

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

Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de diplôme

Master

En

« Génie Mécanique »

Option :

« Construction mécanique »

Titre :

**Comportement des pipelines sous pression interne réparés par
matériaux composites**

Réalisé par :

SADOU Samia

Encadré par :

Dr. MEHDI Ghalem

Année Universitaire 2019/2020

REMERCIEMENT

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Nous adressons nos sincères remerciements, reconnaissances et gratitude à tous nos enseignants, et en particulier le directeur de ce mémoire monsieur MEhdi Ghalem, pour ses précieux conseils, et sa disponibilité.

Nous n'oublions pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous mes proches et amis.

DEDICAS

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et
leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement,

A mes Amis

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien
infaillible,

A tous les gens m'aiment

Merci d'être toujours là pour moi.

Sadou samia

Résumé :

Dans cette étude, la méthode des éléments finis est utilisée pour analyser les performances de la réparation d'un patch en composite collé sur un pipeline en acier fissuré, Une analyse paramétrique a été réalisée afin de mettre en évidence les effets des propriétés géométriques sur l'efficacité de la réparation. La méthode de conception expérimentale est utilisée pour explorer les effets des dimensions du patch (longueur, angle et épaisseur).

on va utiliser l'analyse par éléments finis tridimensionnelle sur (ANSYS Workbench) pour étudier les effets de plusieurs paramètres sur l'efficacité de cette réparation

Cette optimisation peut aider les concepteurs du patch en composite à améliorer les performances de réparation et de réhabilitation.

MOTS CLÉS. Mécanique de la rupture, Fissure, Composite, patch, Pipelines.

Abstract:

In this study, the finite element method is used to analyze the repair performance of a composite patch bonded to a cracked steel pipeline, a parametric analysis was carried out to highlight the effects of geometric properties on the efficiency of the repair, the experimental design method is used to explore the effects of patch dimensions (length, angle and thickness).

we will use the three-dimensional finite element analysis on (ANSYS Workbench) to study the effects of several parameters on the effectiveness of this repair

this optimization can help the designers of the composite patch improve repair and rehabilitation performance.

KEYWORDS. Fracture mechanics; Rift; Composite; patch; Pipelines

مخلص

يقدم هذا العمل دراسة سلوك خطوط الأنابيب تحت الضغط الداخلي التي تم إصلاحها بواسطة مواد مركبة لقد استخدمنا عدة طرق للعناصر المحدودة لتحليل أداء التصحيح المركب المرتبط بخط أنابيب الصلب المكسور. أجرينا أيضًا تحليلًا معياريًا لتوضيح تأثيرات خصائص التكنولوجيا على كفاءة الإصلاح. تستخدم طريقة التصميم التجريبي لاستكشاف آثار أبعاد الرقعة (الطول والزاوية والسمك)

سيتم استخدام تحليل العناصر المحدودة ثلاثي الأبعاد في ورشة عمل ANSYS Workbench لدراسة تأثير العديد من العوامل على كفاءة هذا الإصلاح، وسيساعد هذا التصميم على تجديد المركب وتحسين الأداء.

كلمات المفتاح. ميكانيك الكسر. التشقق. مركب. اللاصق المركب. خطوط الأنابيب

Nomenclature :

KI, KII, KIII: Facteurs d'intensités de contraintes en mode I, II, et III.

σ_{ij} : coefficient de Kronecker

$\sigma_r \sigma_\theta$: Contraintes normales en coordonnées polaires

u : Module de cisaillement

G : taux de restitution de l'énergie

ξ : Déformation

E : Module de Yong

μ : Module de cisaillement

ν : Coefficient de poisson

α : Coefficient de correction géométrique

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I.....	2
Généralités sur la mécanique de la rupture et l'application de la MEF	2
I.1 Introduction.....	Error! Bookmark not defined.
I.2 Mécanique linéaire et non linéaire de la rupture	2
I.3 Mécanismes et modèles de fissuration.....	2
I.4 Mécanismes et modes de rupture	3
I.5 Singularité des contraintes en pointe de fissure, ténacité.....	5
I.6 Description énergétique (globale) et singularité (locale)	6
I.7 Enfoncements	Error! Bookmark not defined.
I.8 Les éraflures	8
I.9 Endommagement combiné (éraflure+ enfoncement)	8
I.10 Phénomène de la corrosion	9
I.11 Calcul numérique des facteurs d'intensité de contraintes	10
I.11.1 La méthode des éléments finis pour les structures fissurées	10
I.11.2 Evaluations des facteurs d'intensité de contraintes par extra pulation	12
I.11.3 Eléments finis spéciaux.....	13
I.11.4 Calcul numérique du taux de restitution d'Energie	15
I.11.4.1 Avantages des méthodes numériques fondées sur l'approche énergétique	16
I.12 Les méthodes de calcul du facteur d'intensité et de L'intensité de contraintes en trois dimensions.....	17
I.12.1 Travaux de Kobayashi & al	17
I.12.2 Travaux de Bergman	18
I.13 : Méthode des éléments finis en élasticité linéaire	20
I.14 Modélisation de la singularité.....	21
I.14.1 Élément au quart de nœud.....	21
I.15 Conclusion	22
Chapitre II	23
Généralités sur les matériaux composites	23
II.1 Introduction.....	24
II.2 Qu'appelle-t-on matériaux composites ?.....	24
II.3 La microstructure des composites : renforts et matrice	26

II.3.1 Géométrie des renforts.....	26
II.3.2 Renforts et propriétés mécaniques	27
II 3.3 Le rôle des interfaces.....	29
II.4 La structure des pièces composites : tissus, stratifiés.....	30
II.4.1 Composites tissés	30
II.4.2 Définition et type des composites	31
II.5 Applications des matériaux composites.....	34
II.5.1 Industrie aérospatiale	35
II.5.2 Industrie des transports terres très et maritime.....	36
II.5.3 Industrie des articles des ports et de loisir	37
II.6. Conclusion.....	38
Chapitre III	39
Technologie de réparation par patches collées	39
III.1 Introduction	39
III.2 Règles de sécurité pour les canalisations de transport de gaz en Algérie	39
III.2.1 Emplacements des canalisations.....	39
III.2.2 Pression maximale de service des éléments des ouvrages de transport	40
III.3. Réparation des pipelines par patch en composite.....	41
III.3.1 A Réparation par collage	42
III.3.1 B. Système de réparation par renforcement des fibres composites.....	43
III.3.2 Autres méthodes de réparation des pipelines.....	45
III.4 La réparation et / ou le renforcement par composite	49
III.4.1 Dans le domaine spatial.....	51
Chapitre IV	39
Analyse d'une pipe fissurée et réparée par patch en composite.....	39
IV.1. Introduction.....	54
IV.2. Modèles géométriques	55
IV.3. Conditions aux limites et chargement	55
IV.4. Maillage.....	56
IV.5. Analyses et résultats.....	57
IV.5.1. Effets de la géométrie de la fissure	57
IV.5.1.2. Effet de la longueur et de la profondeur de la fissure sur la variation du KI	65
IV.6 Conclusion	67
Conclusion générale	68

Liste de figure :

Figure I.1 : Champ de Contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure selon	3
Figure I.2 : Différents Modes de rupture	4
Figure I.3: et Soudure de rabotage longitudinale dans une canalisation	4
Figure I.4: Fissure dans des joints soudés	5
Figure I.5 : Géométrie locale au voisinage de la pointe de fissure ; notation	6
Figure I.6 : Géométrie d'un enfoncement et photo d'un pipeline enfoncé	7
Figure I.7: engins provoquant une éraflures et géométrie d'une éraflure	8
Figure I 8 : Dispositif de la protection cathodique des canalisations L'étude fondamentale	9
Figure I 9 : Dispositif de la protection cathodique des canalisations	9
Figure 1.10: Maillage avec « double nœuds »	11
Figure 1.11: Notations pour le calcul de K_I , K_{II} par extrapolation au nœud double (B^+, B^-)	12
Figure 1.12: Interpolation unidimensionnelle sur trois nœuds ($\{A, B, C\}$ ou $\{A^\pm B^\pm C^\pm\}$) avec nœud (B ou B^\pm) au quart.	14
Figure I.13. Exemple d'un défaut semi-elliptique dans un cylindre pressurisé	17
Figure I.14. Exemple d'un dimensionnement de fissure semi elliptique (cas de $a/c=1$), suivant le l'étude de « BERGMAN ».	19
Figure I.15. Rayon intérieur « R » de tube cylindrique étudié par « BERGMAN ».	19
Figure I.16. Pression uniforme	20
Figure I.17. Pression linéaire	20
Figure I.18 : Elément au quart de nœud.	21
Figure II.1 : Quelques applications des matériaux composites : (a) un catamaran, (b) le support de la charge utile d'Ariane 5 (image [1]), (c) des skis de compétition (image de Thomas Grollier).	24
Figure II.2 : Exemples de multi-matériaux : (a) un composite carbone/époxy, (b) un béton armé, (c) du bois vu au microscope optique, (d) une lame d'acier de Damas (image de Ralf Pfeiffer).	25
Figure II.3: Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.	27
Figure II.4. les trois types de renfort	28
Figure II.5 : Les constituants d'un béton armé :	28

Figure II.6 Le rôle de l'interface sur la ténacité des composites : Lorsqu'une fissure atteint l'interface (a), elle est déviée (b).	29
Figure II.7: Structure d'un composite tissé : fibres (regroupées en fils) et matrice (intra- et inter-fils).	30
Figure II.8 Exemples de tissus plans courants. Image	31
Figure II.9 : Pli unidirectionnel (a) et pli tissé (b)	32
Figure II 10 : Composite unidirectionnel	32
Figure II 11 : Composite stratifié croisé.	32
Figure II.12 : Différents types d'armatures de tissu.	33
Figure II.13 : Tarifés selon les angles d'orientation.	33
Figure II.14 : Composite hybride.	34
Figure. II 15: Répartition des matériaux composites dans l'A380.a) source Airbus) et Dans le B787. B), source Boeing)	36
Figure III.1 : Réparation par composites d'une pipe en acier	42
Figure III.2 : Emballage de composite flexible pour la réparation sous – marine	43
Figure III.3 : réparation par renforcement composite type clockspring	44
Figure III.4 : Méthode de meulage, (a) défaut de fissure, (b) réparation par meulage, (c) structure après réparation	45
Figure III.5 : perçage au fond de la fissure	46
Figure III.6 : Dimensions géométrique de la fissure et trou de réparation	46
Figure III-7 : Géométrie de demi-coquilles	47
Figure III.8 changement du tronçon endommagé d'une canalisation, (a) découpe, Ré-soudage	48
Figure III-9: La coiffe d'Ariane 5	48
Figure III- 10: Capacité haute pression titane	51
Figure III-11: Bouteille haute pression matériaux composites fibre carbone	51
Figure. IV.1 : Modèle géométrique dans ANSYS Workbench 16.2	55
Figure. IV. 2 : Conditions aux limites appliquées sur la pipe	56
Figure. IV.3 : Modélisation par éléments finis de la pipe fissurée	56
Figure. IV.4 : Pipe avec une fissure semi-elliptique	57
Figure. IV.5: Le fond d'une fissure de forme semi-elliptique sous ANSYS Workbench	57
Figure. IV.6 : Distribution des contraintes de Von-Mises au voisinage de la fissure	58
Figure. IV. 7 : Distribution du FIC KI au fond de la fissure	59

Figure. IV.8 : Distribution du FIC KI au fond de la fissure pour les cinq angles α	60
Figure. IV. 9 : Distribution du FIC KII au fond de la fissure	60
Figure. IV. 10 : Distribution du FIC KII au fond de la fissure pour les cinq angles α	61
Figure. IV. 11 : Distribution du FIC KIII au fond de la fissure	62
Figure. IV. 12 : Distribution du FIC KIII au fond de la fissure pour les cinq angles α	62
Figure. IV. 13 : Effet de l'orientation de la fissure sur les FIC pour les cinq modèles analysés	64
Figure 14 : Distribution du FIC KI au fond de la fissure en fonction de sa longueur c	66
Figure IV 15 : Distribution du FIC KI au fond de la fissure en fonction de sa profondeur a	66
Figure IV 16 : effet de la longueur de la fissure sur les niveaux du FIC KI	67
Figure IV 17 : effet de la profondeur de la fissure sur les niveaux du FIC KI	67

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Les pipelines sont depuis des décennies le moyen d'acheminement le moins coûteux et le plus sûr pour de grandes quantités et sur de longues distances de fluide notamment le pétrole, le gaz. Etant enterrés sous terre ou en mer, ils sont le plus souvent exposés à des risques d'endommagement causés par des agressions internes et externes à savoir la corrosion, les enfoncements, les fissures, les éraflures, l'érosion...etc. Ce qui peut altérer leurs performances voir entraîner de graves conséquences environnementales s'ils ne sont pas assez tôt détectés.

Le but de notre étude est d'examiner la loi de fissuration en trois dimensions d'un pipeline sous pression interne par la méthode d'éléments finis, on utilise pour cela un code spécial « ANSYS, workbench »

La présentation de ce travail est organisée autour de quatre chapitres ; Le premier chapitre on a essayé de donner quelques généralités sur la mécanique de la rupture et l'application de la MEF. Le deuxième chapitre est consacré à la généralité sur les matériaux composites. Le troisième chapitre, on a essayé de donner Technologie de réparation par patches collées, Au quatrième chapitre, la simulation de la fissure de pipeline considérée. Des résultats ont été obtenus le long du front de la fissure. Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale qui résume tout le travail.

Chapitre I

Généralités sur la mécanique de la

I.1 Introduction

La mécanique de la rupture cherche à spécifier une propriété du matériau qui peut se caractériser par sa résistance à la rupture fragile. Les structures sont calculées de telle façon que les contraintes maximales ne dépassent pas la limite d'élasticité du matériau. Elles ne sont pas automatiquement à l'abri d'une ruine par rupture de type fragile, que ce soit à partir d'une fissure à la mise en service ou bien par fatigue.

Ce chapitre donne un aperçu sur les différentes notions de la mécanique de la rupture et l'application de la méthode des éléments finis nécessaire à cette étude [1].

I.2 Mécanique linéaire et non linéaire de la rupture

La rupture de type fragile apparaît quand les sollicitations existent dans des actions à des vitesses importantes des efforts et des endommagements préexistants ou créés pendant le service.

La rupture fragile correspond au manque de ductilité du matériau sous à un chargement thermique.

La rupture ductile accidentelle, pour une déformation plastique très faible, il n'y a pas de relation directe entre la ténacité et la température. La rupture maximale est reliée à la propagation imminente d'une fissure [1].

I.3 Mécanismes et modèles de fissuration

Afin de prévoir la rupture des pièces mécaniques sollicitées en fatigue, beaucoup de laboratoires ont tenté, au moins pour des raisons pratiques, d'établir des lois empiriques de fissuration, utilisées au bureau d'étude.

Si les mécanismes propres à la fatigue commencent à peine d'être connus, l'influence de certains paramètres sur la vitesse de fissuration est généralement mieux définie. Nous pouvons les classer en deux catégories :

- Les paramètres intrinsèques qui dépendent du matériau lui-même. Module de Young, Limite d'élasticité, propriétés cycliques et état métallurgique du matériau.

Matériau étudié, température, environnement, dimension de l'éprouvette, rapport d

- Les paramètres extrinsèques qui dépendent des conditions de l'essai, quel que soit le charge R, etc. [2].

I.4 Mécanismes et modes de rupture

Nous nous intéressons aux champs de déplacement et de contrainte au voisinage du front de fissure. Nous plaçons un repère dont l'origine se trouve sur un point O du front de fissure (Figure I.1). À ce repère orthogonal, on associe également un système de coordonnées polaires (r, θ).

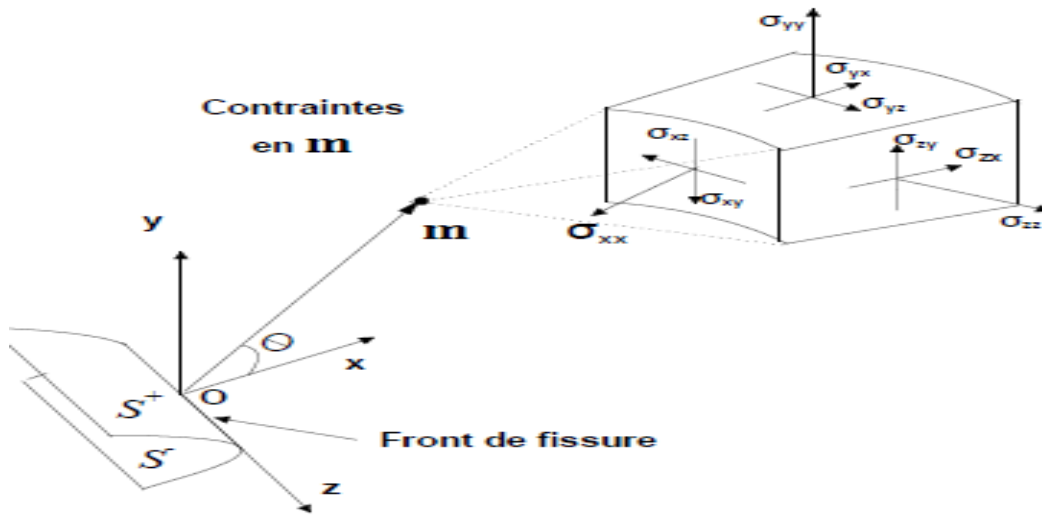


Figure I.1 : Champ de Contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure selon [2].

Les contraintes et les déformations au voisinage d'une fissure admettent un développement Asymptotique dont le terme singulier s'écrit :

$$\sigma_{ij} = \frac{k_\alpha}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^\alpha(\theta) \tag{I.1}$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{k_\alpha}{\sqrt{2\pi r}} g_{ij}^\alpha(\theta) \quad \alpha = I, II, III \tag{I.2}$$

Avec : f_{ij} fonction adimensionnelle et r, θ les coordonnées polaires en fond de fissure Localement, la rupture est caractérisée par la séparation irréversible d'un milieu continu (S)En deux parties distinctes, S^+ et S^- . Elle se produit selon l'un des trois modes élémentaires Décrits ci-dessous [2].

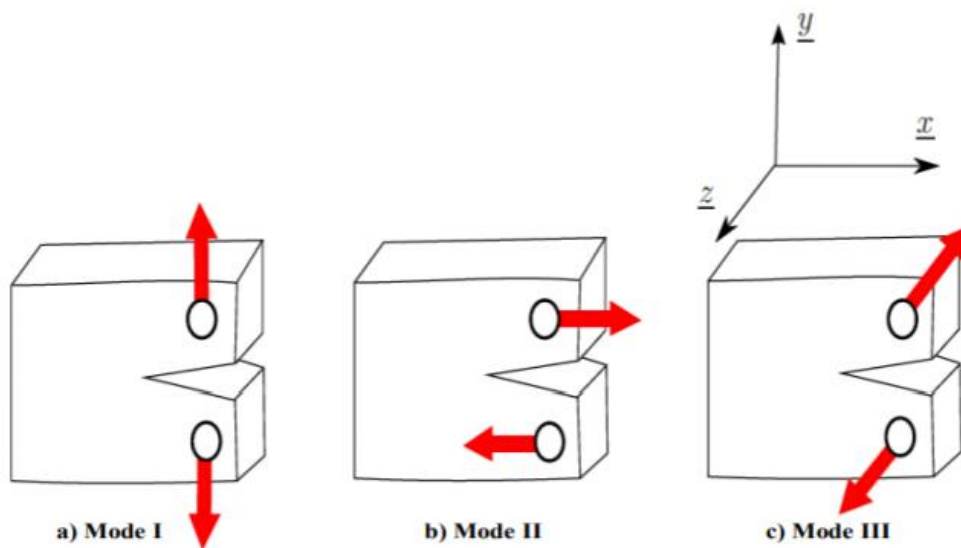


Figure I.2 : Différents Modes de rupture [3].

- **Mode I (mode par ouverture):** les lèvres de la fissure se déplacent dans des directions opposées et perpendiculairement au plan de fissure.
- **Mode II (cisaillement plan):** les lèvres de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de fissure.
- **Mode III (cisaillement anti-plan) :** les lèvres de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure [3].

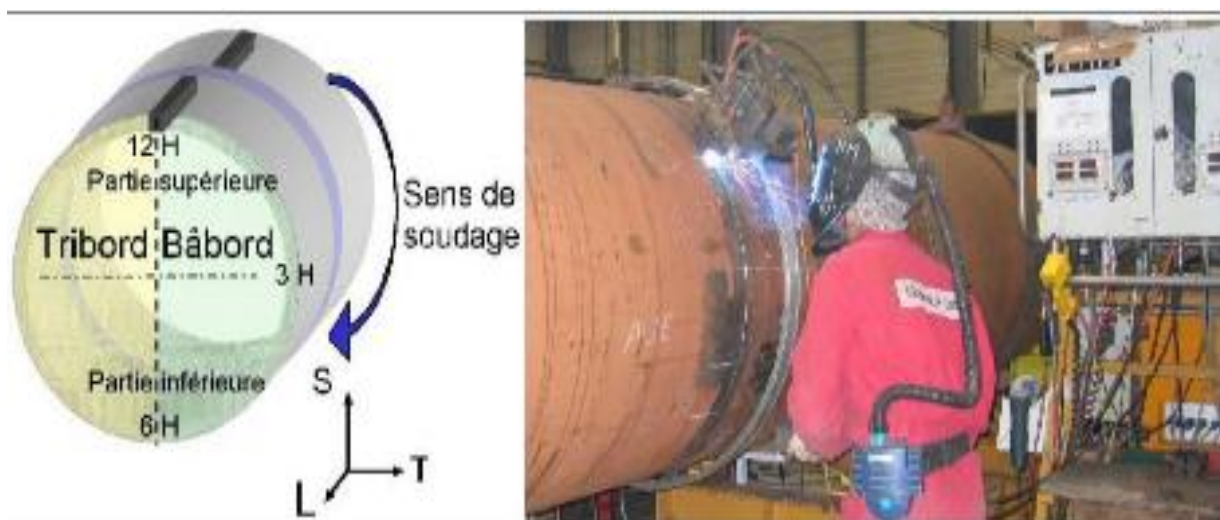


Figure I.3: et Soudure de raboutage longitudinale dans une canalisation [4].

Les soudures longitudinales réalisées lors du formage du tube en usine sont considérées comme moins critiques vis-à-vis de la rupture de la canalisation, car elles sont contrôlées avant de transférer les tubes sur chantier. Par contre, les soudures réalisées sur chantier (soudage bout à bout) peuvent présenter des fissures car elles sont parfois réalisées dans des conditions difficiles. De plus, elles ne sont pas forcément contrôlées. Les défauts rencontrés dans les joints soudés sont généralement assimilés à des fissures, comme celles résultant d'un manque de pénétration de la matière (voir figure I.4) [4].

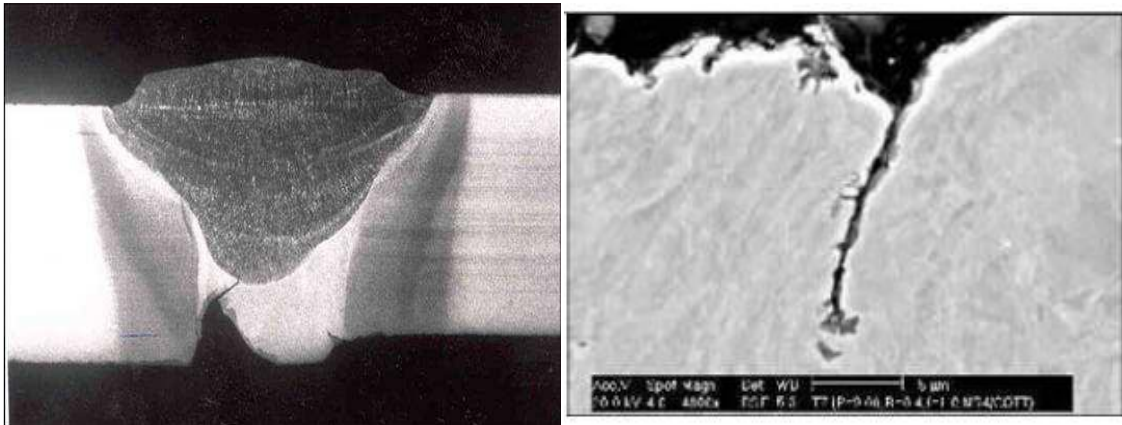


Figure I.4: Fissure dans des joints soudés [4]

I.5 Singularité des contraintes en pointe de fissure, ténacité

Comportement singulier en pointe de fissure et facteurs d'intensité de contraintes pour un matériau à comportement élastique linéaire. On démontre que les champs de contrainte en un point de coordonnées polaires (r, θ) dont l'origine est placée en point de fissure (la direction $\theta = 0$ correspondant à la tangente à la fissure en sa pointe) ont, au voisinage de la (c'est-à-dire pour r petit devant la longueur ℓ de la fissure), la forme asymptotique suivante : point

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{k_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left[5 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + \frac{k_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left[-5 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + 3 \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + O(1) \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{k_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left[3 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + \frac{k_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left[-3 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - 3 \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + O(1) \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{k_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left[\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + \frac{k_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left[\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + 3 \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + O(1) \quad (I.3) \end{aligned}$$

(Restreint ici au cas des déformations planes) et sont donc en particulier comme $1/\sqrt{r}$. Les facteurs d'intensité des contraintes k_I, k_{II}, k_{III} apparaissant dans ces expressions dépendent de la géométrie du domaine et de la fissure ainsi que du chargement appliqué, en nature et en intensité.

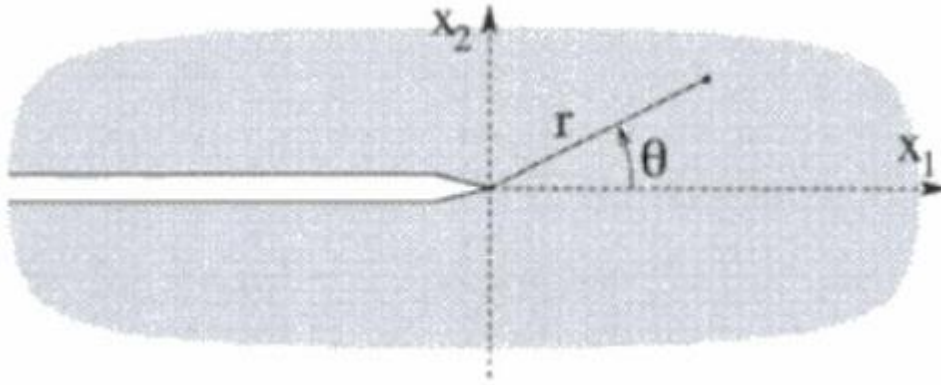


Figure I.5 : Géométrie locale au voisinage de la pointe de fissure ; notation

De même, la discontinuité (vectorielle) de déplacement à la traversée de la fissure et au voisinage du point est donné par l'expression asymptotique

$$[u] = \frac{4}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \{ (1 - \nu) [k_I e_1 + k_{II} e_2] + k_{III} e_3 \} + O(r) \quad (I.4)$$

Dans ces expressions asymptotiques, la notation $O(r^\alpha)$ indique. Conformément à l'usage, des termes non spécifiés d'ordre α pour r petit.

Ténacité. Dans le cas d'une propagation de fissure selon un mode donné (par exemple en mode I d'ouverture, habituellement considéré comme le plus dangereux), le critère de propagation proposé par Irwin en 1957 porte sur la limitation de la valeur de k_I par une valeur critique appelée ténacité :

$$\begin{cases} \text{si } k_I < k_{Ie} \text{ alors } \dot{a} = 0, \\ \text{si } k_I = k_{Ie} \text{ alors } \dot{a} \geq 0 \end{cases} \quad (I.5)$$

La ténacité k_{Ie} étant alors une grandeur caractéristique du matériau, accessible à l'expérience, que l'on mesure sur des expériences de traction d'éprouvettes de rupture ou de flexion de poutres entaillées, la validité de la notion de ténacité, assez problématique sur le plan théorique car la singularité des solutions élastiques en contrainte implique l'apparition de zones plastiques autour des pointes de fissure, est bien vérifiée sur le plan expérimental pour certaines classes de matériaux (en particulier les métaux).

I.6 Description énergétique (globale) et singularité (locale)

Dans le cadre de l'élasticité linéaire quasi-statique et des petites perturbations, le taux de restitution d'énergie G et les facteurs d'intensité de contraintes associés à une pointe de fissure sont reliés par la formule d'Irwin (ici restreinte au cas des déformations planes)

$$G(s) = \frac{1-\vartheta^2}{E} (k_I^2 + k_{II}^2) \quad (I.6)$$

Cette relation établit en particulier un lien entre la ténacité k_{Ic} associée à la propagation en Mode I (d'ouverture) pur et le taux de restitution d'énergie critique G_c : [5]

$$G_c = \frac{1-\vartheta^2}{E} k_{Ic}^2 \quad (I.7)$$

I.7 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 : le godet d'un engin en travaux pour les canalisations enterrées ou posées par terre, les ancrs des 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 de tuyau par rapport à son diamètre initial (voir Figure I.6).

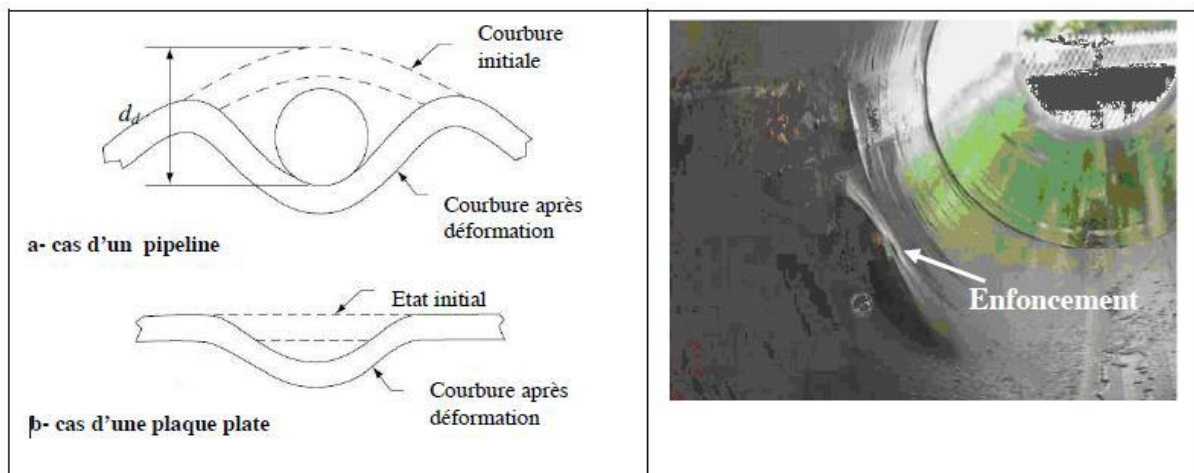


Figure I.6: Géométrie d'un enfoncement et photo d'un pipeline enfoncé [6]

Un enfoncement provoque une concentration locale de contrainte et de déformation et une réduction locale du diamètre du tuyau [6]. La présence des enfoncements dans les tuyaux peut se résumer au cas suivant :

- Indentation lisse (Plain dent) : ce type d'enfoncement correspond à celui où il n'y a pas de réduction de l'épaisseur de la paroi du tube.
- Indentation pliée (Kinked dent) : C'est un enfoncement qui provoque un changement brusque de la paroi du pipeline.

- Indentation dans des soudures : Cette configuration traduit la combinaison d'un enfoncement et d'un autre défaut car les soudures sont susceptibles de présenter des fissures....

I.8 Les éraflures

Une éraflure est un endommagement superficiel de la surface due à un contact avec un objet étranger qui provoque un enlèvement de matière (Figure I.7). Cette éraflure peut être considérée comme une entaille. Les dimensions d'une éraflure sont définies de façon que la longueur soit plus grande que la largeur.

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. [7]

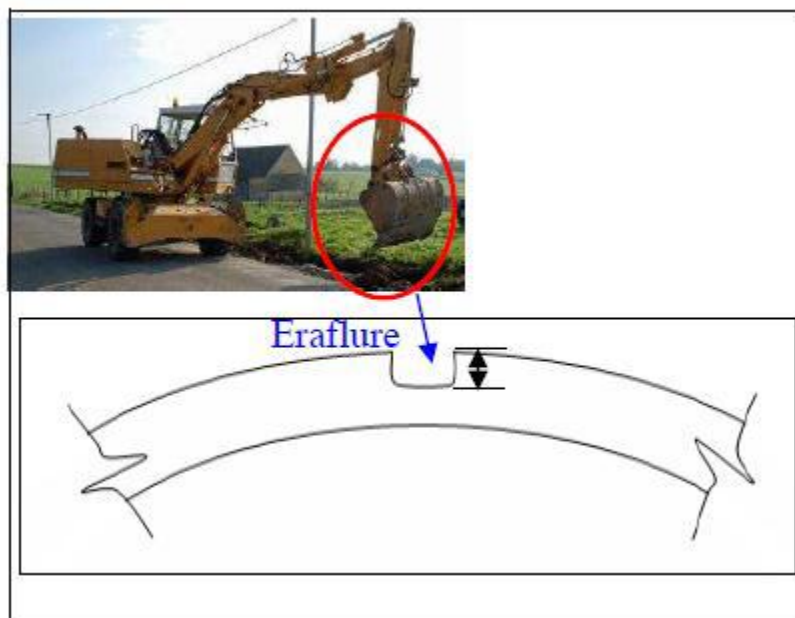


Figure I.7: engins provoquant une éraflures et géométrie d'une éraflure [7]

I.9 Endommagement combiné (éraflure+ enfoncement)

Ce type d'endommagement est très dangereux car il résulte de la concentration des contraintes Provoquée par l'agression externe (enfoncement) et la réduction de l'épaisseur du pipeline(Éraflure) qui engendre une diminution locale de la résistance mécanique. En conséquence, Il est constaté une diminution locale de la résistance mécanique de la canalisation.

I.10 Phénomène de la corrosion

Généralement la corrosion est très présente sur les canalisations métalliques, elle représente processus de dégradation des métaux et alliages faisant intervenir au moins tout partiellement, La composition chimique de leur environnement (figure I.8) En d'autres termes, on peut dire que la corrosion d'un métal est la destruction de celui-ci sous l'effet de réactions chimiques Ou électrochimiques, lorsqu'il est en contact avec un électrolyte. Elle correspond donc au Retour de la matière à son état le plus stable. Dans le cas du fer par exemple, la forme stable Dans la nature n'est pas le métal mais l'oxyde. C'est pourquoi une pièce en acier exposée sans Protection à une atmosphère humide tend à se transformer en rouille (oxyde de fer hydraté). Figure I.8: agressions corrosives sur la paroi externe d'une canalisation métallique.

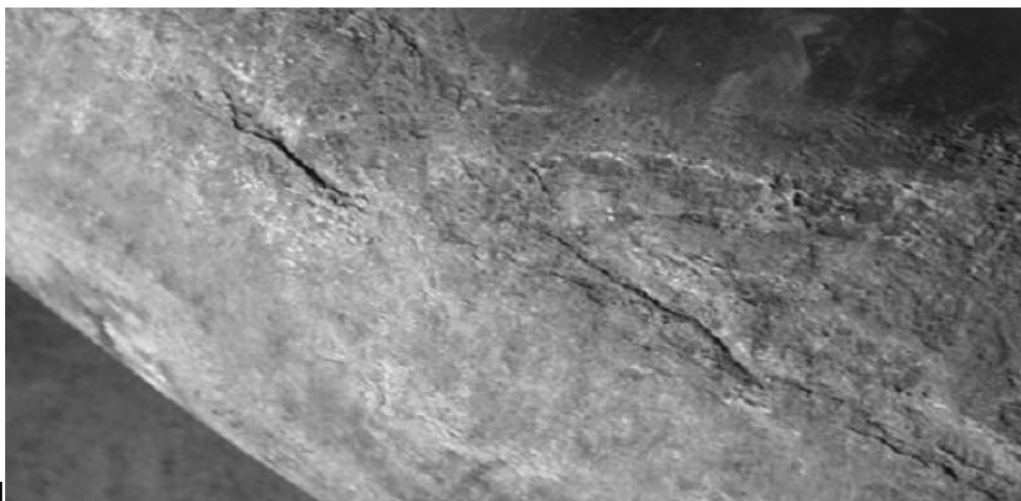


Figure I 8 : Dispositif de la protection cathodique des canalisations L'étude fondamentale [8]

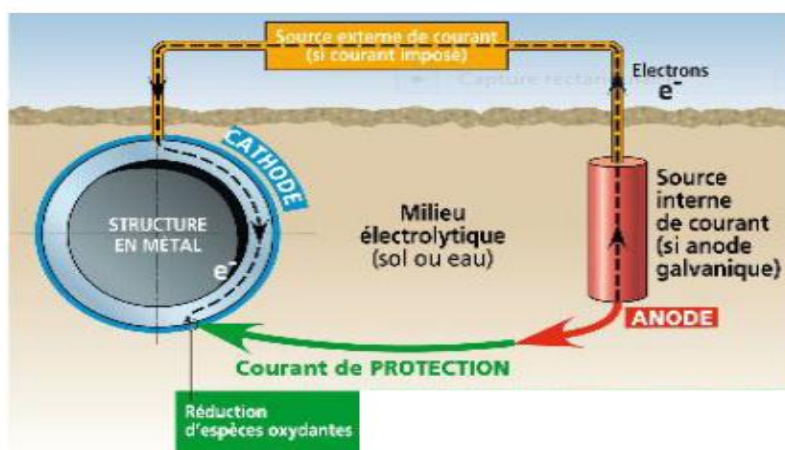


Figure I.9 : Dispositif de la protection cathodique des canalisations

L'étude fondamentale des phénomènes de corrosion relève essentiellement de l'électrochimie. La corrosion des matériaux métalliques est électrochimique par nature peut se définir aussi

Chapitre I: Généralités sur la mécanique de la rupture et l'application de la MEF

Comme la destruction d'un métal par le biais de réactions de transfert d'électrons. Ce type de Corrosion se produit uniquement dans les conditions typiques d'une cellule électrochimique :

- Présence d'une anode et d'une cathode ; la connexion entre l'anode et la cathode

Permettant le transfert des électrons,

- La présence d'une solution électrolytique qui déplacera les ions entre l'anode et la

Cathode.

Pour protéger les pipelines contre la corrosion externe, l'acier est recouvert d'un revêtement Isolant et est relié à des appareils spéciaux appelés redresseurs utilisés pour la protection Cathodique [9]. De minuscules arrachements du revêtement des pipelines non détectés lors D'inspection peuvent avoir lieu, puisque ceux-ci sont habituellement enfouis sous terre où Posés sur le plancher marin, mettant l'acier des pipelines en contact avec le sol, l'eau ou l'air Humide le soumettant ainsi à la corrosion.

Cette réaction électrochimique peut être inhibée en maintenant l'acier des pipelines au pôle Négatif (cathode) par rapport au sol environnant (anode). Pour ce faire, il suffit de brancher le Pôle négatif d'une alimentation électrique en courant continu sur le pipeline et le pôle positif Aux dispositifs à anode installés dans le sol de sorte que les courants électriques circulent de L'anode au pipeline.

Dans ce dispositif, le pipeline est la cathode du circuit, ce qui a donné son nom à la méthode, De la « protection cathodique » figure I.9) [8].

I.11 Calcul numérique des facteurs d'intensité de contraintes

I.11.1 La méthode des éléments finis pour les structures fissurées

La modélisation d'un solide fissuré par la méthode des éléments finis obéit aux principes généraux développés. Il y a toutefois des considérations spécifiques importantes, qu'il convient de souligner.

Modélisation du saut de déplacement à travers la fissure

En mécanique linéaire de la rupture, une fissure est modélisée, pour les problèmes plans considérés dans ce chapitre, par une ligne F à travers laquelle le champ de déplacement est discontinu.

Un modèle construit par la méthode des éléments finis devra donc reproduire cette condition.

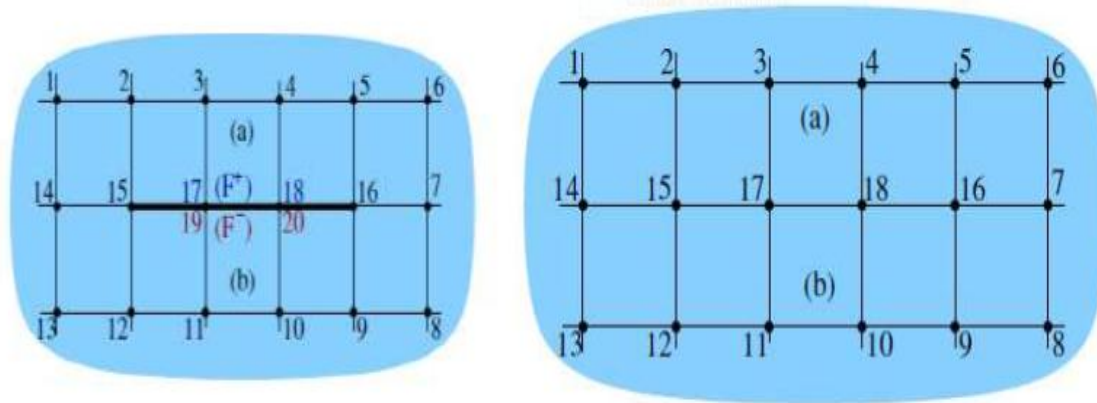


Figure : I.10: Maillage avec « double nœuds »

Les fonctions de base de la méthode des éléments finis sont par construction continues Sur l'ensemble du domaine approché Ω_h . Par conséquent, une fissure ne pourra pas traverser des éléments ; la courbe F devra coïncider avec des frontières d'éléments finis. De plus, il faut traiter les nœuds situés sur cette courbe comme des « nœuds doubles », Comme suggéré par la Figure I.10 ; cela revient à traiter le maillage du solide fissuré comme la situation limite du Maillage d'un solide contenant une cavité infiniment mince. Les nœuds, éventuellement géométriquement confondus, relatifs aux deux lèvres de la fissure doivent porter des numéros distincts. Les fonctions de base construites sur un tel maillage sont alors automatiquement discontinues à travers F.

Convergence, raffinement en pointe de fissure :

Le caractère singulier en pointe de fissure de la solution élastique en déformation et en contrainte modifie les propriétés de convergence de la solution approchée vers la solution exacte. Alors, la modélisation d'un solide fissuré Nécessite ainsi, pour obtenir une précision raisonnable, des aménagements spécifiques, tels que :

- (a) Maillage très raffiné au voisinage de la pointe de fissure, afin d'améliorer la représentation De champs par les fonctions de base usuelles de la méthode des éléments finis ;
- (b) Création de nouveaux éléments finis, spécialement adaptés à la prise en compte de champs de déformations singuliers en $1/\sqrt{r}$ au voisinage de la pointe de fissure.

La discontinuité (vectorielle) de déplacement à la traversée de la fissure et au voisinage de la Pointe est donnée par l'expression asymptotique

$$\|\widehat{\xi}\| = \frac{4}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \{ (1 - \nu) [k_I e_1 + k_{II} e_2] + k_{III} e_3 \} + o(\rho) \quad (I.8)$$

Dans ces expressions asymptotiques, la notation $O(r^\alpha)$ indique, conformément à l'usage, des termes non spécifiés d'ordre r^α pour r petit.

I.11.2 Evaluations des facteurs d'intensité de contraintes par extra prolation

C'est la méthode la plus simple à mettre en œuvre. Elle consiste à exploiter directement les déplacements nodaux situés aux nœuds les plus proches d'une pointe de fissure, en les comparant à l'expression asymptotique (I.9) du saut de déplacement à travers la fissure. Par exemple (avec les notations de la figure 1.11), prenant sur les lèvres F_h^\pm de la fissure les Nœuds B^+ et B^- les plus proches de la pointe A, la formule (I. 9) suggère d'écrire :

$$K_I \approx \frac{E}{8(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{d}} \llbracket \xi(B) \rrbracket \cdot t, \xi \quad K_{II} \approx \frac{E}{8(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{d}} \llbracket \xi(B) \rrbracket \cdot n, \quad (I.9)$$

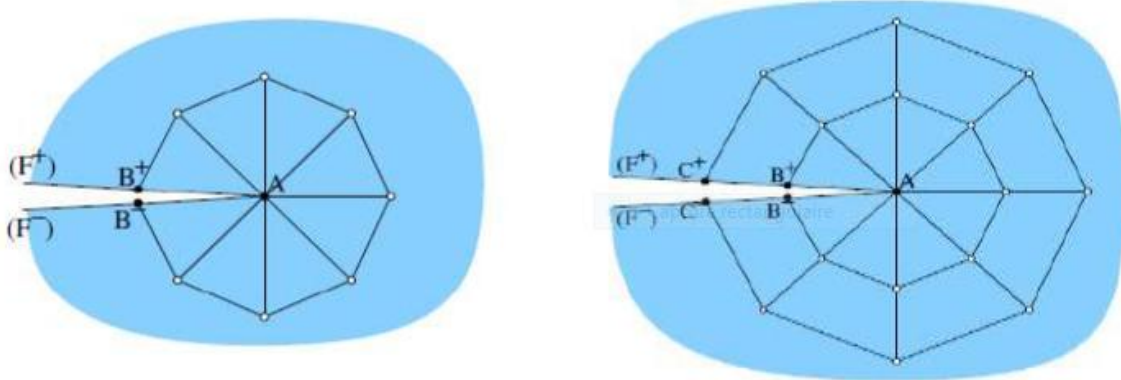


Figure I.11: Notations pour le calcul de K_I , K_{II} par extrapolation au nœud double (B^+, B^-)

Où t et n sont les directions tangente et normale à F en A , B est le lieu géométrique commun à B^+ et B^- et d est la distance de B à A . Ces formules nécessitent en pratique un maillage très Raffiné au voisinage de la pointe de fissure. Une variante de cette approche consiste à utiliser plusieurs nœuds doubles Successifs à partir de la pointe de fissure, et de considérer une approximation du saut de déplacement de la forme :

$$\llbracket \hat{\xi} \rrbracket = \sqrt{r} [\alpha t + \beta n] \quad (I.10)$$

Les constantes $\llbracket \hat{\xi} \rrbracket, \alpha, \beta$, sont alors recherchées par une méthode de moindres carrés, de façon à ce que la fonction s'approche au mieux des valeurs de saut de déplacement aux nœuds doubles. Les facteurs K_I, K_{II} sont alors approchés par les valeurs obtenues par identification avec le terme principal de la relation (I.11) :

$$K_I \approx \frac{\sqrt{2\pi E}}{8(1-\nu^2)} \alpha \quad K_I \approx \frac{\sqrt{2\pi E}}{8(1-\nu^2)} \beta \quad (I.11)$$

I.11.3 Éléments finis spéciaux

La technique d'extrapolation est simple à mettre en œuvre et repose sur l'utilisation d'éléments finis classiques, il est nécessaire d'utiliser un maillage très fin (donc avec des Éléments de très petite taille) au voisinage de la pointe de fissure pour obtenir des résultats d'une précision convenable. Cette contrainte résulte du fait que les fonctions d'interpolation des éléments finis ne sont pas adaptées à la représentation de champs de déplacement Conduisant à des déformations et contraintes singulières en pointe de fissure.

Une réponse à cette difficulté consiste en la définition d'éléments finis « spéciaux, spécifiquement adaptés à la représentation de tels champs. Il existe de nombreux procédés permettant de construire de tels éléments. On n'abordera ici que le procédé dit de l'élément Avec nœud au quart », qui se distingue par sa simplicité et le fait qu'il ne demande que des modifications minimales par rapport à l'approche « standard » de la programmation d'un élément fini.

Interpolation unidimensionnelle avec nœud au quart :

Sous sa forme la plus simple, la méthode de l'élément avec nœud au quart peut être présentée pour une seule dimension spatiale. Considérons pour cela trois nœuds alignés {A, B, C} dans la direction d'une fissure rectiligne (figure 1.12), A étant en pointe de fissure, de sorte que le segment $\Gamma = [A, C]$ corresponde à un côté d'élément fini associé à des fonctions D'interpolation du second degré par rapport à chaque coordonné paramétrique (pour les Problèmes plans considérés, il s'agit du triangle à six nœuds ou du quadrangle à huit ou neuf Nœuds).

Les traces des fonctions d'interpolation des éléments finis adjacents au segment Γ sont Alors les polynômes d'interpolations de Lagrange du second degré

$$N_A(a) = a(a-1)/2, \quad N_B(a) = 1-a^2, \quad N_C(a) = a(a+1)/2 \quad (I.12)$$

Où : $a \in [-1, 1]$ est la coordonné paramétrique servant à d'écrire Γ , les nœuds (A, B, C) étant associés à $a \in (-1, 0, 1)$ respectivement.

L'interpolation avec nœud au quart consiste tout simplement à placer le nœud Intermédiaire B au quart de la longueur de Γ et à utiliser l'interpolation quadratique standard (I.12). Avec ce choix de placement, et en choisissant l'origine en A, les abscisses des trois Nœuds sont

données par $x_a=0$, $x_b=d$, $x_c=4d$, d étant le quart de la longueur de Γ . La coordonné Physique X_1 de tout point de Γ est alors relié à la coordonné paramétrique a Par :

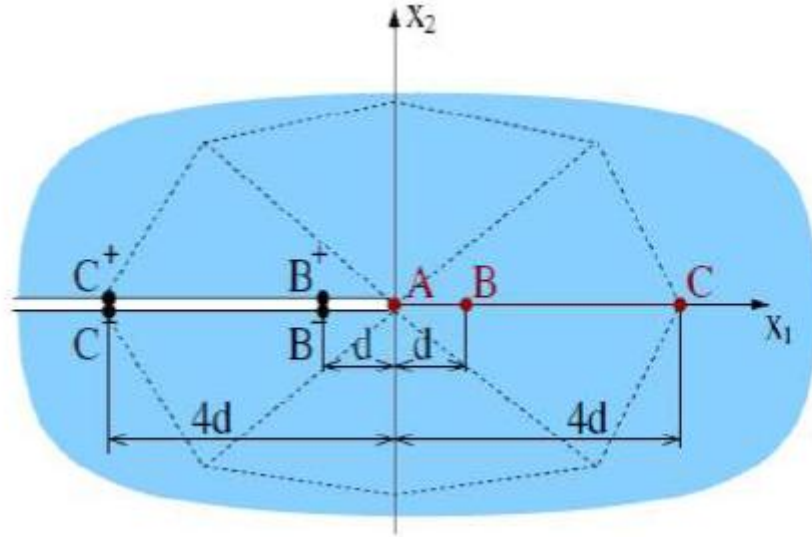


Figure I.12: Interpolation unidimensionnelle sur trois nœuds ($\{A, B, C\}$ ou $\{A^\pm B^\pm C^\pm\}$) avec nœud (B ou B^\pm) au quart.

$$\begin{aligned} X_1 &= N_A(a)X_A + N_B(a)X_B + N_C(a)X_C \\ &= 0 + d(1-a^2) + 2da(a+1) \\ &= d(a+1)^2 \end{aligned}$$

Soit :

$$a = \sqrt{\frac{X_1}{d}} - 1 \quad (0 \leq X_1 \leq 4d) \quad (\text{I. 13})$$

L'interpolation de valeurs modales, ξ_B, ξ_C aux nœuds de Γ conduit quant à elle à un

Déplacement interpolé donné par

$$\begin{aligned} \xi_h &= N_A(a)\xi_a + N_B(a)\xi_B + N_C(a)\xi_c \\ &= \frac{1}{2}(\xi_A, 2\xi_B, 2\xi_C) a^2 + \frac{1}{2}(\xi_C - \xi_A) a + \xi_B \end{aligned}$$

Exprimant ξ_h en fonction de x_l à l'aide de (I. 13), on obtient alors :

$$\xi_h(x_1) = \xi_{A+} \left[2(\xi_B - \xi_A) - \frac{1}{2} (\xi_C - \xi_A) \right] \sqrt{\frac{x_1}{d}} + \left[\frac{1}{2} (\xi_C - \xi_A) - \frac{1}{2} (\xi_B - \xi_A) \right] \frac{x_1}{d} \quad (I.13)$$

Le placement du nœud B au quart de la longueur de Γ a ainsi une conséquence Remarquable : Le déplacement interpolé obtenu, donné par (I.14), présente un gradient singulier comme $1/\sqrt{r}$ au voisinage de la pointe de fissure.

On peut procéder de même avec des nœuds alignés $\{A, B_{\pm}, C_{\pm}\}$ situés en regard sur les deux Lèvres F_{\pm} de la fissure, pour obtenir l'interpolation du saut de déplacement le long d'un segment adjacent à la pointe de fissure :

$$\|\xi_h\| = \left[2\|\xi_B\| - \frac{1}{2}\|\xi_C\| \right] \sqrt{\frac{x_1}{d}} + \left[\frac{1}{2}\|\xi_C\| - \|\xi_B\| \right] \frac{x_1}{d} \quad (I.14)$$

(On a bien sûr $[\xi_A] = 0$ en pointe de fissure).

L'évaluation numérique de K_I, K_{II} se fait alors par comparaison du coefficient en facteur De \sqrt{r} dans (I.14) ou (I.15) avec l'expression asymptotique de ξ ou $[\xi]$ Par exemple :

$$K_I \approx \frac{E\sqrt{2\pi}}{8(1-\nu^2)} \left[2\|\xi_B\| - \frac{1}{2}\|\xi_C\| \right] \sqrt{r} \quad (I.15)$$

I.11.4 Calcul numérique du taux de restitution d'Énergie

La notion de facteur d'intensité de contraintes est limitée à l'hypothèse de comportement élastique linéaire, tandis que celle de taux de restitution d'énergie est plus générale. Le critère énergétique est également plus intuitif du point de vue physique. Pour ces raisons, il est intéressant de construire une méthode de calcul du taux de restitution d'énergie qui ne fasse pas appel explicitement aux propriétés locales des champs telles que leur singularité en pointe de fissure.

Cette méthode consiste à dériver de l'énergie potentielle à l'équilibre dans une extension virtuelle de fissure. Pour éviter des développements trop longs, on ne traitera ici que le calcul de G aux extrémités d'une fissure rectiligne $F = F_{a,b} = [AB] = \{-a \leq X_1 \leq b, X_2 = 0\}$, basé sur

$$G_A = - \frac{\partial p}{\partial a}(a, b, \xi^D, T_D), \quad G_B = - \frac{\partial p}{\partial b}(a, b, \xi^D, T_D) \quad (I.16)$$

$$P(F, \xi^D, \underline{T}^D) = \frac{1}{2} \int \Omega(F) \underline{\underline{\xi}} : \underline{\underline{\xi}} : A : \underline{\underline{\xi}} : \underline{\underline{\xi}} dV = \int ST \underline{\underline{T}}^D \cdot \underline{\underline{\xi}} ds \quad (I.17)$$

$$\int \Omega \underline{\underline{\xi}} : \underline{\underline{\xi}} : A : \underline{\underline{\xi}} : \underline{\underline{w}} dV = \int \Omega \rho \underline{\underline{f}} \cdot \underline{\underline{w}} dS \quad \forall w \in C(0) \quad (I.18)$$

(formules (I.16) répétées par commodité), l'énergie potentielle à l'équilibre $P(ab\xi^o, T^o)$ étant donné par (I. 17), Le champ $\underline{\xi}$ solution du problème d'équilibre élastique pour la configuration considérée de fissure, est caractérisé par la formulation faible (I. 18), soit ici trouver $\xi \in C(\xi^D)$

$$\text{tel que } \int \Omega(F)\underline{\underline{\mathcal{E}}}[\underline{\xi}] : \underline{\underline{A}} : \underline{\underline{\mathcal{E}}}[\underline{v}] dv = \int ST\underline{\underline{T}}^D \cdot \underline{v} ds \quad (\text{I. 19})$$

Le principe du calcul de G exposé ci-après est cependant applicable à des situations plus Générales.

Tout champ de déplacement \underline{v} à l'équilibre en l'absence de forces de volume vérifie l'identité

$$\nabla \underline{v} : \underline{\underline{A}} : (\nabla \underline{v}, \nabla \underline{\theta}) - \frac{1}{2} (\nabla \underline{v} : \underline{\underline{A}} : \nabla \underline{v}) \text{div} \underline{\theta} = \text{div} (\nabla \underline{v} : \underline{\underline{A}} : (\nabla \underline{v}, \underline{\theta}) - \frac{1}{2} (\nabla \underline{v} : \underline{\underline{A}} : \nabla \underline{v}) \underline{\theta}) \quad (\text{I. 20})$$

$$G_B = \int \{ (\nabla \underline{\xi}, \nabla \underline{\theta}_B) : \underline{\underline{A}} : \nabla \underline{\xi} - \frac{1}{2} (\nabla \underline{\xi} : \underline{\underline{A}} : \nabla \underline{\xi}) \text{div} \underline{\theta}_B \} dv \quad (\text{I. 21})$$

Celle-ci, appliqué à l'expression (I.21) de G_B , permet de transformer l'intégrale sur la couronne C_B en Intégrale de contour par application de la formule de la divergence. On obtient

$$G_B = \int \eta \left\{ \frac{d\underline{\xi}}{dx_1} \cdot \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n} - \frac{1}{2} (\underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{\mathcal{E}}} [\underline{\xi}]) n_1 \right\} ds \quad (\text{I.22})$$

Où $\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{A}} : \underline{\underline{\mathcal{E}}} [\underline{\xi}]$ est la contrainte associée au déplacement solution l'intégrale sur le Contour Γ_1 est indépendante du choix du contour encerclant B ; on parle d'invariante intégrale de contour. Elle est connue sous le nom d'intégrale J de Rice.

I.11.4.1 Avantages des méthodes numériques fondées sur l'approche énergétique

Le calcul de G numériquement est plus lourd que celui des facteurs d'intensité de Contraintes par les méthodes d'extrapolation ou d'éléments spéciaux. Il nécessite de plus un effort de programmation plus important.

Cette approche présente cependant d'importants avantages, raisonnés sur un bilan énergétique présent un niveau de généralité qui dépasse largement le cadre de la mécanique linéaire de la rupture. En revanche, la notion de facteur d'intensité de contrainte n'est plus valable hors de l'élasticité linéaire.

Le fait d'avoir pu exprimer G en termes d'une intégrale sur une couronne évitant la pointe de Fissure permet de contourner les difficultés numériques liées à la singularité des déformations Et des contraintes en pointe de fissure [9].

Avec :

$\sigma_{\theta\theta}$: Contrainte de référence qui doit être définie pour chaque problème $H_k(\varphi)$: Facteur de correction de Kobayashi et al. $E(k)$: Intégrale elliptique complète du deuxième genre.

$(\cos^2\varphi + \frac{\alpha^2}{c^2}\sin^2\varphi)^{1/4}$: Facteur de forme pour une traction uniforme.

La contrainte de référence est souvent prise comme la contrainte circonférentielle $\sigma_{\theta\theta}$ sur le côté interne de la paroi. Dans un cylindre mince la contrainte circonférentielle résultant d'une pression interne (p) est approchée par les relations suivantes :

$$\sigma_{\theta\theta}(x) = 10,52 \cdot P \left(1 - \frac{1}{10,52} \frac{x}{c}\right) \quad (I.24)$$

$$\sigma_{\theta\theta}(x) = \sigma_{\theta\theta} \left(1 - 0,095 \frac{x}{c}\right)$$

P: pression interne. Avec

X : abscisse de l'intérieur de la paroi vers l'extérieur.

Ces auteurs concluent que le facteur d'intensité de contraintes résultant d'une pression Interne dans un cylindre fissuré est toujours maximal en surface. On doit noter que, Atluri & Kathiresan et Blackburn & Hellen ont étudié le même Problème que celui de Kobayashi & al sur des cylindres pressurisés épais et dans les Conditions suivantes : $t / R_{int} = 0,20$; $a/c = 1/5$ et $a/t = 0,80$.

Les résultats présentés par Kobayashi & al étaient de 45% inférieurs en surface ($\phi=90^\circ$) à Ceux de Atluri & Kathiresan et Blackburn & Hellen alors que l'écart était de 5% du point le plus profond ($\phi=0^\circ$). Le facteur de correction de Kobayashi & al $H(\varphi)$ est issu d'un calcul bidimensionnel, de ce fait il est naturel que les trois résultats soient très semblables au point le plus profond, et que la divergence augmente en surface quand la profondeur de fissure augmente ($a/t = 0,8$) [2].

I.12.2 Travaux de Bergman

Bergman a publié les résultats de facteur d'intensité de contraintes pour les fissures de surface semi-elliptique pour des cylindres de $R_i/t = 5$ et 10, ou R_i est le diamètre extérieur du cylindre et « t » c'est l'épaisseur (figure I.14). Il a utilisé son propre générateur de maillage avec le programme ABAQUS éléments finis. La courbe polynomiale d'ordre 6 est donnée par l'équation :

$$k_t(\varphi) = A_0 + A_1\left(\frac{2\varphi}{\pi}\right) + A_2\left(\frac{2\varphi}{\pi}\right)^2 + A_3\left(\frac{2\varphi}{\pi}\right)^3 + A_4\left(\frac{2\varphi}{\pi}\right)^4 + A_5\left(\frac{2\varphi}{\pi}\right)^5 + A_6\left(\frac{2\varphi}{\pi}\right)^6 \quad (I.25)$$

Chapitre I: Généralités sur la mécanique de la rupture et l'application de la MEF

Où les sept coefficients d'ajustement de la courbe sont A_0 à A_6 , et ϕ est l'angle de surface Frontale de la fissure voir (figure I.14) et (figure I.15), cet ajustement de la courbe Polynômiale est valable pour toutes les valeurs de la gamme $\phi : 0 \leq \phi \leq 2$

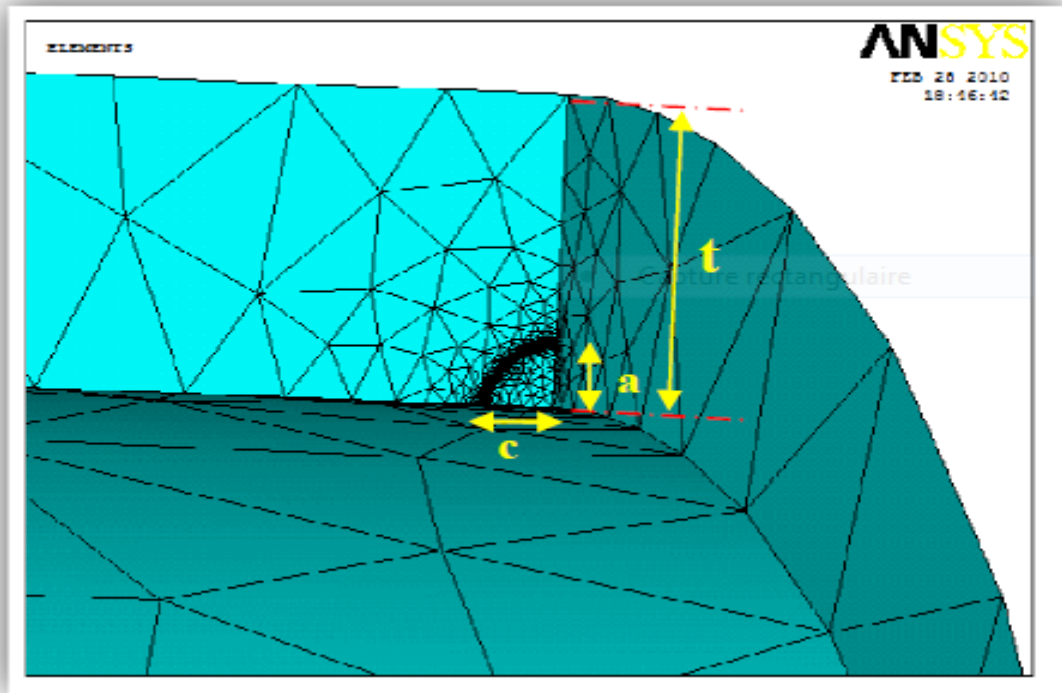


Figure I.14 : Exemple d'un dimensionnement de fissure semi elliptique (cas d' $a/c=1$), suivant le l'étude de « BERGMAN ».

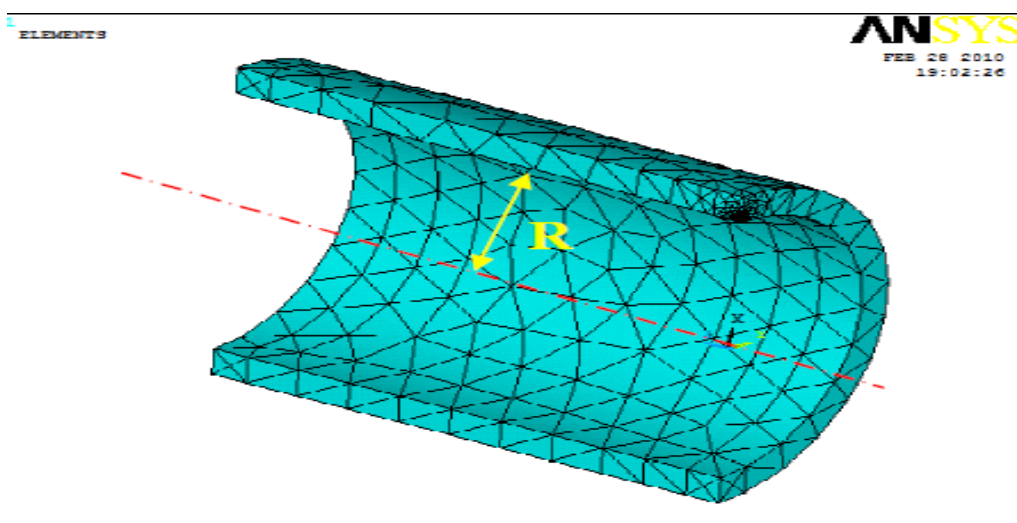


Figure I.15 : Rayon intérieur « R » de tube cylindrique étudié par « BERGMAN ».

Dans l'article de Bergman, la taille relative de la fissure a un rapport de (a/t) enseignant de 0,2 et 0,8, et le rapport (a/c) égale 1, 0,25, et 0,0625 pour accroître la longueur de la fissure. La charge appliquée sur la face de la fissure est une pression uniforme et un profil de pression linéaire voir (Figure I.16) et (Figure I.17). La pression appliquée sur la face de la fissure est donnée par l'équation : [2].

$$P(x) = p_0 \left(\frac{x}{\alpha}\right)^n \quad (I.26)$$

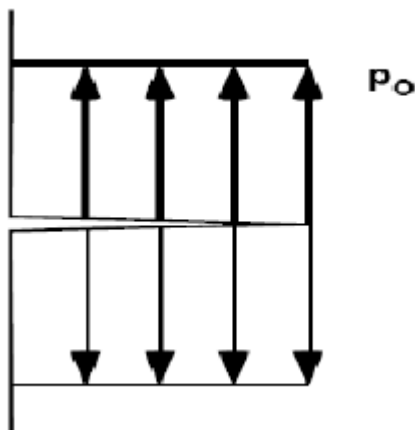


Figure I.16. Pression uniforme

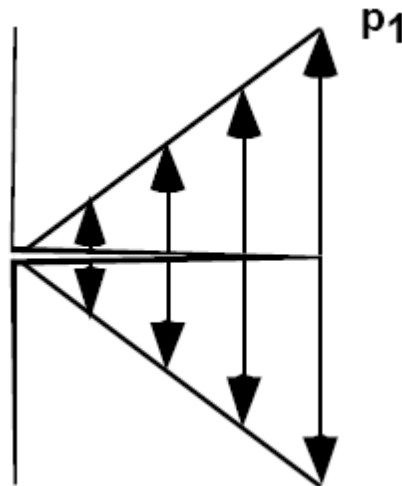


Figure I.17. Pression linéaire

Appliquée en front de fissure $P(x) = p_0$

Appliquée en front de fissure $p(x) = p_1 \left(\frac{x}{\alpha}\right)$

I.13 Méthode des éléments finis en élasticité linéaire

L'utilisation de la méthode des éléments finis sur un domaine donné pour déterminer une fonction inconnue (contrainte, déplacement...) nécessite la description du domaine considéré En un nombre fini de sous domaines appelés éléments finis. Le système continu sera remplacé

Par un système discrétisé équivalent. Les éléments utilisés pour la discrétisation peuvent être unidimensionnels, bidimensionnels, et tridimensionnels. Ces éléments sont liés les uns aux autres en un nombre fini de points appelés nœuds qui se trouvent aux coins et le long de la frontière de ces éléments. L'objectif de la méthode des éléments finis est d'obtenir la relation liant les déplacements $\{u\}$ aux forces nodales $\{F\}$ [12], tel que :

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad (I.27)$$

Où : $[K]$ représente la matrice de rigidité.

Cette dernière est égale à :

$$[K] = h \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] \det J d\xi d\eta \quad (I.28)$$

I.14 Modélisation de la singularité

Souvent dans une structure fissurée pour avoir une bonne précision dans une analyse par éléments finis conventionnels, un maillage plus raffiné est requis dans la région du front de fissure, mais le taux de convergence devient très bas. Donc pour éviter un maillage raffiné de discrétisation des structures fissurées, il est préférable d'utiliser des éléments spéciaux en Pointe de fissure ayant des fonctions de formes compatibles avec la singularité du champ de déplacement [1].

I.14.1 Élément au quart de nœud

Shaw et al [13] ont utilisé des quadrilatères iso paramétriques et ont déplacé certains nœuds se trouvant au milieu du côté pour l'amener au quart, ou encore confondre les nœuds 1, 7,8 pour obtenir un élément triangulaire figure I.18 [1].

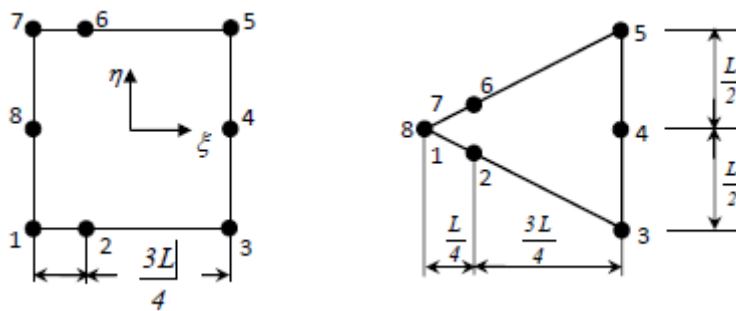


Figure I.18 : Élément au quart de nœud.

Avec ces transformations on peut modéliser la singularité $\frac{1}{\sqrt{r}}$ des champs de déformations sur la frontière 1-29 définie par $\eta = -1$. Les fonctions de formes des nœuds le long de cette frontière sont données par la relation :

$$N_1 = -\frac{1}{2}\xi (1 - \xi)$$

$$N_2 = (1 - \xi) \quad (I.29)$$

$$N_3 = \frac{1}{2}\xi (1 + \xi)$$

Pour une représentation iso paramétrique les coordonnées x et y sont définies par

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_i & 0 \\ 0 & N_i \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} \quad (I.30)$$

A partir des équations I.29 et I.30, et pour $n=3$, on obtient :

$$\mathbf{X} = -\frac{1}{2}\xi (1 - \xi) x_1 + (1 - \xi^2) x_2 + \frac{1}{2} (1 + \xi) x_3 \quad (\text{I.31})$$

Prenons comme origine le nœud 1 et notons L la longueur de la frontière 1-3, on aura donc :

$$\mathbf{X}_{1=0}, x_2 = \frac{L}{4} \quad x_3 = L \quad (\text{I.32})$$

Par conséquent l'équation I. se réduit à :

$$\mathbf{X} = \frac{L}{4}(1 - \xi^2) + \frac{1}{2}\xi (1 + \xi) L \quad (\text{I.34})$$

Ou bien :

$$\xi = -1 + 2\sqrt{\frac{x}{y}} \quad (\text{I.35})$$

Le déplacement le long de la frontière 1-3 s'exprime par :

$$u = -\frac{1}{2}\xi(1 - \xi)u_1 + (1 - \xi^2) u_2 + \frac{1}{2}\xi(1 + \xi)u_3 \quad (\text{I.36})$$

En remplaçant ξ par sa valeur dans l'équation I.36, et en remplaçant x par r on aura ainsi

L'expression du déplacement le long de la frontière 1-3 :

$$U = u_1 + (4u_1 - u_3 - 3u_2) \sqrt{\frac{r}{L}} + (2u_3 + 3u_1 - 4u_2) \frac{r}{L} \quad (\text{I.37})$$

Par les mêmes opérations ont détermine le déplacement v , on aura donc :

$$V = v_1 + (4v_2 - v_3 - 3v_1) \sqrt{\frac{r}{L}} + (2v_3 + 2v_1 - 4v_2) \frac{r}{L} \quad [\text{1}]. \quad (\text{I.38})$$

I.15 Conclusion

Ce premier chapitre permet de fixer le cadre dans lequel s'inscrit notre sujet. D'un point de vue théorique, l'analyse asymptotique en mécanique linéaire de la rupture a défini les paramètres décrivant la rupture. Nous avons rappelé les principaux travaux relatifs à la détermination du champ de contraintes au voisinage d'une entaille et le facteur de concentration de contraintes dans le cas élastique.

Chapitre II :
Généralités sur les matériaux
composites

II.1 Introduction

Dans un sens large, le mot “composite” signifie “constituer de deux ou plusieurs parties Différentes”. En fait, l'appellation matériau composite ou composite est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de ce chapitre. Nous en donnons pour L’instant la définition générale suivante. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué d'une matrice et d'un renfort [10].



Figure II.1 : Quelques applications des matériaux composites : (a) un catamaran, (b) le support de la charge utile d'Ariane 5 (image) (c) des skis de compétition (image de Thomas Grollier).

II.2 Qu'appelle-t-on matériaux composites ?

Il n'existe malheureusement pas de définition unique des matériaux composites. Dans cette ressource, nous retenons les deux critères suivants :

1. Un composite est un matériau hétérogène, formé d'au moins deux constituants qui occupent des phases différentes ;
2. Ces constituants sont disposés selon une organisation géométrique, qui confère au composite des propriétés supérieures à celles des constituants pris séparément.

Le terme « propriétés supérieures » englobe deux notions distinctes. Premièrement, les composites sont généralement conçus de sorte à combiner judicieusement les propriétés de leurs constituants ; par exemple, un vêtement imperméable constitué d'une doublure isolante (destinée à protéger du froid) recouverte d'une matière étanche (destinée à protéger de l'eau) est, du fait de cette disposition, à la fois étanche et isolant. Deuxièmement, l'organisation géométrique des composites peut parfois faire émerger, au niveau global, des propriétés que leurs constituants n'ont pas. Par exemple, certains composites à base de céramiques sont

ductiles, alors que les céramiques elles-mêmes sont fragiles ; cela est dû à leur structure spatiale, qui gêne la propagation des fissures.

Il existe d'autres définitions plus restrictives. Ainsi, dans l'industrie, le terme « composites » n'est utilisé que pour quelques familles de matériaux modernes (voir la ressource « Les grandes familles de matériaux composites ») à base de résines plastiques, de céramiques, de carbone ou de métaux, renforcés par des fibres (figure 3a). Cependant, la définition ci-dessus peut s'appliquer à des « multi-matériaux » plus anciens comme le torchis (un des premiers matériaux de construction utilisé par l'homme) ou le béton armé (figure 3b), et même à des matériaux naturels comme le tissu osseux ou le bois (figure 3c) qui, bien que n'étant pas fabriqués par l'homme, répondent aux deux points clés ci-dessus. En revanche, les alliages métalliques ne peuvent généralement pas être qualifiés de composites : même lorsqu'ils sont hétérogènes, leur structure ne participe habituellement pas à la sélection ou à l'émergence de propriétés particulières. Il existe toutefois quelques exceptions, comme l'acier de damas (figure 3d) utilisé depuis l'antiquité pour la fabrication des armes blanches ; les lames forgées dans cet acier sont constituées d'une alternance de couches fragiles (dures) et ductiles (résistantes aux chocs), ce qui leur permet de conserver leur tranchant. Une telle structure « par couches », dite stratifiée, se retrouve dans de nombreux composites.

Pour éviter toute ambiguïté, certains auteurs emploient parfois le terme multi-matériaux pour désigner les composites « au sens large du terme » (i.e. selon la définition du début de ce paragraphe). Dans cette ressource, les deux termes sont synonymes ; bien que de nombreux exemples soient empruntés aux composites « modernes », les concepts présentés dans cette ressource ont globalement une portée plus large.

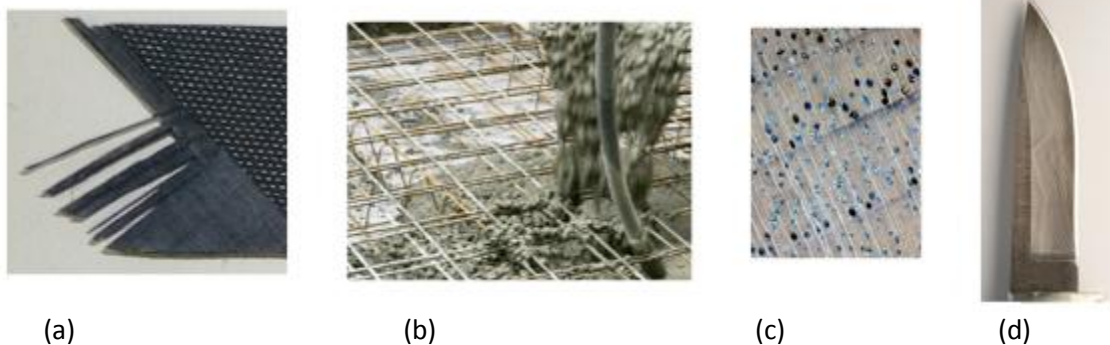


Figure II.2 : Exemples de multi-matériaux : (a) un composite carbone/époxy, (b) un béton armé, (c) du bois vu au microscope optique, (d) une lame d'acier de Damas (image de Ralf Pfeiffer).

La définition précédente montre que les propriétés des composites proviennent de deux facteurs: les propriétés des constituants eux-mêmes, et la structure selon laquelle ils sont agencés. Cette ressource traite de la structure des composites de manière générale ; les différents constituants possibles sont présentés dans la ressource « Les grandes familles de matériaux composites ».

Une originalité des composites est d'être souvent (pas toujours) organisés selon une structure à deux échelles :

- À l'échelle : les composites possèdent une microstructure, comme tous les matériaux ;
- Mais également, pour certains d'entre eux, à l'échelle macroscopique, c'est-à-dire à une échelle intermédiaire entre le matériau et la pièce : de nombreuses pièces composites sont généralement construites par l'assemblage de motifs élémentaires, et non pas taillées dans la masse. [11]

II.3 La microstructure des composites : renforts et matrice

Pratiquement tous les composites sont constitués d'éléments discontinus appelés renforts, noyés dans une phase continue appelée matrice.

Schématiquement, les renforts assurent une part importante de la tenue mécanique (rigidité et résistance) du composite, tandis que la matrice maintient les renforts en position, transfère les efforts entre eux, et assure toutes les autres fonctions techniques. Il peut par exemple s'agir d'une protection contre diverses agressions (thermiques, chimiques, chocs...), de fonctions esthétiques (couleur, aspect...), de donner sa forme extérieure au produit fini... Les renforts peuvent avoir plusieurs géométries, et les deux constituants peuvent être réalisés dans de nombreux matériaux.

II.3.1 Géométrie des renforts

D'un point de vue géométrique, on peut distinguer trois grands types de renforts :

- Les fibres longues (i.e. longueur comparable aux dimensions de la pièce, figure II 3a) ;
- Les fibres courtes (i.e. de longueur faible devant les dimensions de la pièce, figure II 3b)
- Les particules, ou charges renforçâtes (figure II 3c).

Tous ces renforts sont inclus au sein d'une matrice qui répartit les efforts entre eux et les protège des agressions extérieures, comme indiqué ci-dessus. En outre, lorsque les

renforts sont des fibres, celles-ci peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées aléatoirement.

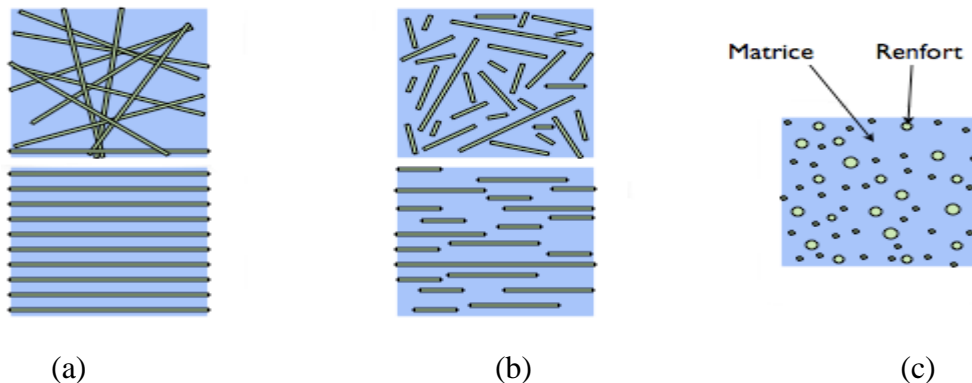


Figure II.3: Les structures géométriques des composites :
(a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.

II.3.2 Renforts et propriétés mécaniques

Les renforts sont généralement conçus de sorte à avoir des propriétés mécaniques optimales (notamment la résistance et la rigidité). Ceci passe naturellement par le choix d'un matériau adéquat, mais pas seulement : dans le cas des composites modernes, le caractère particulaire ou filamentaire des renforts fait qu'il est généralement possible de les fabriquer avec très peu de défauts, alors qu'une pièce massive du même matériau en contiendrait beaucoup plus, ce qui nuirait à sa résistance mécanique (c'est pourquoi le verre, peu résistant sous forme massive, peut être employé comme renfort lorsqu'il est sous forme de fibres).

Sauf cas particuliers, les renforts sont donc beaucoup plus rigides et plus résistants que la matrice (souvent d'un facteur 10, voire 100 ou plus). Par conséquent, les propriétés mécaniques du composite dépendent fortement de la forme et de l'orientation des renforts :

- Les composites à fibres longues présentent un meilleur comportement mécanique que les composites à fibres courtes ou à particules, du moins dans les directions renforcées par les fibres ;
- Les composites à fibres parallèles présentent un comportement mécanique anisotrope (voir la ressource « Modélisation du comportement des composites : l'élasticité anisotrope »), tandis que les composites à fibres orientées aléatoirement ou à particules présentent un comportement à peu près isotrope.

Ainsi, pour des applications structurales, c'est-à-dire des pièces devant résister à des efforts importants, on utilise généralement des fibres longues, dont on adapte l'orientation aux

sollicitations subies par la pièce, et les composites ainsi conçus ont généralement des comportements anisotropes. En revanche, pour des applications non structurales, on utilise généralement des fibres courtes ou des particules, dont le coût de mise en œuvre est moins élevé. Cette distinction vaut aussi bien pour les composites modernes que pour les « multi-matériaux » traditionnels. Par exemple :

- Le verre, associé à des matrices de résine, est utilisé sous forme de microbilles (figure II.4a) ou de fibres courtes (figure II.4b) pour réaliser des plastiques renforcés ou des isolants thermiques. Sous forme de fibres longues (figure II.4c), il peut servir à des applications structurales comme les coques des bateaux ;



Les particules



les fibres courtes



les fibres longues

Figure II.4 : les trois types de renfort. [12]

- Le béton est constitué de granulats (assimilables à des « particules ») pris dans une matrice de ciment (figure II 5a). Sa résistance mécanique est moyenne en compression, et quasi-nulle en traction, ce qui limite ses possibilités d'emploi. On l'associe donc couramment à des armatures d'acier (figure II.5b), plus résistantes et capables de reprendre les efforts de traction, ce qui permet de réaliser des ouvrages plus fortement sollicités : c'est le principe du béton armé.



(a)



(b)

Figure II.5 : Les constituants d'un béton armé :

(a) le béton seul (qui est lui-même un multi-matériau), (b) les armatures métalliques.

II 3.3 Le rôle des interfaces

Les composites étant des matériaux hétérogènes, ils possèdent des interfaces, c'est-à-dire des surfaces de contact entre la matrice et le renfort. Tant que le composite est intact, les deux constituants adhèrent parfaitement l'un à l'autre, et l'interface ne joue donc aucun rôle particulier. Cependant, l'interface joue un rôle important lorsque le composite subit des dégradations mécaniques et commence à se fissurer suite à une surcharge, à la fatigue...

En effet, les interfaces ont la propriété de dévier les fissures : lorsqu'une fissure se propage dans la matrice et atteint l'interface (figure II 6a), elle ne traverse généralement pas cette dernière et les renforts ne sont donc pas endommagés. Au lieu de cela, la fissure change de direction et suit l'interface (figure II 6b). En d'autres termes, au lieu d'une rupture brutale, on observe plutôt une décohésion, c'est-à-dire un décollement progressif entre les renforts et la matrice. L'interface joue donc le rôle de fusible et rend les composites plus ductiles et plus tenaces, c'est-à-dire plus résistants à la rupture, que leurs constituants élémentaires.

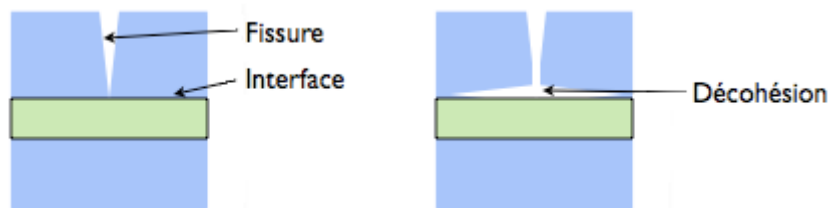


Figure II 6 : Le rôle de l'interface sur la ténacité des composites :

Lorsqu'une fissure atteint l'interface (a), elle est déviée (b).

Au lieu d'une rupture brutale, on observe donc une décohésion progressive des constituants.

Ce phénomène, allié au faible taux de défauts évoqué au paragraphe II 3.2, permet d'expliquer un paradoxe : les composites à base de fibres de verre longues, par exemple, sont bien plus résistants que le verre massif, alors que leurs propriétés mécaniques proviennent essentiellement des fibres de verre ! Ceci illustre un aspect fondamental des composites : grâce à leur structure et leur géométrie, ils possèdent des propriétés que leurs constituants seuls n'ont pas ou, dit autrement, ils ont un comportement différent de celui qu'auraient leurs constituants pris isolément. Ainsi, certains composites à fibres et à matrices céramiques (voir ressource « Les grandes familles de matériaux composites ») ont un comportement ductile, alors qu'il est bien connu que les céramiques ont des comportements fragiles...

II.4 La structure des pièces composites : tissus, stratifiés...

En outre, certains composites possèdent un deuxième niveau structurel, comme indiqué précédemment. La distinction s'opère essentiellement en fonction de la géométrie des renforts.

Les composites à fibres courtes ou à particules sont généralement de simples « matrices chargées » aux propriétés améliorées, mises en forme selon les mêmes procédés que leurs matrices seules (du moins tant que la proportion de renforts n'est pas trop élevée). La conception et la fabrication de pièces utilisant ces matériaux ne présentent pas de signes distinctifs particuliers.

En revanche, les pièces composites à fibres longues possèdent généralement des structures bien particulières. Ces structures permettent au concepteur de « mettre la matière là où on en a besoin », en optimisant l'orientation et la disposition des renforts en fonction du chargement subi par la pièce. En pratique, le diamètre des fibres d'un composite « moderne » étant microscopique, les pièces composites sont généralement réalisées à partir d'éléments structurels « prêts à mettre en forme » (voir ressource « Quelques procédés de mise en forme des composites ») contenant un grand nombre de fibres, comme des fils à tisser ou des nappes à superposer. Elles possèdent donc des structures caractéristiques que nous présentons ici.

II.4.1 Composites tissés

De nombreuses pièces composites sont réalisées à l'aide de tissus ou composites tissés. Dans ces structures, les fibres sont tressées ou alignées en « câbles » nommés torons ou simplement fils, comptant chacun quelques centaines ou milliers de fibres. Ces fils sont ensuite tissés selon des motifs plus ou moins sophistiqués. Une fois la mise en forme terminée, la matrice est présente à deux niveaux : au sein des fils (*i.e.* entre les fibres), et au sein du tissu (*i.e.* entre les fils), comme le montre la figure II 7.

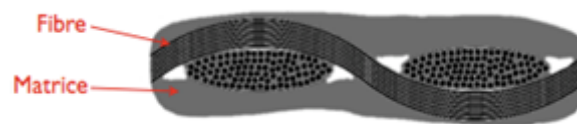


Figure II.7: Structure d'un composite tissé : fibres (regroupées en fils) et matrice (intra- et inter-fils).

Les motifs du tissu peuvent être extrêmement variés. De nombreux tissus sont plans (figure II. 8) et ne comportent qu'une couche de fils ; l'épaisseur de la pièce est alors obtenue en cousant plusieurs couches entre elles, ou encore en les empilant pour former un stratifié (décrit ci-

dessous). Les tissus de la figure II 8 sont équilibrés, c'est-à-dire qu'ils comportent autant de fils dans les deux directions de tissage. Ils possèdent donc la même résistance et la même rigidité dans ces deux directions, mais il faut bien noter qu'ils n'ont pas pour autant un comportement isotrope : ils résistent a priori mieux en traction dans la direction des fils qu'en traction à 45° ou en cisaillement. En outre, il est possible de faire varier la proportion de fils dans les deux directions

Les motifs du tissu peuvent être extrêmement variés. De nombreux tissus sont plans (figure II.8) et ne comportent qu'une couche de fils ; l'épaisseur de la pièce est alors obtenue en cousant plusieurs couches entre elles, ou encore en les empilant pour former un stratifié (décrit ci-dessous). Les tissus de la figure II.8 sont équilibrés, c'est-à-dire qu'ils comportent autant de fils dans les deux directions de tissage. Ils possèdent donc la même résistance et la même rigidité dans ces deux directions, mais il faut bien noter qu'ils n'ont pas pour autant un comportement isotrope : ils résistent a priori mieux en traction dans la direction des fils qu'en traction à 45° ou en cisaillement. En outre, il est possible de faire varier la proportion de fils dans les deux directions.

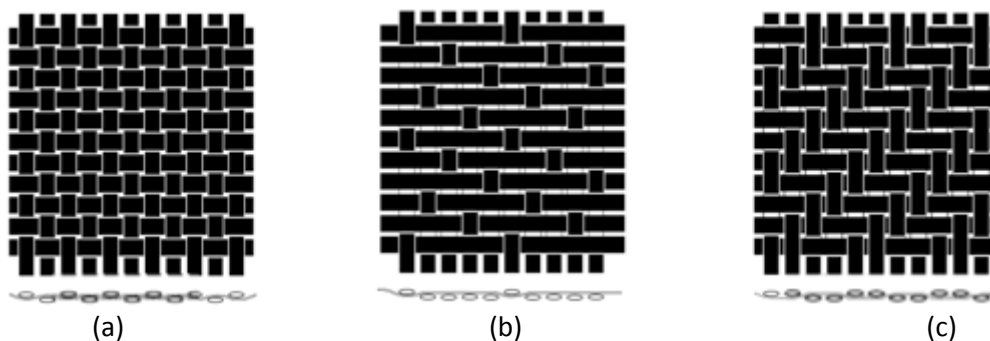


Figure II.8 : Exemples de tissus plans courants. Image [11].

II.4.2 Définition et type des composites

Un matériau composite est, par définition, tout alliage ou matière première comportant un renfort sous forme filamentaire. Il nécessite l'association intime d'au moins deux composants : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et solidaires, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, l'interface. On distingue les types suivants :

a) Plis

On appelle couramment pli un semi-produit composite (fibres + matrice) présenté sous forme quasi-bidimensionnelle, feuilles d'épaisseur faible ($e \approx 0,125$ mm). Il existe différents types de plis [13] :

- Le pli unidirectionnel : les fibres de renfort sont alignées dans une seule direction.
- Le pli tissé : les fibres de renfort forment un tissu avec deux (02) directions de fibres perpendiculaires, la trame et la chaîne.
- Le pli mât : les nappes de fils continus ou discontinus (renfort) sont disposées dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Cette absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mât dans son plan.

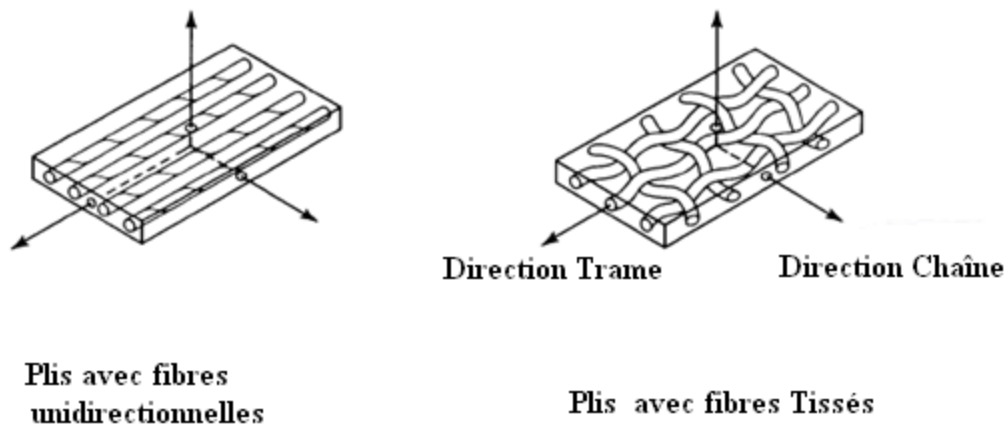


Figure II.9 : Pli unidirectionnel (a) et pli tissé (b)

b) Stratifiés monolithique plans :

Les stratifiés sont les matériaux composites qui ont les meilleures performances structurales. L'idée de base est celle de superposer des couches anisotropes, renforcées avec des fibres longues, uni- ou bi- directionnelles, Si la disposition des couches successives de tissu est de telle sorte que les fils de chaîne coïncident, on dit qu'on a une stratification parallèle unidirectionnelle :

Si on dispose les couches alternativement de façon à ce que les fils de chaîne soient en correspondance avec les fils de chaîne de la couche suivante on dit qu'on a une stratification croisée bidirectionnelle (Figure II.10) [14].

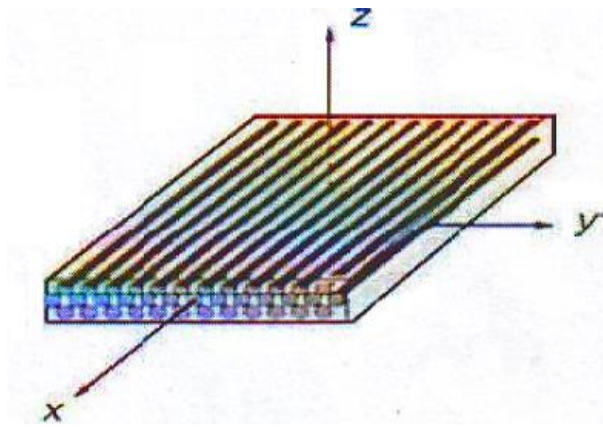


Figure II.10 : Composite unidirectionnel

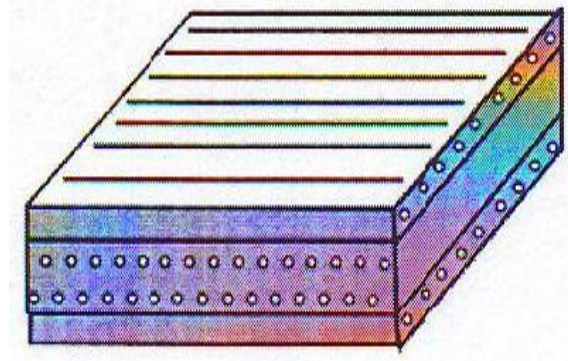
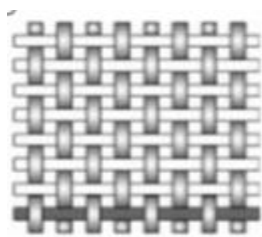
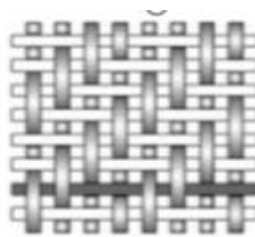


Figure II.11 : Composite stratifié croisé.

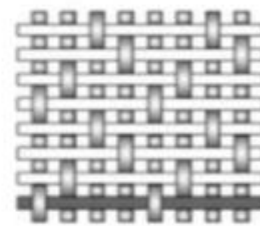
Si les fibres sont croisées entre elles avec un nœud de jonction alterné, sous forme d'un tissage simple, double ou triple, on dit que nous avons un composite stratifié tissé (Figure II13).



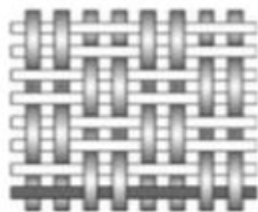
a) Toile



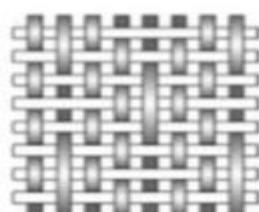
b) Sergé



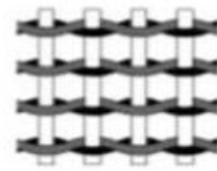
c)Satin



d)Basket



e)Mock Leno



f)Leno

Figure II.12 : Différents types d'armatures de tissu.

Enfin on peut disposer les couches de manière à avoir une superposition de plis diversement orientés vers les fils. Cette orientation des couches permet d'obtenir un matériau final ayant des propriétés souhaitées, selon les besoins en termes de comportement élastique, rigidité et résistance. [15]

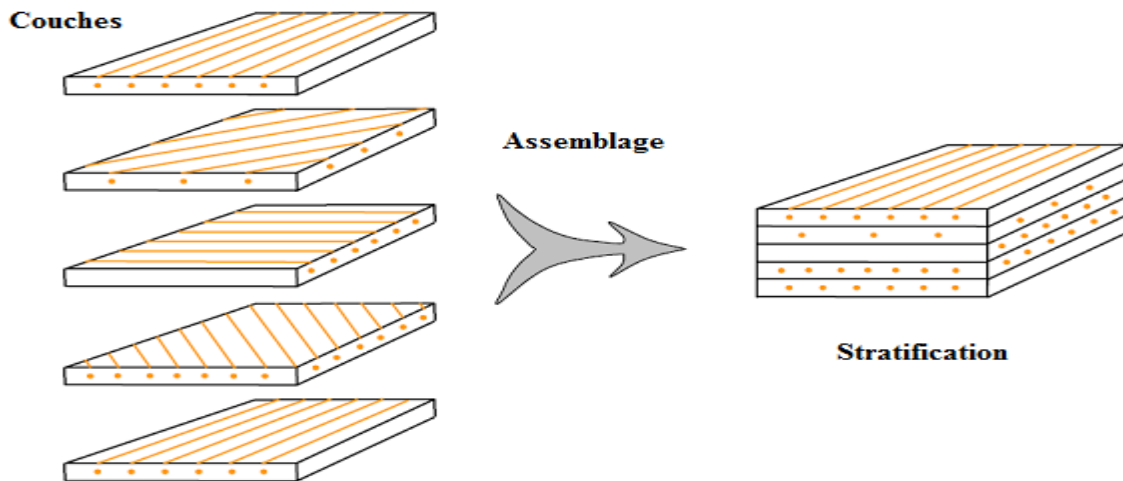


Figure II.13 : Tarifés selon les angles d'orientation. [15]

c) Les hybrides de fibres et de feuille métallique

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Ils permettent d'être plus performantes en utilisant au mieux les propriétés de diverses fibres disponibles. Des feuilles composites stratifiées therm durcissables peuvent être laminées entre des feuilles métalliques pour former un matériau plus léger, à meilleure résistance et ténacité (Figure II.14) [16].

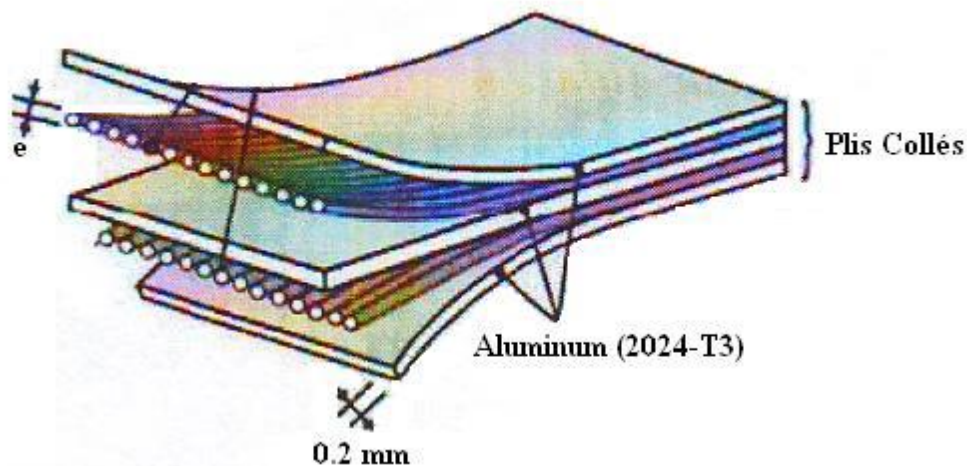


Figure II.14 : Composite hybride. [16]

II.5 Applications des matériaux composites

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux Traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la

durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes. Les matériaux composites offrent aux industriels des possibilités nouvelles d'associer fonction, forme et matériaux, au sein de réalisations des matériaux et systèmes de plus en plus performants et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids, fonctions...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement.

II.5.1 Industrie aérospatiale

Dans l'industrie aéronautique, la course à la maîtrise des solutions composites est engagée à grand renfort d'annonces médiatiques entre les deux principaux avionneurs civils, Airbus et Boeing. C'est ainsi qu'Airbus a clairement mis en avant la réalisation du caisson central composite de l'A380 (Figure II.15a), jouant un rôle structural clé en assurant la reprise des efforts de flexion de la voilure et sa liaison au fuselage. De son côté, Boeing annonce le lancement prochain du B787, premier avion de transport de passagers avec voilure et fuselage composites (Figure II.15b). En réponse, Airbus a annoncé mi-2006 le programme A350 XWB, essentiellement basé sur l'usage des composites [9].

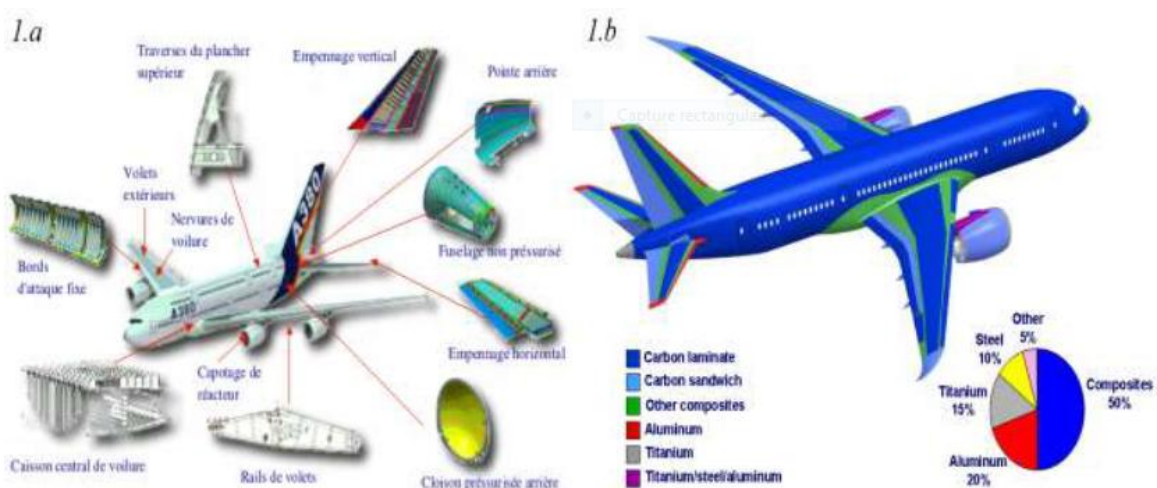


Figure. II.15: Répartition des matériaux composites dans l'A380.a) source Airbus) et Dans le B787. B), source Boeing) [9].

Les composites hautes performances à fibres de carbone utilisés en aéronautique présentent en effet trois principales caractéristiques susceptibles d'éveiller l'intérêt des

Concepteurs :

Des propriétés mécaniques spécifiques largement supérieures à celles des matériaux Métalliques.

- des propriétés mécaniques "sur mesure" en adaptant la disposition des fibres dans le Matériau aux chemins d'efforts attendus.
- une faible sensibilité à la fatigue et à la corrosion permettant de réduire les coûts de Maintenance.

En particulier, confrontés à l'augmentation actuelle du prix du baril de pétrole, les Constructeurs aéronautiques travaillent à la minimisation de la consommation en carburant de Leurs appareils selon le cycle vertueux :

- Réduction de la masse de l'appareil
- réduction de la motorisation
- réduction de l'emport de carburant.

La minimisation de la masse structurale constitue ainsi un défi technologique d'importance auquel les constructeurs répondent par une double démarche. D'une part, l'utilisation de matériaux aux propriétés mécaniques spécifiques accrues permet le dimensionnement de structures plus légères mais tout aussi performantes que les structures classiques.

Concrètement cela se traduit dans l'industrie aérospatiale par la généralisation de l'emploi des matériaux composites pour les structures secondaires et leur introduction progressive dans les structures primaires reprenant l'ensemble des principales sollicitations sur l'appareil. D'autre part, la recherche du dimensionnement au plus juste, permettant de traquer toute masse superflue, constitue la porte ouverte pour la pratique de l'optimisation structurale [9].

II.5.2 Industrie des transports terres très et maritime

L'intégration des matériaux composites dans l'industrie de l'automobile et des transports terrestres a pu réduire substantiellement la consommation de carburant au moyen de l'économie de poids obtenue. Les applications sont très nombreuses dans les domaines des transports. Même ferroviaires avec la fabrication de nombreux éléments de carrosserie et des boucliers amortisseurs de choc placés à l'avant des motrices des T.G.V et qui présentent des performances supérieures en matière d'absorption d'énergie [9].

La société LOHEAC de transports routiers a pu réduire substantiellement sa consommation de carburant grâce à l'économie de poids obtenue en remplaçant les cabines conventionnelles de ses tracteurs par de nouveaux éléments moulés en une seule pièce. Cette Innovation a permis de réduire le poids de la cabine de 875 Kg équipée en acier, à 455Kg seulement et de présenter une plus grande solidité et une meilleure résistance aux dégâts. Le Saut technologique, réalisé grâce à l'introduction des matériaux composites dans la construction Navale, a consacré une évolution fondamentale par rapport aux techniques de construction traditionnelle en bois.

L'adoption de tels matériaux dans la construction des coques des bateaux a permis de procurer à la structure une haute résistance à l'usure et aux chocs répétés dans les vagues et aux collisions encaissées avec les corps flottants.

L'introduction de matériaux composites, tels que ceux renforcés par la fibre aramide Kevlar 49 associée à la fibre de verre- E conduisant à des propriétés mécaniques supérieures, a permis de diminuer le poids des structures de bateaux rapides (patrouilleurs, bateaux D'intervention ou de service) tout en ayant une résistance suffisante afin d'avoir pour résultat Soit une augmentation de la vitesse pour une puissance donnée, soit une meilleure rentabilité Pour la même vitesse ou soit l'utilisation d'une motorisation moins puissante.

II.5.3 Industrie des articles des ports et de loisir

De par, leur légèreté, leur bonne tenue à la fatigue statique et dynamique et leur stabilité dimensionnelle, les composites sont des matériaux idéaux pour la fabrication et la conception de très nombreux d'articles de sport et de loisirs que les skis et les bâtons, les raquettes de tennis, les cannes à pêche et de hockey, les planches à voiles et leurs mats, les voiliers de plaisance, les arcs, les cadres de vélos, des instruments de musique, au lieu du bois qui ne pouvait plus faire face à la demande créée par la civilisation des loisirs, ou l'aluminium qui ne correspondait plus aux critères modernes de performance et d'endurance. de nombreux résultats d'études confirment le haut degré d'amortissement des vibrations des skis sur neige qui confère au skieur le confort tout en conservant au produit ses caractéristiques essentielles. De plus, les matériaux composites permettent de concevoir des Raquettes légères, très rigides et excellentes en fatigue dynamique qui confèrent au joueur une moindre sollicitation des muscles du bras et de moindre fatigue et plus de confort [9].

II.6. Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux innovants, caractérisés par un bon comportement mécanique, chimique et physique. Ces propriétés dépendent essentiellement du type et de l'architecture du renfort avec quelques charges et additifs, qui permettent d'utiliser ces matériaux dans tous les domaines.

Chapitre III :
Technologie de réparation par patches
collées

III.1 Introduction

La consommation mondiale du gaz naturel se multiplie jour après jour. Alors, il est indispensable d'accroître la production de cette matière tout en amplifiant la pression de service ou de redoubler le réseau des pipelines. Ceci est considéré comme très coûteux en raison des projets énormes et des problèmes géopolitiques qui peuvent être rencontrés. Ainsi, Le développement de la résistance du gazoduc est obligatoire. Alors que, l'épaisseur du pipeline devrait être amplifiée et ses propriétés mécaniques et chimiques devraient être progressées. En examinant certaines anomalies auxquelles font face ces pipes telles que la fissuration et la corrosion qui influent directement sur la chute de la pression maximale, à laquelle peut supporter les gazoducs. Récemment, les chercheurs ont tenté de comprendre comment une fissure pouvait conduire à la ruine d'un composant. La tâche n'est pas simple car les fissures conduisent, en théorie, à une singularité mathématique (les contraintes et les déformations croissent jusqu'à l'infini lorsqu'on s'approche du front de fissure). Pourtant Griffith c'est le premier qui met en évidence un terme caractérisant le chargement et le critère associé : lorsque la fissure est chargée, le champ de contrainte en pointe de fissure est proportionnel à un scalaire, le facteur d'intensité des contraintes, noté KI. Si le chargement croît et le matériau est fragile (le verre dans l'analyse de Griffith) KI reste proportionnel au chargement et la propagation apparaît lorsqu'il atteint une valeur critique, caractéristique du matériau, notée KIC. Ce chapitre donne une description de la technique de réparation par patch avec un aperçu de quelques travaux dans le domaine des pipes afin de réparer des structures endommagées en utilisant des matériaux composites [1].

III.2 Règles de sécurité pour les canalisations de transport de gaz en Algérie

Dans la construction du marché national du gaz, le rôle du transporteur est essentiel. Il consiste à développer et à promouvoir un accès des tiers au réseau, transparent et non discriminatoire, fondé sur une offre de transport adapté aux besoins des clients. Le développement du réseau de transport à moyen et long terme nécessite des choix fondés, d'une part, sur l'évolution du système gazier dans son ensemble et, d'autre part, sur des besoins plus ciblés, exprimés par le marché.

III.2.1 Emplacements des canalisations

Les emplacements où les ouvrages de transport de gaz visés au présent règlement sont Susceptibles d'être installés ; ils sont classés en quatre (04) zones [1] :

Zone I ; Comprend : les zones urbaines à forte densité de population.

Zone I a ; Comprend :

A- Les zones urbaines dont la densité de population à l'hectare de logement et de locaux correspondant à une occupation équivalente calculée sur la surface d'un carré axé sur la canalisation de côté égale à 200 m est inférieure à 40 habitants.

B- Les zones rurales ou désertiques pour lesquelles l'une au moins des quatre conditions suivantes est remplie :

- Ils sont situés à moins de 75 m d'un établissement recevant du public ou assujettis aux règles relatives à la protection contre les risques d'incendie ou de panique. Ainsi d'un établissement rangé pour risques d'incendie ou d'explosions dans la 1ère classe des établissements dangereux, insalubres ou incommodes, ou d'une installation de défense nationale présentant des risques d'incendie ou d'explosion.

- La densité à l'hectare déterminée comme ci-dessus est supérieure à 4.

- Ils se trouvent dans le domaine public national.

- Les ouvrages annexes définis à l'article 2 du présent règlement.

Zone II ; Comprend :

Les emplacements situés dans les zones rurales, les pâturages, les terres de culture, les forêts et les approches des agglomérations.

Zone III ; Comprend :

Les emplacements situés dans les régions désertiques. [1]

III.2.2 Pression maximale de service des éléments des ouvrages de transport

La résistance des éléments tubulaires est éprouvée dans les usines de fabrication à la diligence du transporteur et sous le contrôle de l'expert ou de l'organisme agréé. Le chef de l'établissement où se fait cette épreuve est tenu de fournir le matériel et la main d'œuvre nécessaire à ladite épreuve.

La valeur de la pression d'épreuve hydraulique "PU" doit être égale à la valeur de la pression qui détermine dans le métal des contraintes atteignant la limite d'élasticité vraie, si les justifications sont présentées en ce qui concerne la mesure de cette grandeur, dans le cas contraire, "PU" est limitée à la pression qui détermine dans le métal des contraintes atteignant 90 % de la limite d'élasticité spécifiée. Les tubes doivent être droits, à section circulaire, et répondre aux exigences des normes agréées. L'épaisseur des tubes et leur

pression limite de Sécurité (en appelant pression limite de sécurité : la pression maximale de service dans le Tube). Ils sont liés par la relation suivante :

$$PC = \frac{2\sigma t}{D} \quad (\text{II. 1})$$

PC : est la pression limite de sécurité de l'élément tubulaire exprimé en MPa.

t : est l'épaisseur minimum de la canalisation (compte tenu de la tolérance de fabrication en Moins) exprimée en millimètres ;

D : est le diamètre extérieur nominal exprimé en millimètres ;

σ : est la contrainte transversale maximum supportée par le métal [1].

III.3 Méthodes de réparation des pipelines

Après l'évaluation de l'endommagement des pipelines, s'effectuera le choix du type de réparation selon :

- La géométrie de la canalisation (diamètre, cintrage...)
- La nuance de fabrication de l'acier
- La localisation de la canalisation
- Les conditions d'exploitation
- La localisation du défaut
- La nature et dimension du défaut.

Ainsi donc nous disposons d'une panoplie de technique de réparation. Nous pouvons citer les principales techniques de réparations par patch en composite telle que

- Les réparations par collage
- Système de réparation par renforcement des fibres composites

Cependant il existe d'autres techniques de réparation telle que

- La méthode de meulage
- La méthode de perçage
- La réparation par demi-coquille soudée
- Ré-enrobage
- Coupe et remplacement après vidange. [17]

III.3.1 Réparation des pipelines par patch en composite

Les matériaux composites ont été employés pour la réparation des structures des pipelines et d'autres équipements pendant plusieurs années. Cependant, l'utilisation originale des matériaux composites était de réparer les canalisations corrodées avec l'intention de renforcer

la section endommagée de la canalisation. En plus de réparer la corrosion, les matériaux composites ont été utilisés avec succès pour réparer des entailles, des fissures et des canalisations offshore. Aujourd'hui, la plupart des compagnies d'exploitation de pipelines utilisent principalement les matériaux composites dans les programmes de réhabilitation et de réparation. [17]

III.3.1 A Réparation par collage

Les matériaux composites sont des matériaux performants constitués par l'association à l'échelle microscopique de plusieurs matériaux aux caractéristiques complémentaires. Cela permet d'associer un ensemble de propriétés mécaniques ou physiques qu'il serait impossible à obtenir avec les composants prisent de façon isolée. Outre le gain de poids, un autre avantage des matériaux composites est le caractère multifonctionnel qui leurs est conféré par leurs propriétés orthotropes. Ils sont en effet plus largement utilisés au fur et à mesure que les connaissances concernant le processus de Fabrication, leurs caractéristiques mécaniques et physiques ainsi que leur durabilité et comportement sous charge s'accumulaient. Dans notre cas, nous allons nous axer plus sur les matériaux composites à fibre et résines. La caractérisation des matériaux composites à base de fibres et de résines est généralement complexe. Contrairement aux matériaux métalliques qui demande un nombre relativement restreint d'essais, les composites à base de fibre et de résines se distingue par la nécessité d'une multitude d'essai afin d'aboutir aux caractéristiques mécaniques. La figure suivante présente la réparation par composite d'une pipe en acier [17].



Figure III.1: Réparation par composites d'une pipe en acier

III.3.1 B. Système de réparation par renforcement des fibres composites

Généralement, les systèmes de réparation par collage de composite peuvent être classés en deux types : Système de réparation par matériaux composites pré-durci « Pre-cured layered » et système de réparation par matériaux composites flexible « Flexible wetlay-up system » qui sont appliqués dans la réparation des pipelines défectueux.

- **Système de réparation par matériaux composites flexible**

Le système de réparation par matériaux composites flexible est intensivement utilisé pour l'industrie de réparation des pipelines enterrés sous la forme de suremballage des pipes d'acier même aux angles ou des courbures pour une vaste gamme d'application de pression. Cette application utilise la matrice de résine qui est généralement à l'état non solidifié. Leurs solidifications sont réalisées après leur mise en place sur la structure.

Ce système de réparation utilise un matériau composite qui est imprégné avec des systèmes de résines différents (verre, carbone, aramide...) pour tenir compte des conditions environnementales spécifiques, telles que les applications sous-marines, les températures élevées et le froid.

Le système de réparation par matériaux composites flexible est adapté pour les réparations de surfaces externes ou pour la probable progression de la corrosion et pour rétablir la résistance du pipeline contenant un défaut à la paroi. Ce système est également adapté aux conditions souterraines pour des applications relativement à faible et à moyenne pression. Toutefois, en raison de la complexité de préparation, d'application et de durcissement de la résine pour les systèmes flexibles, il est souvent souhaitable d'utiliser un manchon spiral pré-durci. La figure III.2) présente l'emballage d'un composite flexible pour la réparation d'une conduite sous - marine.



Figure III.2: Emballage de composite flexible pour la réparation sous – marine

- **Système de réparation par matériaux composites pré –durci :**

Le système de réparation par matériaux composites pré – durci comprend le collage de matériaux composites renforcés par des fibres pré – durcis qui est tenu ensemble avec un adhésif appliqué sur le terrain. La figure II.4 montre le système de réparation Clockspring R qui est intensivement utilisé dans l'industrie de réparation des pipelines. Ce type de système de réparation est un enroulement de matériau composite à haute résistance avec une structure qui permet d'envelopper en toute sécurité autour des pipelines. Les couches sont scellées ensemble avec un agent de liaison solide. Le défaut est rempli avec du mastic adhésif pour aider à l'appui et au transfert de charge avant leur installation.

Cette méthode de réparation est fiable pour les défauts extérieurs. La plupart des technologies de réparation moyennes sont basées sur ce principe. Cependant, la réparation à l'aide de ce système est généralement limitée à des sections droites de tuyau. Elle nécessite un grand espace pour appliquer ce système sur le pipeline défectueux. En outre, l'application sous – marine de ce système est difficile car elle consiste à une application interne de la colle pour le système en couche. Ainsi, la liaison des couches et leurs performances ainsi que l'installation sont les principaux inconvénients de ce système de réparation.

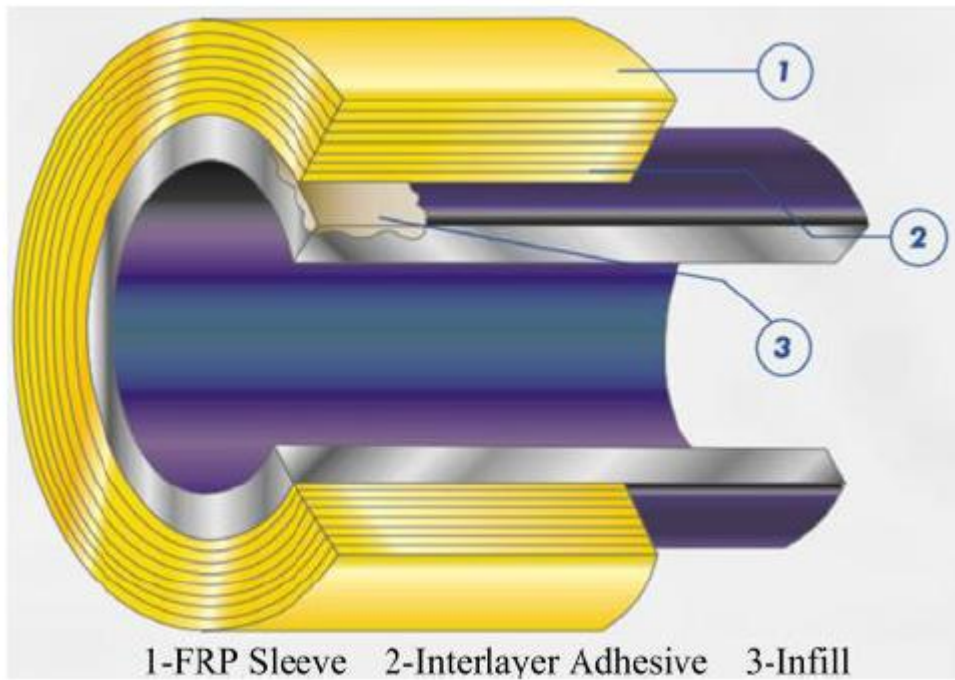


Figure III.3: réparation par renforcement composite type clockspring

III.3.2 Autres méthodes de réparation des pipelines

Il est bien connu que la singularité en pointe de défaut (fissure, entaille) contribue à accentuer sa progression. Ce qui tend à réduire la durée de vie des structures endommagées. Une des techniques les plus répandues permettant de réparer les effets néfastes d'un défaut, consiste à éliminer cette singularité par enlèvement de matière. Dans ce cas on trouve le meulage et le perçage au voisinage du défaut.

- **Méthode de meulage :**

Cette technique de réparation est basée sur le principe d'élimination des défauts par enlèvement de matière comme le montre la figure III.4. Elle permet ainsi d'éliminer la singularité créée par le front de la fissure

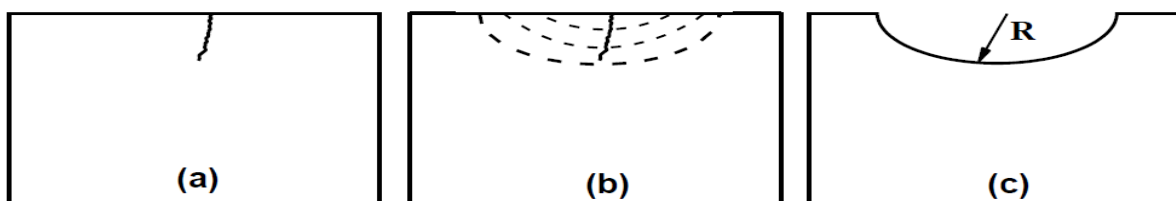


Figure. III.4: Méthode de meulage, (a) défaut de fissure, (b) réparation par meulage, (c) structure après réparation

C'est une technique simple qui nécessite des moyens moins coûteux. Le meulage peut donner de bons résultats en termes de durée de vie des structures réparées. Cependant, cette technique peut fragiliser la structure du fait de la diminution localisée de la section. Cela nécessite une vérification par calculs de la tenue mécanique de telles structures après réparation. Elle est souvent recommandée dans le cas des réparations des fissures dans des structures épaisses. Elle est aussi utilisée comme technique de parachèvement dans le cas des joints soudés en vue de permettre l'extension de leur durée de vie.

- **Méthode de perçage :**

Le perçage d'un trou en fond d'une fissure permet un arrêt temporaire de la propagation de la fissure. Cette méthode est basée sur la modification géométrique en fond de la fissure. C'est une méthode largement répandue pour la réparation des structures métalliques endommagées. Elle est effectuée dans le but d'en augmenter la durée de vie ce qui entraîne une réduction de la contrainte maximal (figure III.5). Cette technique apporte différents avantages ; elle est simple à réaliser, reproductible et utilisable pour des structures qui ne sont accessibles que dans un seul côté. Elle permet de garder la structure en service en attendant un éventuel changement de la pièce endommagée. L'amorçage de la fissure est retardé par le perçage du trou et la durée de vie augmente avec l'accroissement du diamètre du trou. Le perçage d'un ou plusieurs trous autour du défaut est une autre méthode proposée par plusieurs chercheurs pour réparer la structure fissurée.

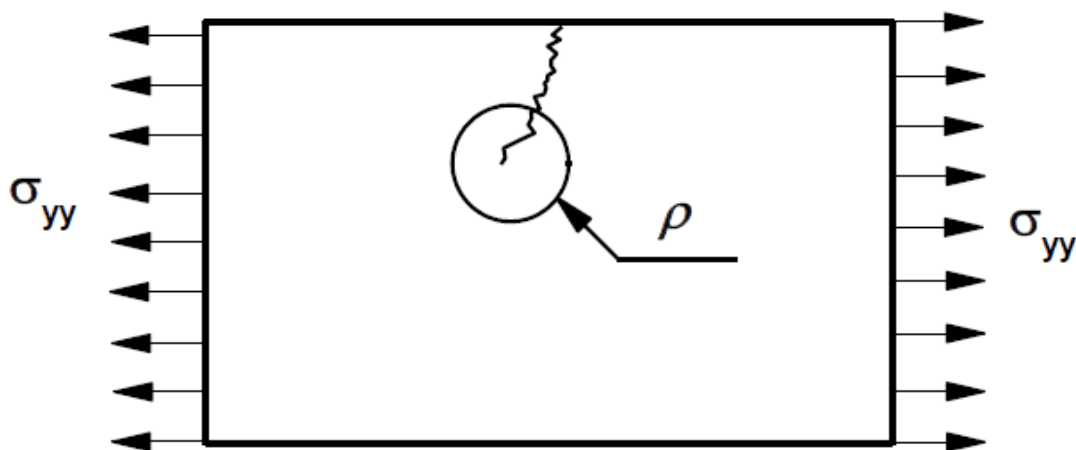


Figure III.5 : perçage au fond de la fissure

Ce processus de réparation cause le retard de propagation de la fissure. Un plus grand rayon de trou réduit le facteur de concentration de contrainte, mais il faut cependant faire attention à la diminution de la section du ligament restant.

Dans d'autres études, il existe une approximation pour le facteur de concentration de contrainte. Pour un trou percé en fond d'une fissure le facteur de concentration de contrainte est donné par la formule suivante :

$$k_t = 1 + 2\sqrt{a/\rho}$$

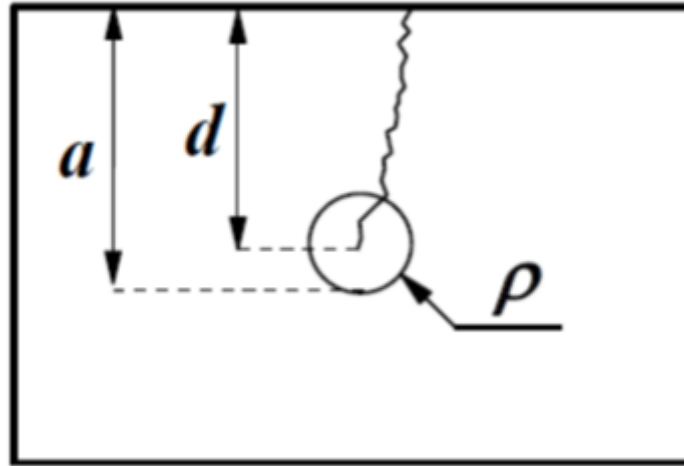


Figure III.6: Dimensions géométrique de la fissure et trou de réparation

Avec d est la longueur initiale de la fissure, ρ est rayon du trou percé, $a=d+\rho$ est la longueur de la fissure après percage en plus du meulage et du percage il existe d'autres méthodes à savoir la réparation par demi-coquilles soudées, le ré-enrobage ainsi que la méthode de coupe et remplacement après vidange. [17]

- **Réparation par demi-coquilles soudées**

La procédure de réparation en charge des canalisations de transport d'hydrocarbures par l'installation de demi-coquilles soudées renforce la zone défectueuse contenant toute éventuelle fuite, et est par conséquent utilisé pour réparer des défauts débouchant ou non-débouchant d'orientation axiale ou circonférentielle.

La figure suivante présente la géométrie de demi-coquilles :

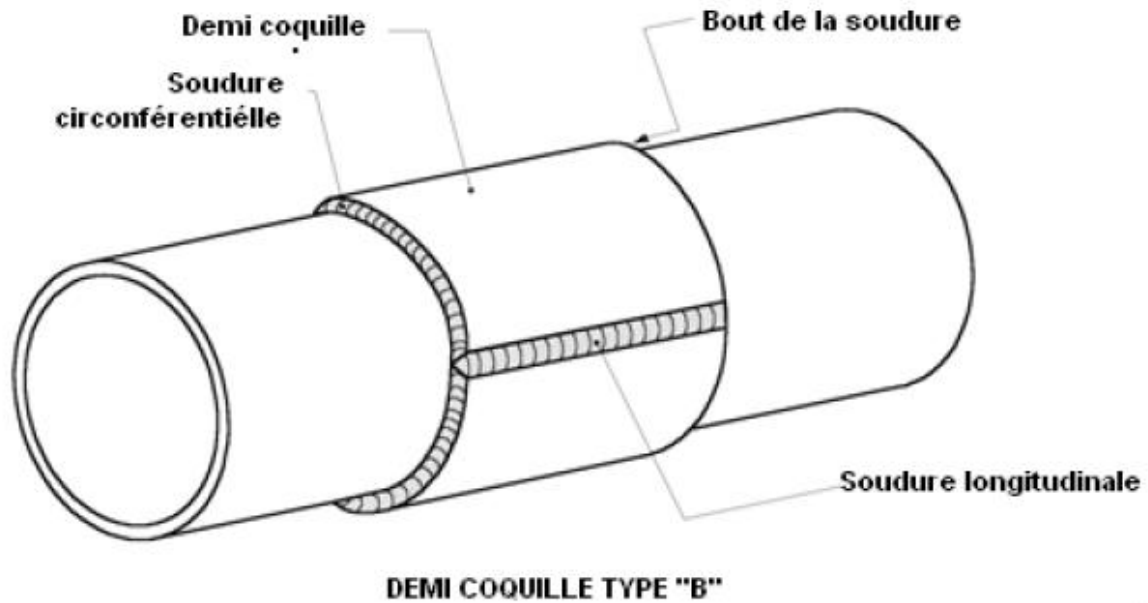


Figure III.7 : Géométrie de demi-coquilles

- Les demi-coquilles soudées permettent de réparer les défauts suivants :
- Corrosion internes et externes
- Enfoncements simples ou combinés à d'autres défauts
- Entailles et rayures
- Fissures au niveau du corps du tube ou du cordon de soudure circconférentielle

Ré-enrobage :

Ce type de réparation s'effectue dans le cas où l'enrobage a été touché ou après une intervention sur le pipeline pour remettre son isolation initiale.



Figure III.8: (a) réparation de surface pour réfection enrobage, fuite de Bentalha (Oran, Algérie), réfection enrobage

Il faut procéder comme suit :

- Préparation de la surface
 - Choix du revêtement adéquat (compatibilité)
 - Application du revêtement sur la conduite
 - Contrôle du revêtement
- ✓ **Coupe et remplacement après vidange :**

Cette méthode est préconisée lorsque la partie endommagée perd les propriétés mécaniques pour lesquelles le pipeline a été conçu.



Figure III.9 : changement du tronçon endommagé d'une canalisation, (a) découpe, (b) Ré-soudage

La réhabilitation apportée consiste au changement partiel de la ligne de canalisation vu le cout élevé de cette opération, elle reste la solution finale pour réparer la structure endommagée [17].

III.4 La réparation et / ou le renforcement par composite

Les matériaux composites sont des matériaux performants, constitués par l'association à L'échelle microscopique de plusieurs autres matériaux aux caractéristiques complémentaires. Cela permet d'associer un ensemble de propriétés mécaniques ou physiques qu'il serait Impossible à obtenir avec les composants pris de façon isolés. Outre le gain de poids, un autre Avantage des matériaux composites est le caractère multifonctions qui leur est conféré par Leurs propriétés orthotropes. Ils sont en effet plus largement utilisés au fur et à mesure que les Connaissances concernant le processus de fabrication, leurs caractéristiques mécaniques et Physiques ainsi que leur durabilité et comportement sous charge, s'accumulaient. La

Caractérisation des matériaux composites à base de fibre et de résines est généralement Complexe. Contrairement aux matériaux métalliques qui demandent un nombre relativement Restreint d'essais, les composites à base de fibres et de résines se distinguent par la nécessité

D'une multitude d'essai afin d'aboutir aux caractéristiques mécaniques et pour caractériser L'effet de l'endommagement. Après une brève description, au travers D'exemples, des évolutions vers ces matériaux particulièrement dans le domaine spatial, nous Nous intéresserons plus précisément à l'étude du flambage des coques en matériau composite.

Les mêmes paramètres « sensibles » que pour les coques en métal sont mis en exergue. La Complexité est cependant accrue par la présence de l'anisotropie, mais aussi par un champ D'imperfections plus vaste. En effet, aux défauts géométriques peuvent se superposer les Défauts liés au processus de fabrication, tels que les délaminages localisés ou micro flambage De fibre. Ces défauts peuvent être générés par des conditions aux limites inadéquates, les Coques en matériaux composites nécessitent une diffusion optimale des efforts afin d'éviter L'initiation d'endommagements. Au travers de quelques études, nous montrons que L'approche est cependant similaire aux coques métalliques, c'est à dire en couplant Expérimentation et numérique, à la différence près qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de Codes de dimensionnement traitant des coques en composite au sens large (la SP8007 traite Cependant des coques multicouches). L'absence de règle est due principalement à ce que les Exemples de structures coque en composite sont assez rares même si l'utilisation de ces Matériaux s'intensifie. D'autre part la diversité des procédés de fabrication et des produits Constituant les matériaux composites rendent difficile la synthèse et donc la rédaction d'une Règle de dimensionnement. Chaque exemple est en fait un prototype et nécessite donc une Approche conjuguant expérimentation et simulation avant que le dimensionnement ne soit Assuré. Les études que nous avons retenues montrent cette nécessité, et mettent en exergue les Paramètres à étudier. Nous nous sommes ensuite intéressés au renforcement de structures Métalliques à l'aide de matériau composite. Les exemples d'application sont rares, mis à part Dans le domaine de l'aéronautique. Dans le cas des structures du génie civil en particulier Pour les poutres les dallent et les poteaux en béton armé, le recours au collage en surface, de Plaques composites à base de fibre de carbone, est un procédé aujourd'hui courant et bien Validé puisque des recommandations ou normes de dimensionnement ont vu le jour.

Cependant il n'existe pas d'études qui traitent des coques qu'elles soient métalliques ou en Béton armé, bien que pour ces dernières des exemples de réparation existent (les aéroréfrigérants) [18].

III.4.1 Dans le domaine spatial

L'industrie spatiale a permis une nette percée des matériaux composites. L'évolution du Besoin au niveau des charges utiles, les exigences de fiabilité et le facteur coût devenant plus sévère, les matériaux et les technologies ont été adaptés aux besoins sans cesse plus ambitieux. Dans les années 70, les principales technologies retenues pour ce qui est des Réservoirs de lanceurs consistaient au choix de tôles roulées/soudées en acier ou en alliage D'aluminium 7020. Pour les autres structures (jupes inter étages, bâti moteurs, partie haute) Les techniques aéronautiques traditionnelles (raidissages rapportés, assemblages par rivets) Étaient adoptées avec l'utilisation intensive de divers alliages d'aluminium (7075, 2024, 2014, ...).

H. ORY [ORY86] et [ORY91] donne une synthèse très complète des différents concepts Utilisées (raidissage, tôle ondulée, rivetage.) et fait état des diverses méthodes de Dimensionnement vis à vis du flambage et de la plasticité. L'accroissement important de la Charge utile (pour Ariane 1300 kg en 1980 à 4,5 tonnes en 1994) a nécessité des évolutions Sur le plan des technologies notamment une plus large utilisation des matériaux composites. L'avantage fondamental de ces matériaux est le caractère multifonctions qui leur est conféré Par leurs propriétés d'orthotrope, pour illustrer cette caractéristique spécifique aux matériaux Composites on retiendra 3 exemples : Le premier est celui de la coiffe qui assure son propre Tenue aux charges et sa raideur en flexion grâce à des fibres de carbone placées dans le sens Longitudinal et qui contrôle son ouverture à la séparation grâce à une raideur plus faible dans Le sens circonférentiel (tissu hybride carbone/verre).



Figure III.10: La coiffe d'Ariane 5

Les fibres composites sont aussi utilisées pour les capacités « haute pression. Cette structure D'un volume de quelques litres contient un gaz ou un liquide à plusieurs centaines de bar de Pression. Les différentes études menées dans l'industrie spatiale montrent que les matériaux Composites apportent un gain de performance évident et un gain sur les coûts de production Car les durées d'assemblages sont sensiblement diminuées. De plus, ces matériaux permettent, Vu leur procédé de fabrication, d'obtenir des formes complexes avec la possibilité de Maîtriser l'orientation des rigidités privilégiées.



Figure III.11: Capacité haute pression titane

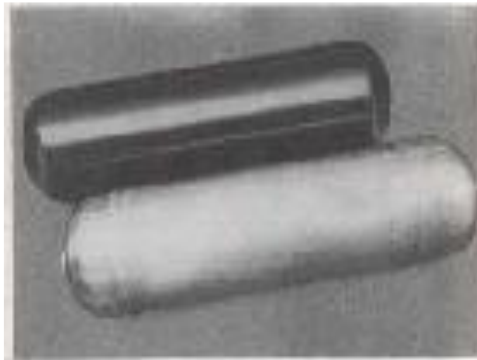


Figure III.12: Bouteille haute pression matériaux composites fibre carbone

Dans le cas de la réparation, les fissures localisées qui apparaissent sur des pièces de fuselage En aluminium sont souvent stoppées à l'aide de patches en composite collés directement sur la Pièce. Des études numériques et expérimentales ont montré que le procédé de renfort localisé, Par composite, permet d'améliorer la capacité portante des coques métalliques comportant Des défauts de forme. On peut dire que les différentes études menées principalement dans L'industrie spatiale et automobile, montre que les matériaux composites apportent un gain de Performance évident, un gain sur les coûts de production, car bien que le matériau de base Soit plus onéreux, le nombre de pièces élémentaires et les durées d'assemblage sont Sensiblement diminuées [18]

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, notre travail s'est porté sur les techniques de réparation des défauts dans les pipelines. Parmi les différentes méthodes de réparation citées, la réparation par collage d'un patch composite semble la plus prometteuse pour résoudre rapidement et à moindre coût les dommages de canalisation [17].

Chapitre IV :
Analyse d'une pipe fissurée et réparée
par patch en composite

IV.1. Introduction

Aujourd'hui, il existe plus de 20 approches pour calculer les facteurs d'intensité de contraintes. Ces méthodes avec des caractéristiques analytiques, qui conviennent généralement pour des cas particuliers ou des configurations de fissures très simples, ne sont pas suffisantes pour obtenir des résultats raisonnables pour des orientations générales en raison des multiples restrictions. Dans ces cas, des approches numériques sont généralement utilisées. Dans les approches numériques proposées jusqu'à présent, la méthode des éléments finis fournit une technique très simple, efficace et précise pour l'évaluation des paramètres de la rupture.

De nombreux travaux sur les algorithmes de génération de maillage et de nouvelles méthodes pour améliorer le calcul numérique des valeurs des FIC ont été trouvés dans les travaux de Miranda et al. [18, 19].

Dans ce dernier chapitre, on va utiliser la méthode des éléments finis tridimensionnels pour analyser le comportement mécanique d'un pipeline fissurée et réparée par un patch composite collé :

- les propriétés géométriques de la fissure et leurs effets sur la variation du facteur d'intensité de contrainte ;
- les effets des propriétés géométriques et mécaniques du patch composite et de l'adhésif sur l'efficacité de la réparation.

Le but de ce chapitre est l'étude des effets des propriétés géométriques et mécaniques de la fissure et de sa réparation sur la variation du FIC au fond de la fissure et les niveaux de contraintes dans l'adhésif à fin de tirer le meilleur modèle de réparation.

Sans besoin d'utiliser des logiciels de modélisation (Solid Works, Catia, ...) pour créer des fissures dans un modèle solide, **Crack Object** dans **ANSYS Workbench 16.2** (*qu'on a utilisé*) fournit des outils automatisés pour intégrer des fissures de formes semi-elliptiques dans des maillages existants. Il calcule l'intégrale **J**, puis, il l'utilise pour extraire les facteurs d'intensité de contraintes (**FIC**).

IV.2. Modèles géométriques

On a utilisé le logiciel **Solid Works** pour modéliser la même pipe (pipeline avec des dimensions normalisées) avec des patches de géométries différentes.

Propriétés géométriques de la pipe

Longueur de la pipe	2000 mm
Diamètre intérieur	847,44 mm
Diamètre extérieur	864 mm

Les modèles géométriques de la pipe réparée avec différents types de patches sont composés de trois parties : la pipe, la couche d'adhésif et le patch composite.

Les différents modèles sont exportés vers **ANSYS Workbench 16.2** (comme la montre la figure ci-dessous) pour les analyser avec la MEF.

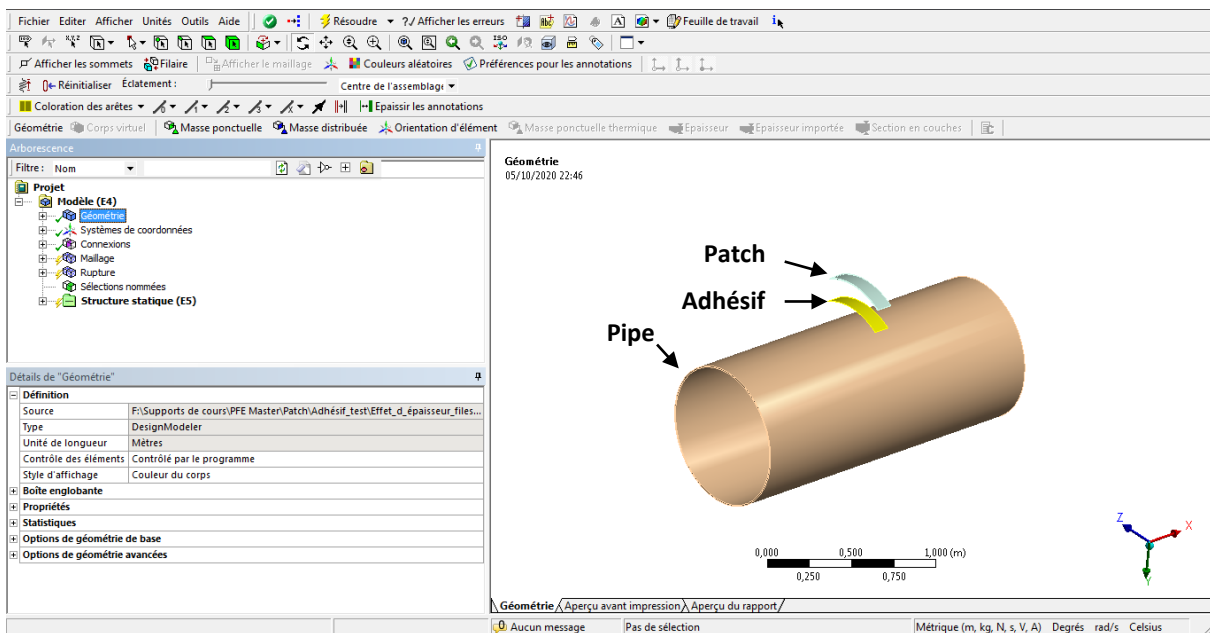


Figure IV1 : Modèle géométrique dans ANSYS Workbench 16.2

IV.3. Conditions aux limites et chargement

Toute analyse en éléments finis nécessite la définition des conditions aux limites, dans notre cas, les deux extrémités de la pipe sont supposées encastées (figure IV 2).

Les interfaces entre les différents composants de la structure, à savoir, la pipe, la couche adhésive et le patch composite sont traitées comme des interfaces parfaitement collées.

La pipe est soumise à une pression interne de **10 MPa** pour tous les modèles analysés

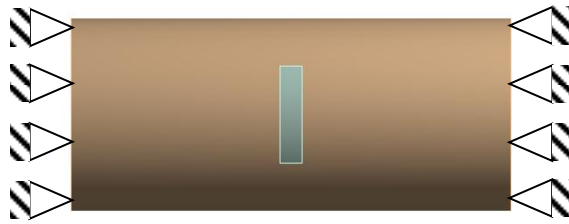


Figure IV 2 : Conditions aux limites appliquées sur la pipe

IV.4. Maillage

En raison de l'existence de la singularité du fond de fissure, les éléments habituels entourant le fond de fissure doivent être générés en maillage raffiné afin de tirer des résultats de facteur d'intensité de contrainte fiables. **ANSYS Workbench** exige que le corps de la structure de la pièce avec des fissures soit maillé avec des éléments tétraédres, tandis que d'autres corps sans fissures peuvent être maillés avec des éléments de types arbitraires.

Sous l'environnement d'**ANSYS Workbench**, le raffinement du maillage du fond de fissure est automatiquement généré après l'exécution du maillage global.

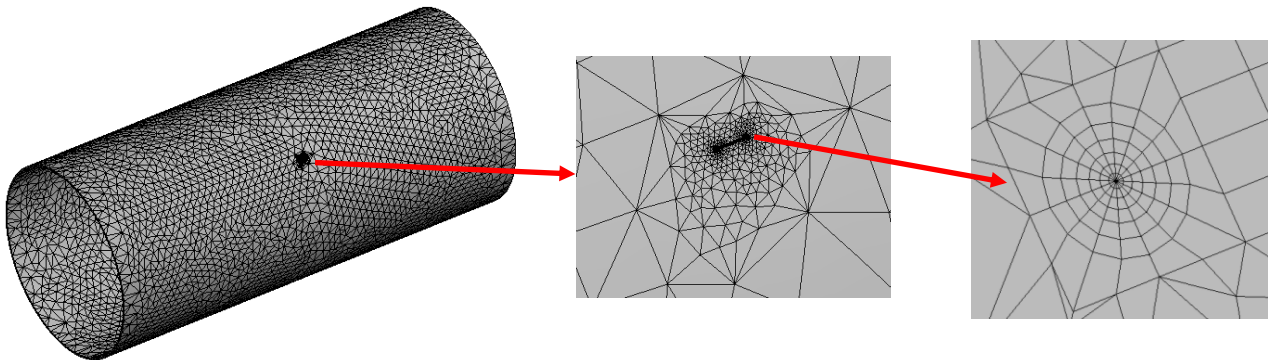


Figure IV 3 : Modélisation par éléments finis de la pipe fissurée

La figure IV 4 montre le maillage utilisé avec des éléments tétraédriques pour l'analyse de la pipe fissurée ainsi que le raffinement au fond de fissure en utilisant des éléments spéciaux de singularité avec six contours. La génération du maillage a créé **32846** éléments et **69415** nœuds.

La pipe utilisée dans cette étude est en acier API 5L X65, un matériau fréquemment utilisé dans l'industrie des pipelines, avec [3] :

$$E = 209000 \text{ MPa} ; \nu = 0,3$$

IV.5. Analyses et résultats

IV.5.1. Effets de la géométrie de la fissure

Avant de prendre en détail les effets des propriétés (géométriques et mécaniques) adhésif/patch, on va réaliser une étude préliminaire sur l'influence de l'orientation et de la taille de la fissure sur le **FIC** afin de déterminer le cas le plus défavorable pour le prendre comme modèle dans la suite de cette étude.

Les fissures d'une forme semi-elliptique, comme le montre la figure 4, sont caractérisées par le petit demi-axe (**a**) et le grand demi-axe (**c**).

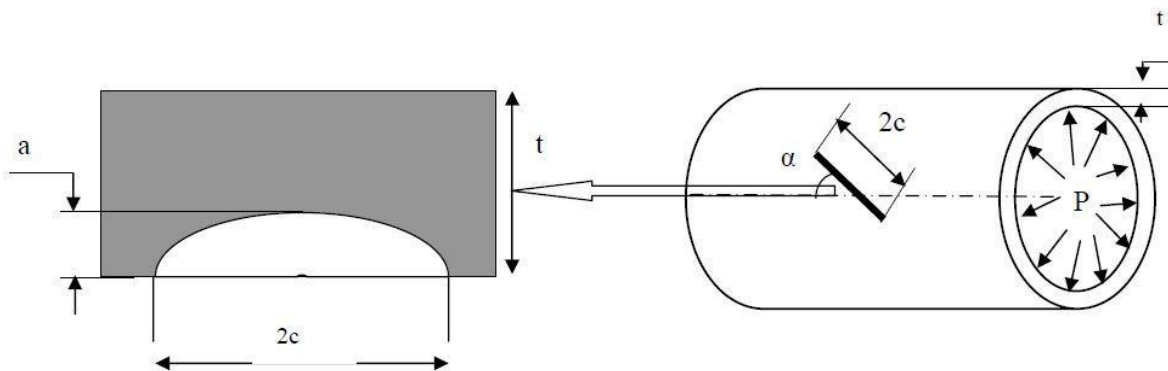


Figure IV.4 : Pipe avec une fissure semi-elliptique

IV.5.1.1. Effet de l'angle α sur la variation du FIC

On a modélisé numériquement les mêmes caractéristiques géométriques **a** et **c** de cinq pipe fissurées non réparées avec des fissures d'angles α différentes : 0° , 30° , 45° , 60° et 90°

La fissure d'une forme semi-elliptique est positionnée sur la surface externe de l'enveloppe avec : $2c = 15,4 \text{ mm}$ et $a = 2,8 \text{ mm}$

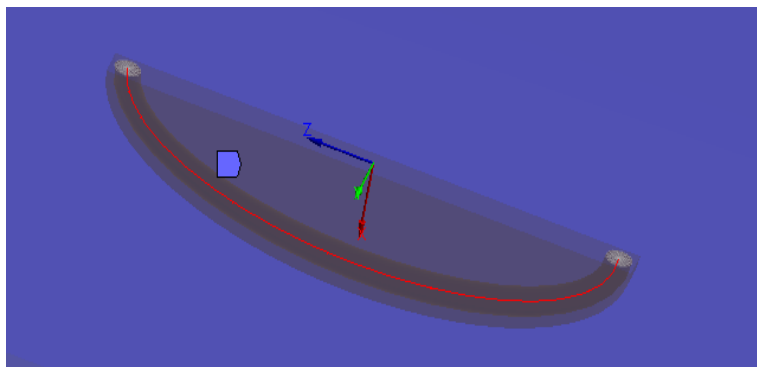
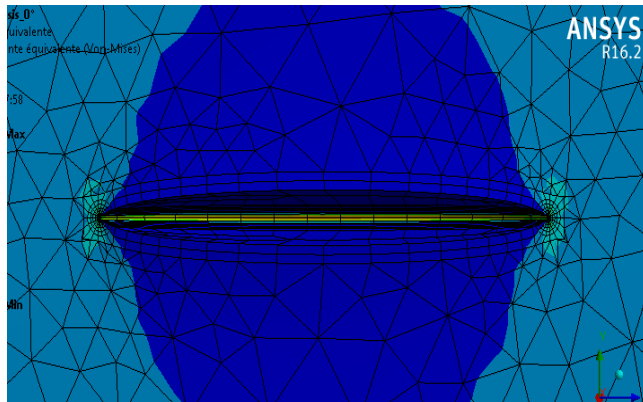
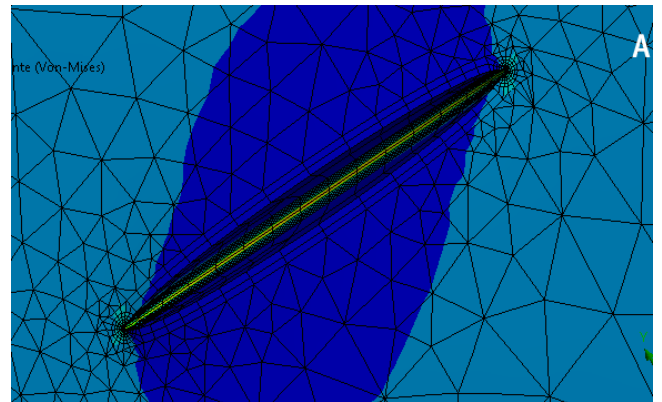


Figure IV.5 : Le fond d'une fissure de forme semi-elliptique sous ANSYS Workbench

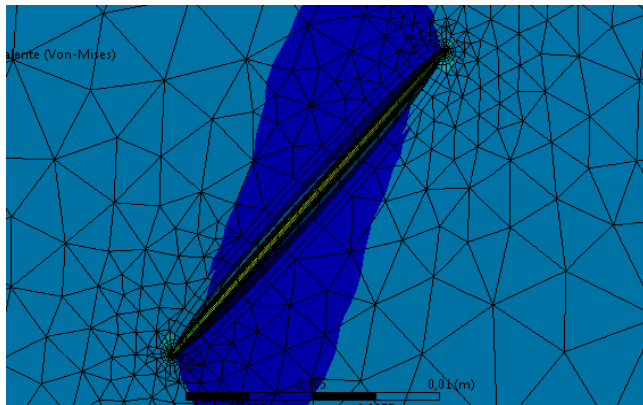
Une analyse quantitative a été réalisée, basée sur une échelle de couleurs visuelle progressive, prédéfinie par le logiciel utilisé, allant du bleu foncé (la valeur la plus petite) au rouge (la valeur la plus grande) comme le montre la figure ci-dessous.



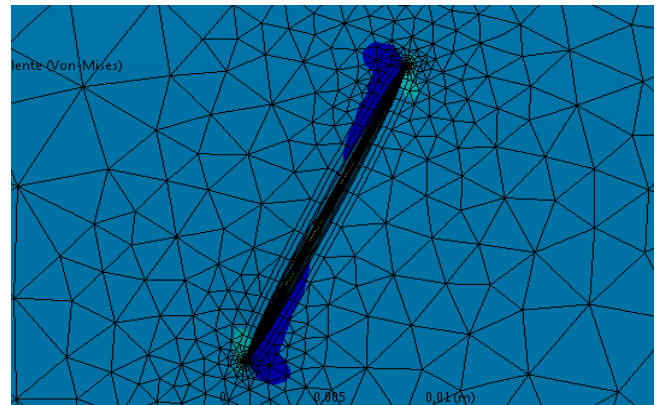
$\alpha = 0^\circ$



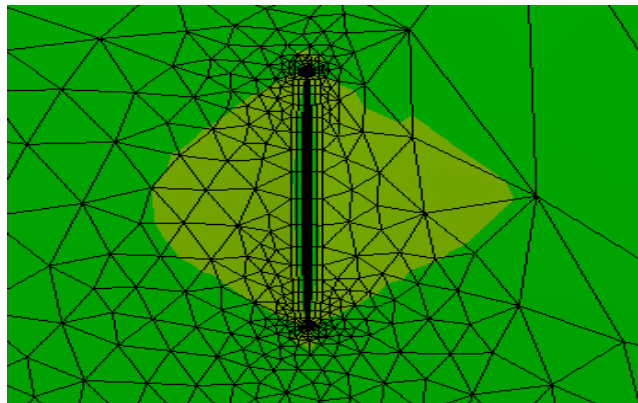
$\alpha = 30^\circ$



$\alpha = 45^\circ$



$\alpha = 60^\circ$



$\alpha = 90^\circ$

Figure IV.6 : Distribution des contraintes de Von-Mises au voisinage de la fissure

La figure IV.6 représente la répartition des contraintes de Von-Mises autour des cinq fissures modélisées sur un pipeline sous la même pression interne de 10 MPa.

On note que niveaux les plus élevés (*pour les cinq cas*) se situent aux fonds des fissures avec une concentration maximale au milieu. On remarque aussi qu'il y a une symétrie de la répartition des contraintes par rapport aux deux axes (*vertical et horizontal*).

Donc, l'orientation α de la fissure n'a pas d'effet significatif sur la position de contraintes Von-Mises maximales, mais pour les valeurs de ces contraintes, l'inclinaison les varie de manière considérable où le modèle avec un angle 0° enregistre les niveaux les plus élevés.

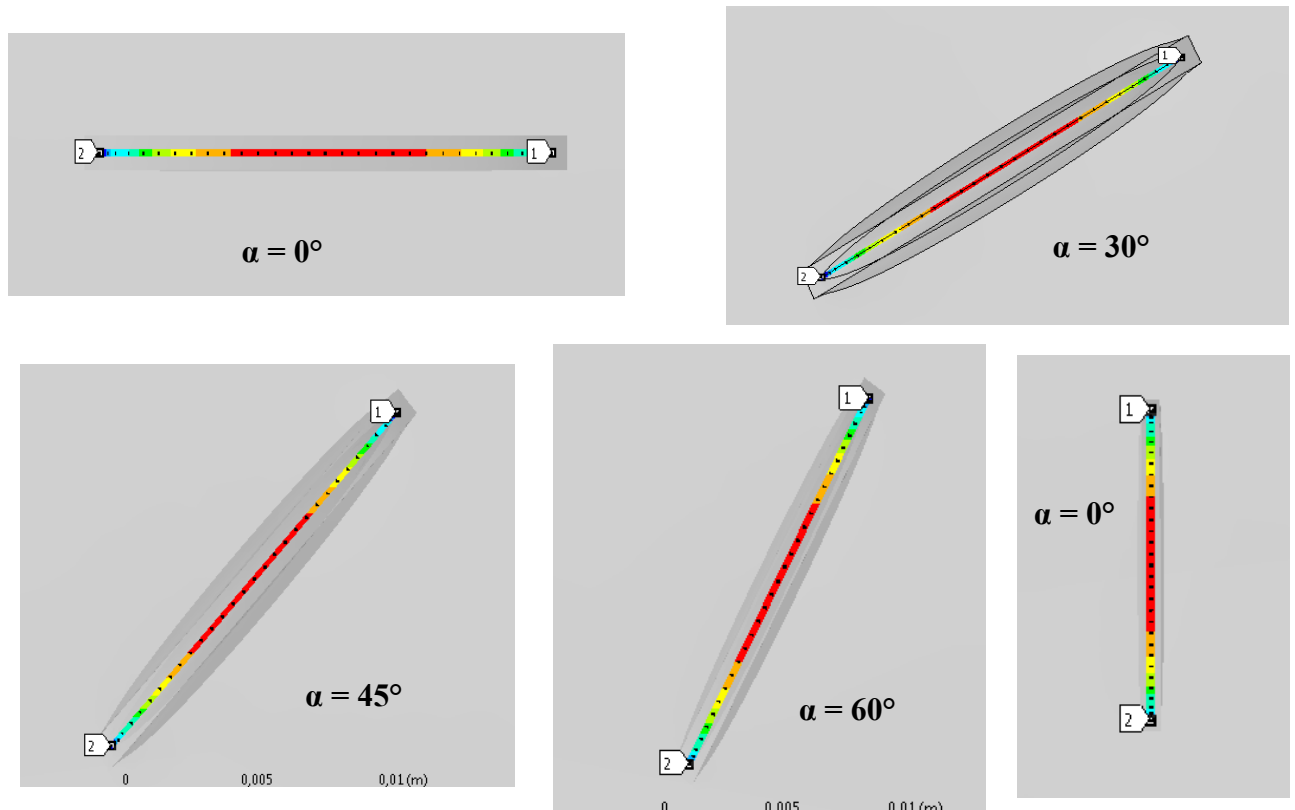


Figure IV.7 : Distribution du FIC KI au fond de la fissure

La figure IV.8 montre la distribution du facteur d'intensité de contraintes en mode I au fond de la fissure. On remarque qu'il y a une symétrie de la répartition de ce **FIC** par rapport au milieu où se trouvent les niveaux les plus élevés (**pour les cinq cas**).

La figure 8 montre, sous forme de courbes, les mêmes résultats précédents. Il est bien clair que l'orientation α de la fissure n'a pas d'effet sur la répartition des **KI** et le modèle avec un angle 0° enregistre les niveaux le plus élevé de ce facteur.

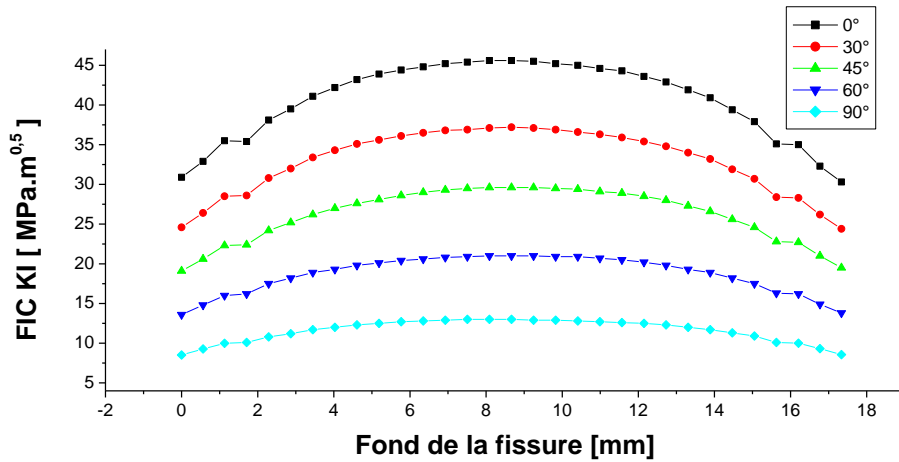


Figure IV.8 : Distribution du FIC KI au fond de la fissure pour les cinq angles α

Cette figure IV 9 montre la distribution du facteur d'intensité de contraintes en mode II au fond de la fissure. On remarque qu'il y toujours (*en valeurs absolues*) une symétrie de répartition du FIC rapport aux deux axes (**vertical et horizontal**). Il est remarquable aussi que l'orientation α de la fissure a des effets significatifs sur la répartition du FIC où sa distribution pour les *trois cas* avec 30°, 45° et 60° est différente à celle pour les deux cas avec 0° et 90° (voire la figure IV10). On note que l'effet de cisaillement n'a pas d'influence pour ces deux derniers cas.

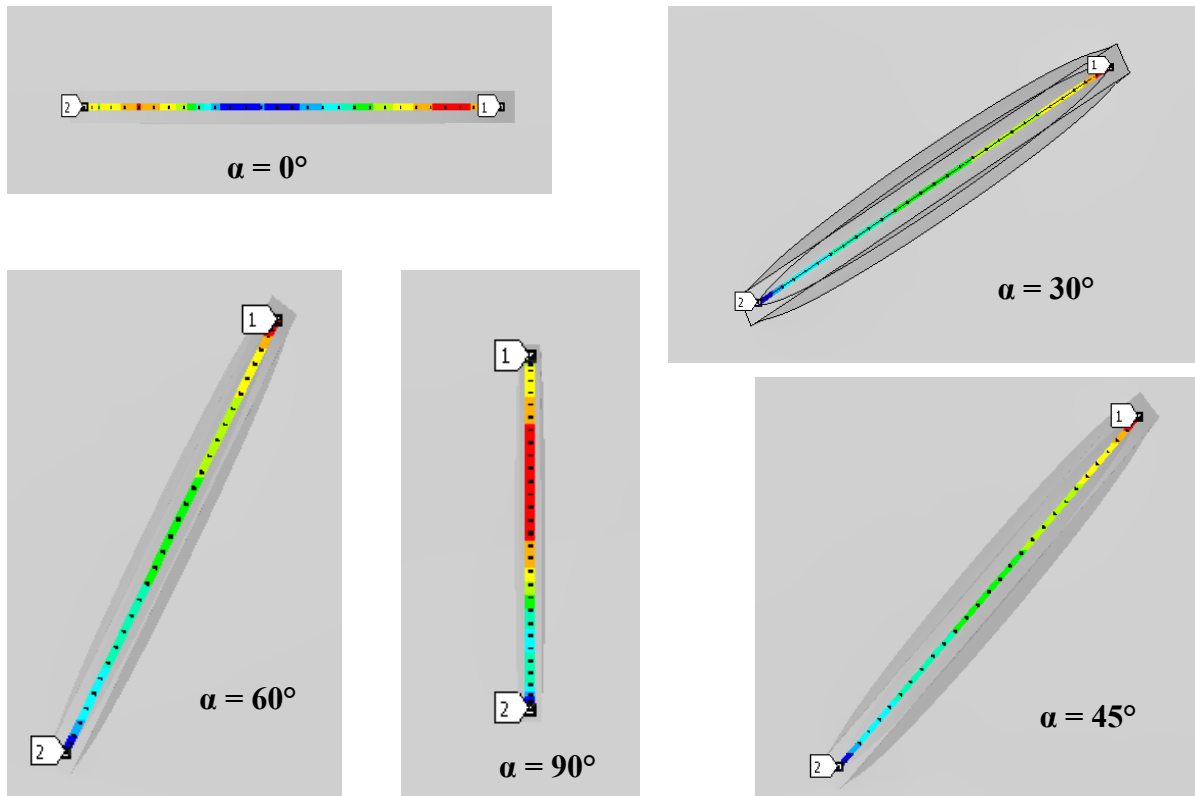


Figure IV.9 : Distribution du FIC KII au fond de la fissure

La figure ci-dessus montre la distribution du facteur d'intensité de contraintes en mode I au fond de la fissure. On remarque qu'il y a une symétrie de la répartition de ce **FIC** par rapport au milieu où se trouvent les niveaux les plus élevés (pour les cinq cas).

La figure 8 montre, sous forme de courbes, les mêmes résultats précédents. Il est bien clair que l'orientation α de la fissure n'a pas d'effet sur la répartition des **KI** et le modèle avec un angle 0° enregistre les niveaux le plus élevés de ce facteur

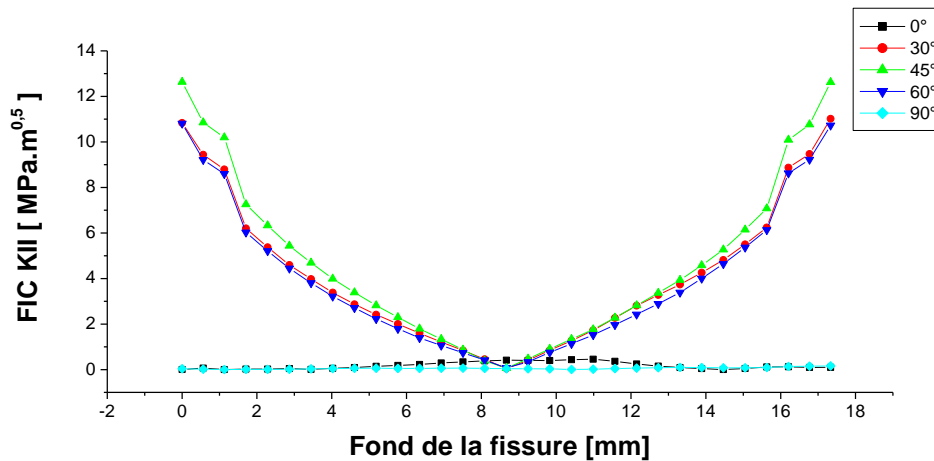


Figure IV.10 : Distribution du FIC KII au fond de la fissure pour les cinq angles α

La figure IV 11 représente la distribution du facteur d'intensité de contraintes en mode III au fond des cinq fissures avec différentes inclinaisons α . On remarque que la symétrie de répartition de l'intensité des **KIII** est toujours présente pour les cinq cas. On voit aussi que l'orientation α de la fissure a des effets significatifs sur la répartition du **FIC** où la distribution pour les *trois cas* avec 30° , 45° et 60° est différente à celle pour les deux autres cas avec 0° et 90° (voir la figure IV 12), on note aussi que l'effet de cisaillement n'a pas d'influence pour ces deux derniers cas.

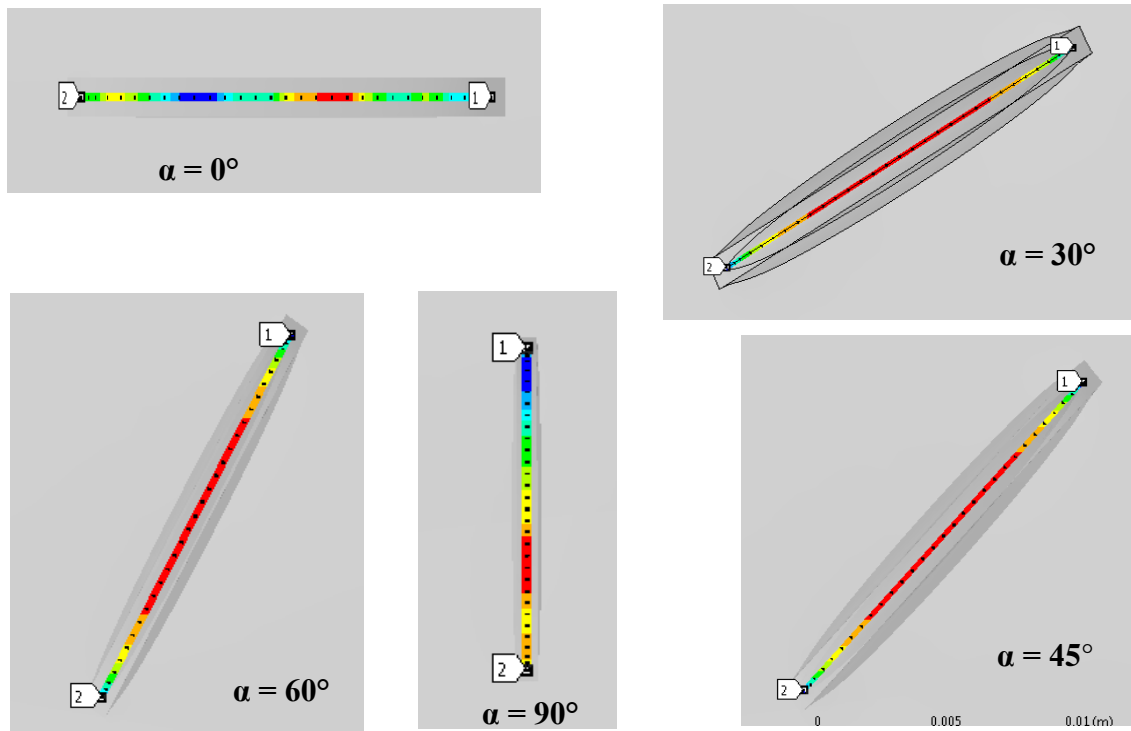


Figure IV.11 : Distribution du FIC KIII au fond de la fissure

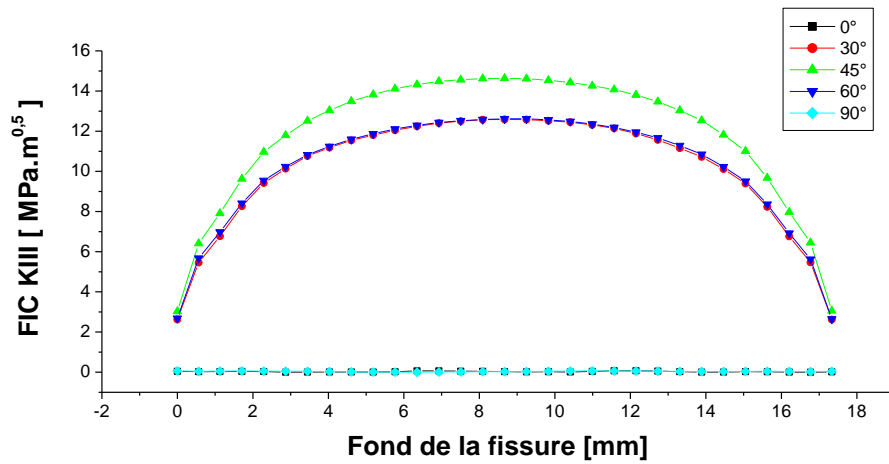


Figure IV.12 : Distribution du FIC KIII au fond de la fissure pour les cinq angles α

La figure IV 13 regroupe la distribution des **FIC KI**, **KII** et **KIII** tout au long du fond de la fissure pour chaque modèle analysé (pour les cinq pipes avec fissures d'orientation α différentes).

On note qu'il y a une répartition symétrique des FIC par rapport au milieu de la fissure et leurs comportements sont non linéaire dans les cinq cas. On remarque aussi que ces répartitions changent d'allures en fonction de l'angle α :

- pour les trois cas où les fissures sont inclinées de 30° , 45° et 60° , les niveaux les plus élevés sont enregistrés aux milieux de ces fissures pour le **KI** et le **KIII**, par contre ces niveaux on les trouve aux deux pointes des fissures pour le **KII** ;

- pour les deux autres cas, 0° et 90° , le **KI** garde la même allure (valeurs maximales au milieu de la fissure) et le **KII** et le **KIII** enregistre une trajectoire quasi-horizontale avec des niveaux négligeables par rapport à ceux des **KI**. On peut conclure que ces deux modèles de fissure sont contrôlés complètement par le mode I.

Sur la dernière figure qui regroupe les pics des **FIC** on remarque que, quel que soit l'orientation α , le fond de la fissure semi-elliptique enregistre les niveaux les plus élevés pour le mode I. Ainsi, le modèle avec la fissure longitudinale (avec un angle $\alpha = 0^\circ$) présente le cas le plus défavorable pour une pipe fissurée soumise à une pression interne, c'est le modèle qu'on va l'utiliser pour la suite de ce chapitre.

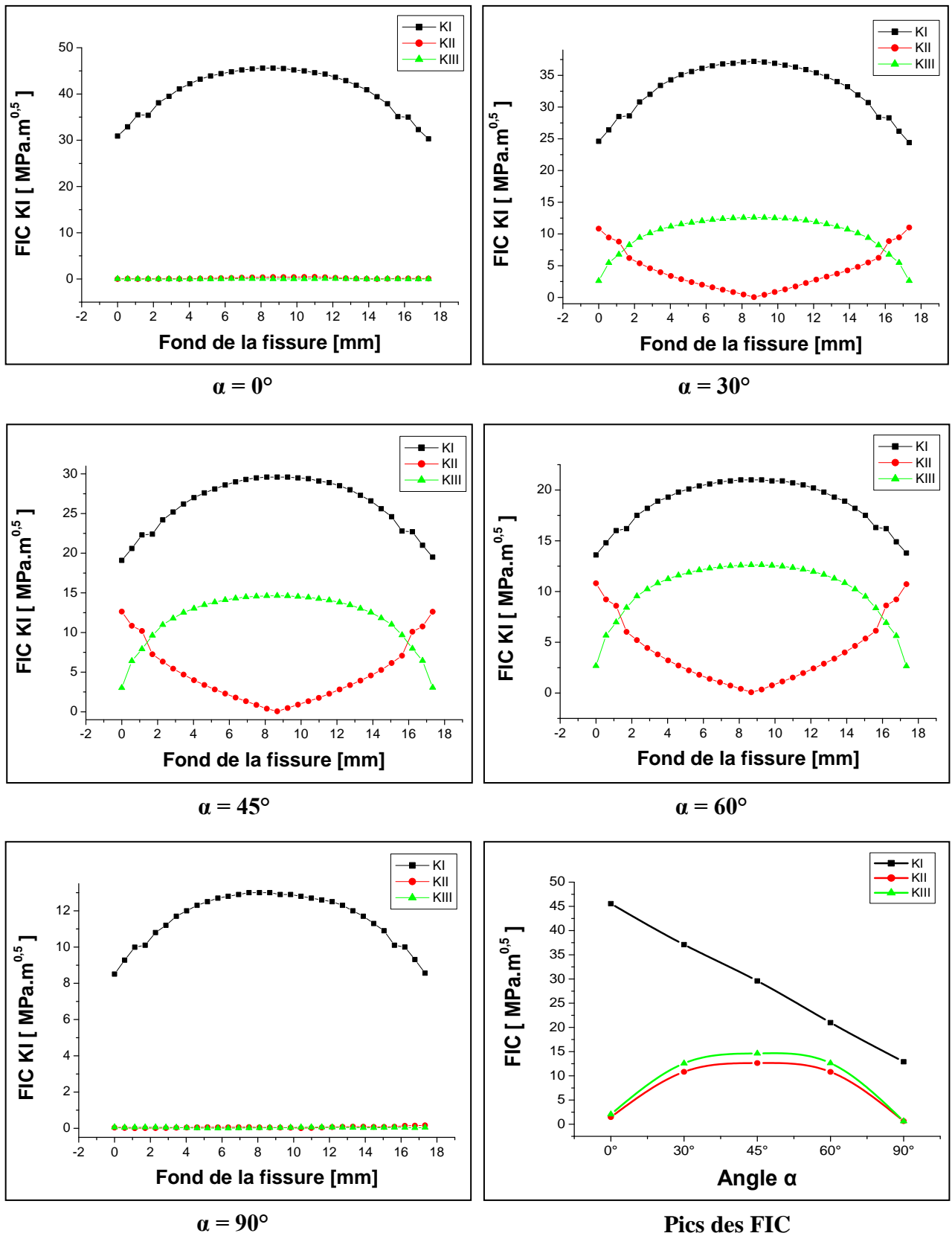


Figure IV.13 : Effet de l'orientation de la fissure sur les FIC pour les cinq modèles analysés

IV5.1.2. Effet de la longueur et de la profondeur de la fissure sur la variation du KI

Dans cette partie de ce chapitre, on va étudier les effets des propriétés géométriques de la fissure, en particulier sa longueur et sa profondeur, sur la variation du FIC en mode I pour le cas le plus défavorable trouvé précédemment d'une pipe fissurée.

On a utilisé la même pipe avec les mêmes conditions aux limites et le même cas de chargement avec fissures horizontales ($\alpha = 0^\circ$) de géométries différentes.

Les deux figures 14 et 15 montrent la variation du facteur d'intensité de contrainte au fond de la fissure en fonction des propriétés géométriques de la fissure (sa longueur et sa profondeur).

On remarque que la taille de la fissure (le rapport longueur/profondeur : c/a) affecte considérablement la répartition et les niveaux du **KI** :

- pour les fissures qui ont une forme quasi-circulaire ($c/a \approx 1$), le FIC garde un niveau stable tout au long de la fissure ;
- pour les fissures avec un ($c/a > 1,3$) on remarque que le **KI** enregistre les niveaux les plus élevés aux milieux des fissures. On note aussi que s'il y a une propagation de fissure, elle va commencer de ce milieu ;
- pour les fissures avec un ($c/a < 1$), une forme semi-elliptique où le grand axe est radial, on remarque que les valeurs les plus élevées du **KI** se trouvent aux deux pointes de la fissure. Contrairement au cas précédent, s'il y a une propagation de fissure, elle va commencer à ces deux extrémités.

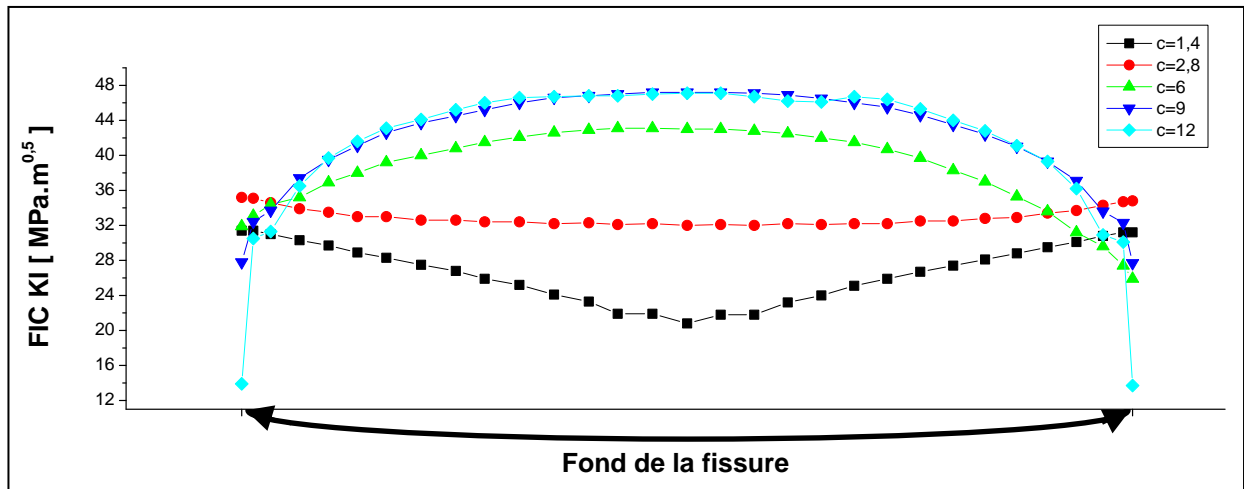


Figure IV.14 : Distribution du FIC KI au fond de la fissure en fonction de sa longueur c

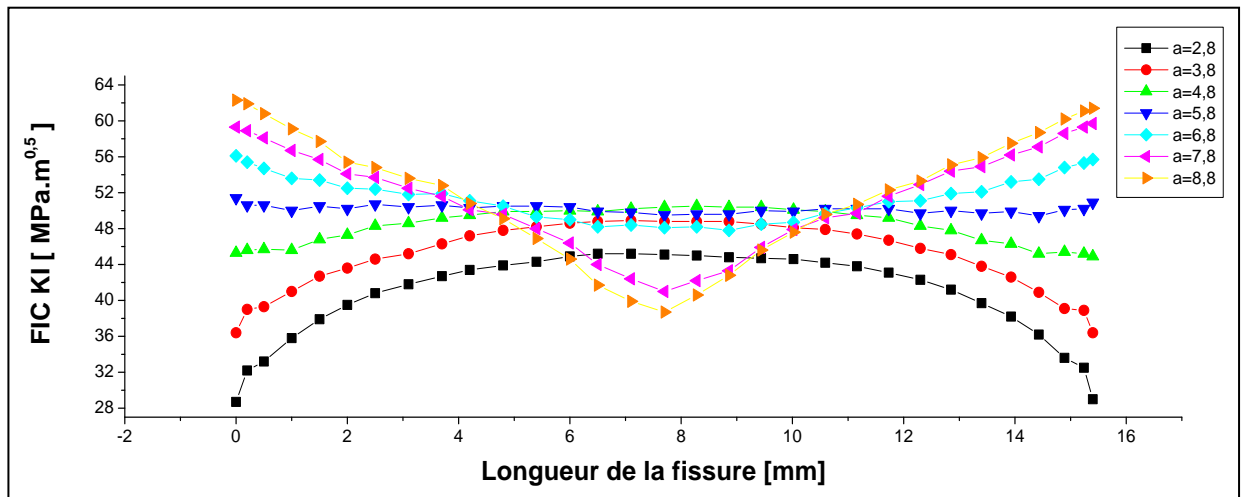


Figure IV.15 : Distribution du FIC KI au fond de la fissure en fonction de sa profondeur

Les deux figures ci-dessous regroupent (tirés des deux figures précédentes) les pics du facteur d'intensité de contrainte KI au fond de la fissure en fonction de ses propriétés géométriques (sa longueur et sa profondeur). A partir de ces deux courbes, on constate que le développement de la fissure nous donne des valeurs de KI plus importantes. On note également, d'après les résultats trouvés, qu'il existe un certain stade de propriétés géométriques (**rapport longueur/profondeur**) où la taille de la fissure ne présente pas d'effets significatifs sur la variation du FIC (**cercles en rouge**).

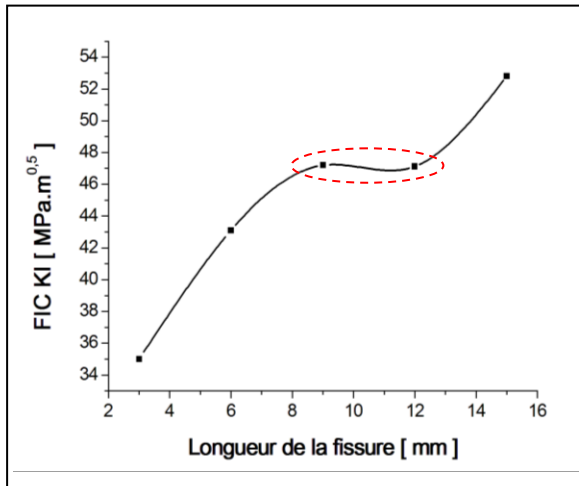


Figure IV.16 : Effet de la longueur de la fissure sur les niveaux du FIC KI

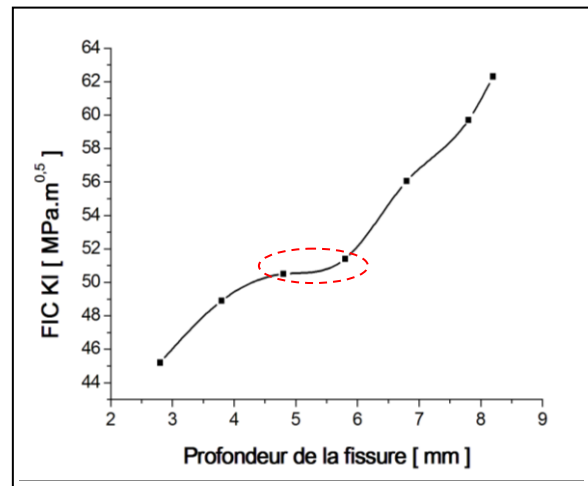


Figure IV.17 : Effet de la profondeur de la fissure sur les niveaux du FIC KI

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, la méthode des éléments finis tridimensionnels a été utilisée pour analyser une canalisation cylindrique, avec une fissure semi-elliptique, en acier API 5L X70 soumise à une pression interne.

L'étude a été focalisée sur l'évaluation des facteurs d'intensité de contrainte **FIC** pour les trois modes de rupture sous conditions géométriques différentes : variation de taille et d'orientation de la fissure.

Les conclusions suivantes peuvent être déduites des résultats obtenus :

- il y a toujours une répartition symétrique des contraintes autour de la fissure avec une concentration au milieu de son fond quelque soit son orientation α ;
- pour toutes les valeurs de α , le fond de la fissure enregistre les niveaux les plus élevés des **FIC** pour le mode I (**KI**) ;
- la fissure avec une orientation ($\alpha = 0^\circ$) présente le cas le plus défavorable ;
- les valeurs de **KI** augmentent avec le développement géométrique de la fissure.

Remarque :

Vue le cas exceptionnel qu'on vit avec les mesures lié au **covid-19**, en particulier le manque de transport inter-wilayas qui rendait le contact entre l'enseignant encadreur et les étudiants encadrés qui vivait dans des wilayas différentes impossible : on a trouvé des difficultés et de obstacles, où l'accompagnement à distance ne suffit pas, qui ont rendu le travail sur le reste de cette étude impossible :

On va limiter ce chapitre-là.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les pipes sont confrontées à des anomalies et contraintes qui si sont souvent indépendant du facteur humain peuvent en être affecté, des imperfections, inclusions ainsi que des impuretés sont d'abord la première cause de ces défauts constaté dans de nombreux cas. Les pipelines sont aussi soumis en service à des sollicitations mécaniques permanentes ou irrégulièrement, donnant lieu à des contraintes multiaxiales et à amplitudes variables, ce qui conduit à l'apparition des fissures provoquant leurs endommagements ou leurs ruptures.

Les principaux résultats de l'analyse montrent l'effet du nodule de patch sur le comportement de fracture du tube endommagé à l'aide d'un logiciel (ANSYS Wokbench)

Résultats obtenus numériquement par la méthode des éléments finis 3D

Ils nous permettent de conclure ce qui suit

L'épaisseur du patch composite influe positivement sur les contraintes à proximité de la fissure afin d'améliorer la durée de vie

L'épaisseur de l'adhésif doit également être améliorée pour permettre à la pression d'être transférée sur le patch afin d'empêcher l'adhésif de se fissurer en raison des pressions accrues dans la couche adhésive.

Enfin, à partir des résultats de nos simulations, nous pouvons conclure que la réparation de patch composé est très efficace et prometteuse pour la réparation de tubes métalliques.

Références bibliographiques

- [1] M.S.Mohamed. Comportement en rupture des pipelines sous pression interne réparés par des matériaux composites. Thèse de doctorat. Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès. 2018-2019.
- [2] A.benhamouda. Etude du comportement des fissures dans les tubes sous pression interne. Mémoire de magister. Université Mentouri Constantine.2010.
- [3] M.Yassine. Application de la méthode de collection de frontière au calcul du facteur d'intensité de contrainte en mode III. Mémoire de master. Université Saad Dahleb Blida.2014.
- [4] N.Bahria. Réparation d'un gazoduc corrodé par un système composite stratifié Thèse de doctorat. Université d'Oran Mohamed Boudiaf.2019.
- [5] M. Bonnet, A.Frangi. Analyse des solides déformables par la méthode des éléments finis. Tue le Livre. Editions de l'école polytechnique.2007.
- [6] H.Hamid. Analyse des éléments du revêtement des pipelines. Mémoire de master. Université Badji Mokhtar Annaba.2016.
- [7] M. Amine, B.Khalil. Evaluation de la réparation Par composite d'une pipe soumise à un chargement de pression. Mémoire de master. Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.2019.
- [8] T. Nateche. Réhabilitation et Renforcement des Canalisations sous pression en présence des défauts de surfaces. Thèse de doctorat. Université d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [9] B. Abdelghani. Contribution à l'étude des fissures de fatigue réparées par patch en composite. Thèse de doctorat. Université Djillali Liabès de Sidi BelAbbès .2017.
- [10] <http://www.aerospace-technology.com/projects/ariane5/>
- [11] http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Prepreg_Technology.pdf
- [12] <http://www.utwente.nl/ctw/pt/education/>
- [13] B. NEKKAA. Réparation d'un gazoduc corrodé par un système composite stratifié. Thèse de doctorat. Université d'Oran Mohamed Boudiaf. 2019.
- [14] M. Robert, J. Mechanics of Composite, Francis and Taylor Inc Philadelphia. 2nd Edition 1999.

- [15] J.M. Bertholot. Matériaux Composites, Comportement mécanique et analyses des structures. Édition MASSON, Paris. 1992.
- [16] C. Pervite. La Conception Structurale Préliminaire De Navires En Ames Sandwich, la construction navale en composite. Article. Décembre1992.
- [17] D.M.K.C.laure. Modélisation de la réparation par composite d'une fissure circonférentielle dans un pipeline API X60. Mémoire de master. Universitaire d'Ain Témouchent.2017
- [18] Miranda, A.C.O., Meggiolaro, M.A., Castro, J.T.P., Martha, L.F., Bittencourt, T.N., Fatigue life and crack path predictions in generic 2D structural components, Eng. Fract. Mech., 70 (2003) 1259–1279.
- [19] de Oliveira Miranda, A.C., Meggiolaro, M. A., de Castro, J. T. P., Martha, L. F., Fatigue life prediction of complex 2D components under mixed-mode variable amplitude loading, Int. J. Fatig., 25 (2003) 1157–1167.
- [20] C.Natividad, R. García, V. H. López, A. Contreras, M. Salazar, Metallurgical characterization of API X65 steel joint welded by MIG welding process with axial magnetic field, Journal Of Materials Research, vol.20 (2017), n.5, pp.1174-1178. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2016-0182.