sont utilisées. Dans la première, nous utilisons l'approche locale de la mécanique linéaire de la rupture basée sur le facteur d'intensité de contrainte en pointe de fissure. Pour le comportement non linéaire de la structure réparée nous utilisons l'approche globale de la mécanique de la rupture basée sur l'intégrale de contour J. Les principaux résultats des deux analyses montrent l'effet bénéfique du patch sur le comportement en rupture des pipelines endommagés. Les paramètres de rupture dépendent essentiellement de la pression interne du pipeline, des propriétés géométriques et mécaniques du patch du pipeline et de l'adhésif ainsi que de leurs épaisseurs. Les résultats obtenus numériquement par la méthode des éléments finis tridimensionnelle permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le patch réduit l'intensité du champ de contrainte en pointe de fissure et le facteur d'intensité de contrainte,
- L'un des paramètres déterminant pour les structures enterrées pour le transport des fluides est leur pression. L'augmentation de cette pression engendre celle du facteur d'intensité de contrainte et l'intégrale J, ce qui entraîne l'augmentation de l'énergie de rupture.

- Le patch diminue la valeur du facteur d'intensité de contrainte et l'intégrale  $J$  impliquant l'amélioration de la réparation,
- L'augmentation de la taille de la fissure augmente les valeurs du FIC et de l'intégrale  $J$ , tandis que l'application du patch diminue clairement ces valeurs ; ceci prouve l'efficacité de cette méthode,
- L'épaisseur du patch et de la colle adhésive utilisée doit être optimisée car il existe des valeurs critiques au-delà desquelles l'augmentation de ces paramètres est inutile puisqu'il faut que les contraintes soient transmises vers le patch, et aussi pour éviter la rupture de l'adhésif en raison de l'augmentation des contraintes dans la couche adhésive.