

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Construction mécanique  
Thème

## Etude a la fatigue d'une réparation par patch

**Présenté Par :**

- 1) M. BENTOUILA Mohammed Ibrahim
- 2) M. SABRI Mohamed Mehdi

**Devant le jury composé de :**

Pr OUDAD Wahid	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr DJEBBAR Nour Eddine	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr BAHRAM Kaddour	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

*Année Universitaire 2021/2022*

## Remerciements

Tous d'abord, rendons grâce à ALLAH tout puissant et miséricordieux de nous avoir insufflé suffisamment de force, de volonté et de courage pour achever ce modeste travail.

Nos vifs remerciements s'adressent à notre encadreur **Dr K.BAHRAM** pour son dévouement et sa disponibilité, sa confiance, sa patience et ses aides précieuses, ses encouragements qui nous ont permis de réaliser ce travail.

Nous exprimons notre gratitude aux membres de jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail ; notamment le **professeur OUDAD** en sa qualité de président de jury et **Docteur DJEBBAR** en sa qualité d'examineur

Un remerciement très spécial au **Dr F.BOUAFIA** pour son aide et précieux conseils.

Ainsi que tous nos professeurs de département de génie mécanique.

---

Dédicace

Je dédie ce modeste Spécialement :

A mes parents ;

À mon binôme BENTOUILA MOHAMED IBRAHIM ;

Et toute ma grande famille ;

A tous ceux qui m'ont aidé et fait confiance à moi ;

Mehdi...

Je dédie ce modeste travail :

A mon binôme SABRI MOHAMED MEHDI ;

A mes parents, mes cher frères et sœurs ;

A ma petite famille, mes proches amis ;

A tous ceux que j'aime ;

Ibrahim...

---

## Résumé

Dans de nombreuses industries, lorsque le remplacement d'une pièce n'est pas possible ou économique couteux, la réparation est l'une des meilleures méthodes pour réparer les pièces métalliques. La réparation avec un patch composite est un domaine très répandu pour prolonger la durée de vie des composants fissurés.

Cette technique est plus efficace structurellement avec moins de dommages sur la structure que les autres. Le patch collé offre de nombreux avantages par rapport à un doubleur fixé mécaniquement, notamment un meilleur comportement à la fatigue, une réduction de la corrosion et une conformité facile aux contours aérodynamiques complexes.

Dans cette mémoire, nous avons essayé d'étudier en fatigue l'influence de la réparation par patch sur la durée de vie du matériau, sous différentes configuration et orientation de patch, nous avons utilisé le logiciel AFGROW afin de faire tout les simulations de réparation par patch en fatigue.

***Mots clés : Patch composite, réparation de fissures, défauts, durée de vie***

---

Abstract

In many industries, when replacing a part is not possible or economically expensive, repair is one of the best methods for repairing metal parts. Repair with a composite patch is a popular area for extending the life of cracked components.

This technique is more structurally efficient with less damage to the structure than the others. The bonded patch offers many advantages over a mechanically fastened double , including improved fatigue behavior, reduced corrosion, and easy conformance to complex aerodynamic .

In this memory, we tried to study in fatigue the influence of repair by patch on the life of the material, under different configuration and orientation of patch, we used the AFGROW software in order to do all the repair simulations per fatigue patch.

***Keywords: Composite patch, repair of cracks, defects, service life***

---

## المخلص

في العديد من الصناعات ، عندما يكون استبدال جزء غير ممكن أو مكلف اقتصاديًا ، يعد الإصلاح أحد أفضل الطرق لإصلاح الأجزاء المعدنية. الإصلاح باستخدام التصحيح المركب هو مجال شائع لإطالة عمر المكونات المتشققة. هذه التقنية أكثر كفاءة من الناحية الهيكلية مع أضرار أقل للهيكل من غيرها. توفر الرقعة المستعبدة العديد من المزايا على المضاعف المثبت ميكانيكيًا ، بما في ذلك سلوك التعب المحسن ، والتآكل المنخفض ، والتوافق السهل مع الخطوط الأيروديناميكية المعقدة.

في هذه المذكرة ، حاولنا أن ندرس في حالة اجمهاد تأثير الإصلاح عن طريق التصحيح على حياة الهيكل ، وفي ظل تكوين وتوجيه مختلفين للرقعة ، استخدمنا برنامج Afgrow من أجل إجراء جميع عمليات محاكاة الإصلاح لكل رقعة في حالة اجمهاد.

الكلمات المفتاحية: التصحيح المركب ، إصلاح الشقوق ، العيوب ، عمر الخدمة

## Table des matières

Remercîments

Dédicace

Résumé

Abstract

المخلص

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale

**Chapitre I : Mécanique de la rupture**

I.1	Mécanique de propagation d'une fissure : .....	3
I.2	Modes de ruptures : .....	4
I.3	Facteur d'intensité des contraintes : .....	5
I.4	Influence des différents paramètres.....	7
I.4.1	L'épaisseur des matériaux: .....	7
I.4.2	Essais de ténacité à la rupture par déformation plane : .....	8
I.5	Résistance a la fatigue .....	9
I.5.1	Courbe S-N ou la courbe de Wöhler:.....	9
I.5.2	Les trois domaines de la courbe de Wöhler: .....	11
I.6	Propagation de fissure : .....	14
I.6.1	Description des courbes de propagation des fissures : .....	14

**Chapitre II : Comportement mécanique des pipelines**

II.1	Les types des pipelines .....	20
II.2	Matériaux des pipelines .....	20
II.3	Évolution des caractéristiques mécanique et dimensionnelle : .....	21
II.3.1	Les aciers: .....	22
II.4	Les défauts dans les pipelines :.....	23
II.4.1	Corrosion dans les pipelines : .....	23
II.4.2	Défaut d'enfoncement : .....	25
II.4.3	Les éraflures : .....	26
II.4.4	Les fissures: .....	28
II.4.5	Les défauts dans les soudures .....	30

**Chapitre III : Réparation par patch composites des fissures**

III.1	La Composition Du Patch Composite : .....	35
III.2	Avantages Des Composites : .....	36
III.3	Domaines d'applications des matériaux composites : .....	36
III.3.1	Industrie Aérospatiale : .....	37
III.3.2	Industrie Des Articles De Sport Et De Loisir : .....	38
III.4	Effet des propriétés mécaniques : .....	39
III.4.1	Effet des propriétés mécaniques du patch : .....	39
III.4.2	Effet des propriétés mécaniques de l'adhésif : .....	41
III.4.3	L'orientation Des Fibres Du Composite : .....	43
III.4.4	Le Nombre Des Couche Du Patch : .....	44
III.4.5	Effet de la forme du patch : .....	46

**Chapitre IV : Simulation**

III.5	Présentations du logiciel : .....	51
III.6	Les propriétés mécaniques : .....	52
III.7	Présentation du modèle géométrique : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.8	Influence du rapport de charge sur la durée de vie : .....	54

III.9 Influence de la réparation sur la durée de vie :.....	54
III.10 Influence de l'orientation des fibres sur la durée de vie réparation (simple et double) :.....	55
<b>Conclusion Générale et Perspectives :.....</b>	<b>58</b>
<b>Référence bibliographique: .....</b>	<b>59</b>

---

## Liste des figures

Figure 1: Representation Schematique De La Propagation D'une Fissure.[4] .....	3
Figure 2 : Les 3 Modes De Rupture[5] .....	5
Figure 3 : Contraintes Pres De L'extremite D'une Fissure[8]. .....	6
Figure 4 : Represente L'impact D'epaisseur D'une Eprouvette Sur La Tenacite A La Rupture[9].....	8
Figure 5 : Courbe De Wöhler[11]. .....	10
Figure 6 : Charges Appliquees (Traction -Compression/Torsion/Flexion.....	10
Figure 7 : Parametres De La Sollicitation. ....	11
Figure 8: Accommodation.....	11
Figure 9:Rochet.....	12
Figure 10: Adaptation.....	13
Figure 11 : Longueur De Fissure En Fonction Du Nombre De Cycles[12].....	15
Figure 12 : Courbe De Propagation En Fatigue Typique D'une Fissure Longue[12]. ....	16
Figure 13: Pipeline Dans L'environnement [13]. ....	20
Figure 14: Caracteristique Des Tubes [14]. ....	21
Figure 15:Microstructure Ferrito-Perlitique De L'acierapi5lx70 [14].....	23
Figure 16: Types De Corrosion[17] .....	24
Figure 17: Defaut D'enfoncement[17].....	25
Figure 18: Geometrie Et Caracterisation Des Enfoncements[17].....	26
Figure 19: Choc Provoque Par Un Engin De Chantier[17].....	27
Figure 20: Geometrie Et Caracterisation Des Eraflures[17].....	27
Figure 21: Defauts Combines (Enfoncements Eraflures)[17].....	28
Figure 22 : Fissure Dans Les Joints De Soudure.[19].....	29
Figure 23 : Mode De Rupture D'une Canalisation Dans Le Cas D'une Fissuration Longitudinale[20] .....	29
Figure 24:Geometrie D'un Tube Avec Une Fissure Circonférentielle.[20].....	30
Figure 25: Fissure Longitudinale[21].....	30
Figure 26: Fissure Transversale[21].....	31
Figure 27: Effet Des Defauts De Soudure Sur La Vie De Propagation De Fissure De Fatigue[17]......	32
Figure 28 : Application D'un Patch Composite Pour Le Renforcement Du Pont.[22] .....	36
Figure 29: Repartition Des Materiaux Composites Dans L'a380..(A) Et Dans Le B787(B), [23]......	37
Figure 30:Maillage De La Plaque Non Renforcee[24] .....	39
Figure 31:Maillage De La Plaque Renforcee Avec Raidisseur[24] .....	40
Figure 32:Maillage De La Plaque Reparee Avec Raidisseur Et Patch Sur La Face Opposee.[24].....	40
Figure 33 : Comparaison De Renforcement Par Raidisseur Et Par Patch+ Raidisseur.....	41
Figure 34: Effet De Module De Cisaillement De L'adhesif Sur Les Valeurs De Fic[23]. .....	42
Figure 35:Évolution De Fic En Fonction De Module De Cisaillement De L'adessif [23]. ....	43
Figure 36: L'effet De L'orientation Des Fibres D'un Patch Octogonal Sur La Reduction Du Fic[25]......	43
Figure 37: Geometrie Et Chargement De La Structure Patchee D'un Seul Cote [23].....	44
Figure 38: Longueur De Fissure En Fonction Du Nombre De Cycles Obtenus A Partir Du Experimentations Pour Panneaux Repares Et Non Repares, (D'epaisseur=2.29)[26] .....	45
Figure 39: Longueur De Fissure En Fonction Du Nombre De Cycles Obtenus A Partir Du Experimentations Pour Panneaux Repares Et Non Repares, (D'epaisseur=6.35)[26] .....	45
Figure 40: L'effet De Nombre De Couche Sur La Duree De Vie D'une Plaque Reparee[28] .....	46

Figure 41 : Effet De La Nature Du Patch Sur L'evolution Du Facteur D'intensite De Contrainte [29] .....	46
Figure 42 : Influence De La Forme Du Patch Sur Le Fic[30].....	47
Figure 43 : Effet De La Geometrie Sur L'evolution Du Parametre D'efficacite Du Patch[31] .....	47
Figure 44: Interface Du Logiciel Afgrow .....	52
Figure 45 : Model Geometrique .....	53
Figure 46 : Represente La Variation De L'avancee De Fissure (M) En Fonction De Nombre De Cycles (N) (Sans Reparation).....	54
Figure 47 : Avancee De Fissure En Fonction De Nombre De Cycle (Sans Reparation) Et (Avec Reparation).....	55
Figure 48 : Type De Patch (Simple (B) / Double (A)).....	56
Figure 49 : Orientation : A (0°), B (90°).....	56
Figure 50 : Orientation : C (22.5°), D (-22.5) .....	57
Figure 51 : Orientation : E (45°), F (-45°) .....	57
Figure 52 : Orientation : G (67.5°), H (-67.5°) .....	58
Figure 53 : Represente La Variation De L'avancee De Fissure(M) En Fonction De Nombres De Cycles Sous L'influence De Differentes Orientations Des Fibres (Reparation Simple /Double).....	59

---

## **Liste des tableaux**

Tableau 1 : Les Mecanismes De Corrosion Des Pipelines.....	25
Tableau 2 : Dimensions Et Proprietes Des Materiaux. ....	41
Tableau 3 : Proprietes Mecaniques Du Materiau .....	52
Tableau 4 : Proprietes Mecaniques De L'adhesive .....	53
Tableau 5 : Proprietes Mecaniques Du Patch.....	53
Tableau 6 : Recapitulatif Des Resultats .....	55
Tableau 7 : Represente Les Differentes Combinaisons Etudiees.....	58

## Liste des abréviations

$\sigma_e$ :	la limite d'élasticité du matériau
$\Delta K_{\text{seuil}}$	facteur d'intensité de contrainte de seuil
$A_0$	Longueur de fissure initiale
$B$ :	l'épaisseur minimale nécessaire
$b$ :	Exposant de Basquin
CMOD :	la charge et le déplacement de l'ouverture de la fissure
CT :	Éprouvette compact tension
DTA	la tolérance aux dommages
$E_p$ :	La déformation plastique
$f_{(a/w)}$ :	Le facteur de géométrie
$f_{ij}^{(I,II,III)}$	des fonctions dépendant de l'angle polaire $\theta$
FE	les éléments finis
FIC :	facteur d'intensité de contrainte
K:	facteur d'intensité
KIC :	la ténacité du matériau
$KI_{\text{sec}}$ :	La valeur critique du facteur d'intensité
$K_c$ :	Valeur critique du facteur d'intensité de contraintes
$K_{\text{max}}$ :	Le facteur d'intensité de contrainte maximale
$K_{\text{min}}$ :	Le facteur d'intensité de contrainte minimum
$N$ :	Nombre de cycles à la rupture
PEHD :	Polyéthylène Haute Densité
$r, \theta$ :	Coordonnées polaires
SENB :	La courbure d'entaille à un seul bord
$w$ :	la largeur de l'éprouvette
$Y$ :	facteur géométrique (Coefficient de correction)
$\Delta\sigma$ :	Amplitude du chargement global
$\sigma_D$ :	Limite d'endurance en traction
$K_Q$ :	ténacité provisoire
$\sigma_{ij}$	Champ de contrainte
$\sigma_a$ :	L'amplitude de la contrainte
$\sigma_c$ :	La Contrainte élastique

---

## Introduction générale

L'une des meilleures méthodes pour réparer les pièces métalliques et composites consiste à utiliser des patchs composites. Cette méthode présente de nombreux avantages par rapport aux autres méthodes de réparation. Le patch composite améliore le comportement à la fatigue, réduit la corrosion et se forme facilement [1].

Bien que l'utilisation des patchs composites remonte à il y a 30 ans, elle n'est maintenant approuvée que pour quelque domaine, car les raisons de l'échec du patch incluent une augmentation du FIC sur la plaque principale et une augmentation de la contrainte de cisaillement dans l'adhésif, ce qui laisse l'absorption d'humidité[2].

Les réparations basées sur des patchs composites collés ou des renforts sont attrayantes pour de nombreuses applications de réparation de cellule car, comparées aux techniques de réparation traditionnelles basées sur des patchs métalliques fixés mécaniquement, elles offrent des réparations moins chères, plus rapides et plus durables

D'autres avantages incluent un transfert de charge plus uniforme et efficace dans le patch, des concentrations de contraintes réduites, des patchs plus minces, une application facile en particulier pour les surfaces à double courbure et un risque réduit de corrosion. De plus, pour certaines applications, le patch composite collé peut être la seule alternative au remplacement coûteux des composants. Pour une réparation par patch composite, le matériau du patch, la forme et les dimensions du patch, le nombre de plis, y compris la séquence d'empilement, le matériau adhésif et son épaisseur doivent être sélectionnés. Pour le calcul des dimensions des patchs, méthodes analytiques et numériques basées sur des équations et une analyse par éléments finis ou par éléments aux limites, respectivement, ont été développées[3].

Dans ce qui suit, nous allons essayer de maitre plus de lumière sur la répartition par patch tout en utilise le logiciel de simulation en fatigue AFGROW.

Le mémoire va être principalement divise en deux parties, une première partie dédiée à une large étude bibliographique composé de trois petits chapitres, et une deuxième partie à la partie simulation numérique avec le logiciel Afgrow.

# **Chapitre I**

## **Mécanique de la rupture**

### I.1 Mécanique de propagation d'une fissure :

On peut caractériser le comportement de la fissure par la relation entre la profondeur de la fissure  $a$  et le nombre de cycles  $N$ , décrivant ainsi la totalité de la propagation, depuis le début de la propagation jusqu'à la rupture.

La figure 1 représente schématiquement ce comportement, l'évolution d'une fissure de fatigue peut être divisée en trois phases :

- L'initiation (ou amorçage) de la fissure
- La propagation stable et la propagation rapide, conduisant à la rupture de l'élément.
- La propagation rapide

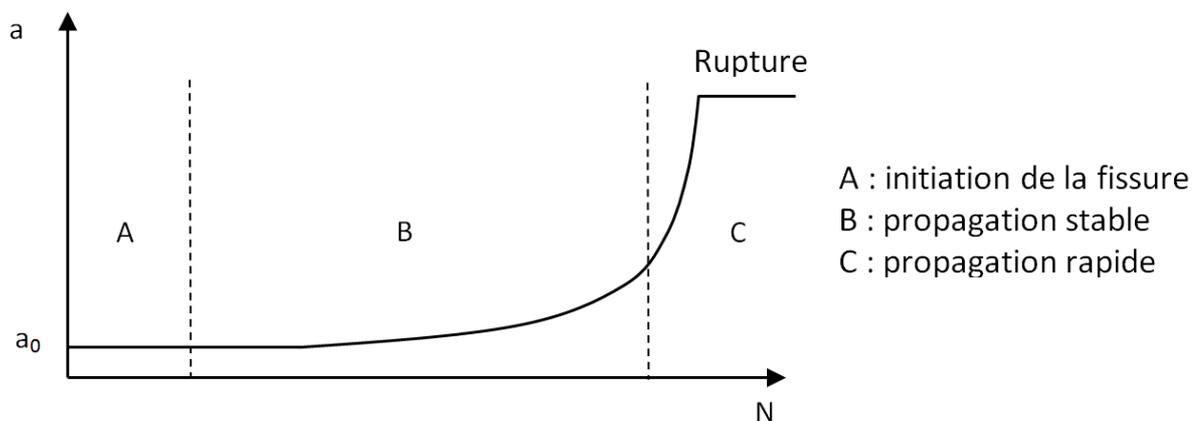


Figure 1: Représentation schématique de la propagation d'une fissure.[4]

- L'amorçage (ou amorçage) d'une fissure : (Phase A) dépend principalement de la différence de contrainte  $\Delta\sigma$ , du facteur de concentration de contrainte (facteur qui « normalise » la forme du détail), de la microstructure du matériau, de la contrainte moyenne et l'environnement. Plusieurs modèles ont été développés pour tenter d'expliquer ce phénomène. Certains de ces modèles sont spécifiquement décrits dans (Figure 1). De manière générale, divers auteurs admettent que la phase d'amorçage est complète lorsque la fissure atteint une certaine taille  $a_0$ , souvent de 0,1 mm à 0,25 mm. Pendant longtemps, la plus petite taille de fissure observable était de 0,1 mm.
- La propagation stable (Phase B) : est principalement affectée par la différence de contrainte  $\Delta\sigma$ , la forme des détails et la forme de la fissure. Il a moins de structure matérielle, un stress modéré et un impact environnemental. Plusieurs modèles ont été développés pour représenter le comportement des fissures à ce stade.

- Propagation rapide : conduisant à la rupture d'éléments (Phase C). Le nombre de cycles ici est très faible et la propagation est très rapide. Il convient également de mentionner que la rupture fragile peut survenir à tout moment, et pas seulement après une phase de propagation rapide. Les petites fissures provoquent souvent une rupture fragile. Après une étape de propagation rapide, il se produit une rupture ductile qui ne peut être expliquée par la mécanique de la rupture élastique linéaire traditionnelle.

La rupture fragile peut théoriquement se produire sans fissures, mais la plupart des ruptures fragiles dans la construction sont causées par des fissures, donc seul ce cas sera discuté ci-dessous. Les aciers de construction (hors aciers précontraints) sont des aciers dont la limite d'élasticité est inférieure à 700 MPa (généralement 235 à 460 MPa). Cette faible résistance est associée à la ductilité élevée (déformation à la rupture  $A \approx 15-20\%$ ) requise pour les applications structurelles de ces aciers et à la ténacité assez élevée ( $K_{Ic} > 80-100 \approx \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) qui le distingue. Un m. Pour éviter les dommages fragiles sans défauts initiaux.[4]

## 1.2 Modes de ruptures :

Toute ouverture de fissure peut être ramenée à la superposition de trois modes élémentaires

Figure 2 :

- **Le mode I (ou mode d'ouverture)** : où les lèvres de la fissure se déplacent dans des directions opposées, perpendiculairement au plan de fissuration,
- **Le mode II (ou mode de cisaillement dans le plan)** : où les lèvres de la fissure se déplacent dans le même plan, dans une direction perpendiculaire au front de fissure,
- **Le mode III (ou mode de cisaillement hors plan)** : où les lèvres de la fissure se déplacent dans le même plan, dans une direction parallèle au front de fissure

Notons que dans le cas des modes II et III, les lèvres de la fissure restent en contact et entraînent donc des frottements qui diminuent l'énergie disponible pour la propagation de fissure. Ces deux modes sont ainsi généralement moins dangereux que le mode I.[5]

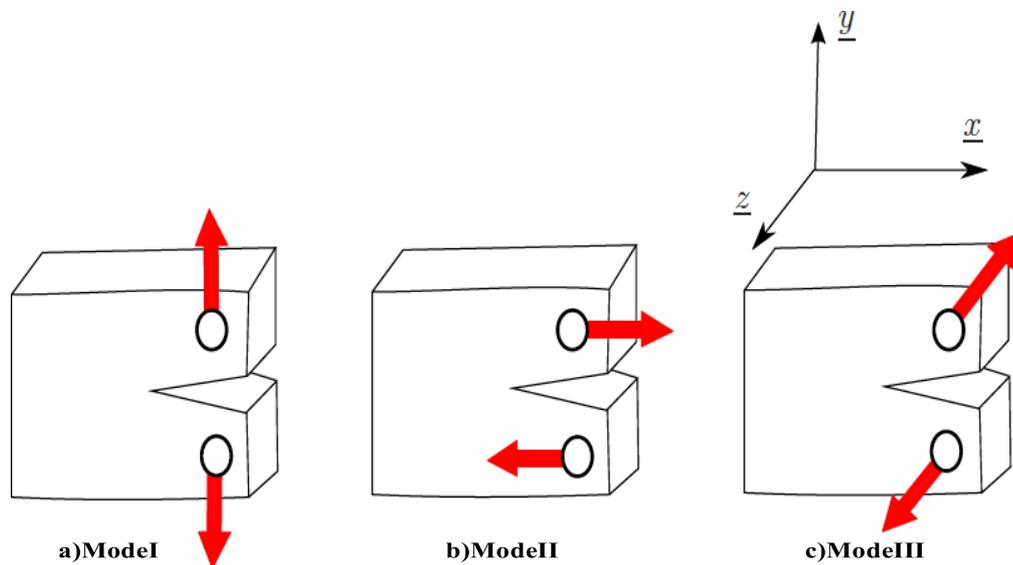


Figure 2 : les 3 modes de rupture[5]

### I.3 Facteur d'intensité des contraintes :

Irwin [6], considère un solide de comportement élastique linéaire et comporte une fissure. Il montre que le champ de contraintes au voisinage de la fissure peut être défini uniquement par un paramètre  $K$  appelé facteur d'intensité de contrainte. La rupture peut intervenir lorsque  $K$  atteint une valeur critique  $K_c$ . En utilisant les fonctions de Westergaard [7], il est possible de décrire le champ de contraintes à une distance  $r$  de la pointe de la fissure Figure 3. L'expression générale de ce champ est de la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (1)$$

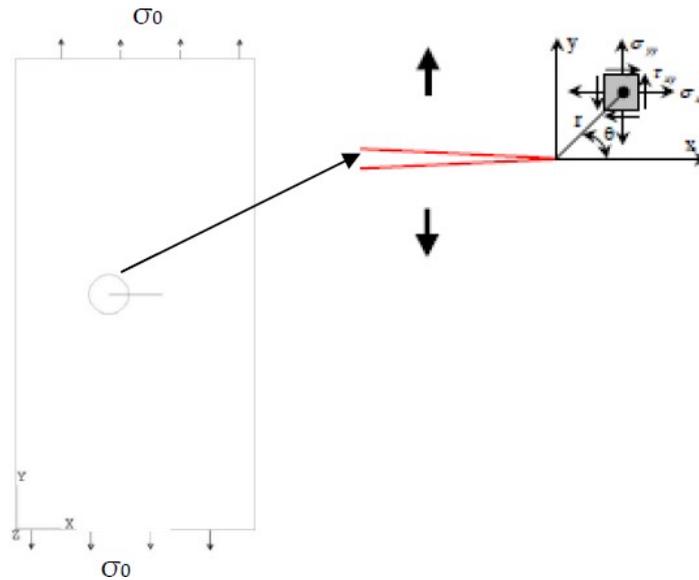


Figure 3 : Contraintes près de l'extrémité d'une fissure [8].

Où:  $r$ , sont les coordonnées polaires du point considéré,  $K$  est le facteur d'intensité de contraintes, qui vaut ici  $\sigma\sqrt{\pi a}$  et contient à la fois l'information sur le niveau de chargement et sur la dimension de la fissure.

Comme le facteur d'intensité de contraintes  $K$  définit le champ de contraintes au voisinage de la fissure, Irwin [6] a postulé que la condition  $K \geq K_c$  représentait un critère de rupture,  $K$  et  $K_c$  sont donnés par les relations suivantes:

$$K = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad ; \quad K_c = Y_c \cdot \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$\sigma_c$  est la valeur atteinte par la contrainte appliquée à la rupture, et  $Y$  est un facteur géométrique (Coefficient de correction) prenant compte les dimensions finies et la géométrie de l'éprouvette. Ce paramètre est donné pour chaque type d'éprouvette sous forme d'une fonction polynomiale de  $(a/w)$ , où  $w$  est la largeur de l'éprouvette.

En utilisant la méthode de Westergaard [7], Irwin [6] montre que les principales composantes des contraintes au voisinage de la pointe de fissure, correspondant aux trois modes de déplacements, peuvent être exprimées par:

— **En mode I :**

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{cases} \quad (3)$$

— **En mode II :**

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[ 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \end{cases} \quad (4)$$

— **En mode III :**

$$\begin{cases} \tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \\ \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Dans le cas général (présence des trois modes) le champ de contrainte prend la forme suivante:

$$\sigma_{ij}(\theta) = (2\pi r)^{-\frac{1}{2}} \left[ K_I F_{ij}^I(\theta) + K_{II} F_{ij}^{II}(\theta) + k_{III} F_{ij}^{III}(\theta) \right] \quad (6)$$

Les fonctions  $f_{ij}^{I,II,III}$  sont des fonctions dépendant de l'angle polaire  $\theta$ .

Dans le plan de fissuration ( $\theta = 0$ ) ces fonctions se réduisent à :

$$f_{22}^I(\theta) = f_{12}^{II}(\theta) = f_{23}^{III}(\theta) = 1 \quad (7)$$

$K_I, K$  et  $K_{III}$  Sont les facteurs d'intensité des contraintes en mode I et II et III, Il est donc clair quelle champ de contrainte posé de une singularité ( $r^{-1/2}$ ) en pointe de fissure ( $r \rightarrow 0$ ).[8]

## I.4 Influence des différents paramètres :

### I.4.1 L'épaisseur des matériaux:

L'épaisseur d'un composant affecte les conditions de contrainte à la pointe d'une fissure avec des composants minces ayant des conditions de contrainte plane et des composants épais ayant des conditions de déformation plane. Les conditions de déformation plane donnent la valeur de résistance à la rupture la plus basse qui est une propriété du matériau.

La valeur critique du facteur d'intensité de contrainte dans le chargement de mode I mesuré dans des conditions de déformation plane est connue sous le nom de ténacité à la rupture par déformation plane, notée  $K_{Ic}$ . Lorsqu'un essai ne satisfait pas à l'épaisseur et aux autres exigences d'essai qui sont en place pour garantir les conditions de déformation plane, la valeur de ténacité à la rupture produite reçoit la désignation  $K_c$ . La ténacité à la rupture est une manière quantitative

d'exprimer la résistance d'un matériau à la propagation des fissures et des valeurs standard pour un matériau donné sont généralement disponibles.

Une propagation lente et auto-entretenue des fissures, appelée fissuration par corrosion sous contrainte, peut se produire dans un environnement corrosif au-dessus du seuil  $K_{Isc}$  et plus bas  $K_{Ic}$ . De petits incréments d'extension de fissure peuvent également se produire pendant la croissance des fissures de fatigue, qui, après des cycles de chargement répétés, peuvent progressivement développer une fissure jusqu'à la rupture finale en dépassant la ténacité à la rupture.

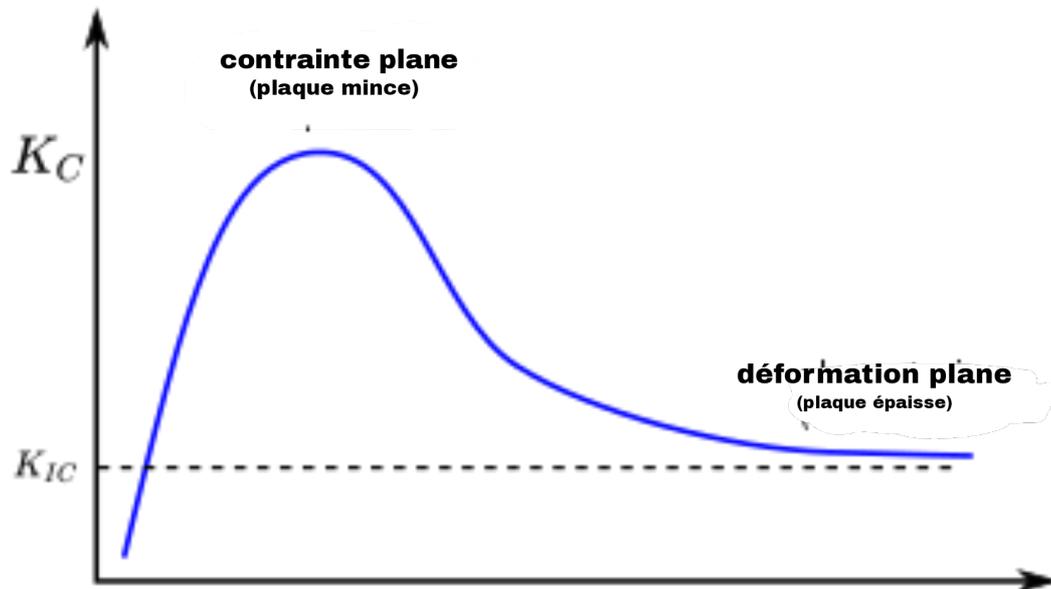


Figure 4 : représente l'impact d'épaisseur d'une éprouvette sur la ténacité à la rupture[9]

#### 1.4.2 Essais de ténacité à la rupture par déformation plane :

Lors de la réalisation d'un essai de résistance à la rupture, les configurations d'éprouvettes les plus courantes sont la courbure d'entaille à un seul bord (SENB ou courbure à trois points) et les éprouvettes de tension compacte (CT). Les tests ont montré que les conditions de déformation plane prévalent généralement lorsque:

$$B, a \geq 2.5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (8)$$

Le test est effectué en chargeant régulièrement à une vitesse telle que  $K_I$  augmente de 0,55 à 2,75 (MPa $\sqrt{m}$ ) / s. Pendant l'essai, la charge et le déplacement de l'ouverture de la fissure (CMOD) sont enregistrés et l'essai se poursuit jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte. La charge critique

$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{WB}} f(a/w) \quad (9)$$

Le facteur de géométrie  $f(a/w)$  est une fonction adimensionnelle de  $a/w$  et est donnée sous forme polynomiale dans la norme E 399. Cette valeur de ténacité provisoire est reconnue comme valide lorsque les conditions suivantes sont remplies :

$$\min(B, a) > 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad \text{Et} \quad p_{max} \leq 1.1 P_Q \quad (10)$$

Lorsqu'un matériau de ténacité à la rupture inconnue est testé, une éprouvette d'épaisseur totale de la section de matériau est testée ou l'éprouvette est dimensionnée sur la base d'une prédiction de la ténacité à la rupture. Si la valeur de ténacité à la rupture résultant de l'essai ne satisfait pas à l'exigence de l'équation ci-dessus, l'essai doit être répété en utilisant une éprouvette plus épaisse. En plus de ce calcul d'épaisseur, les spécifications d'essai ont plusieurs autres exigences qui doivent être satisfaites (telles que la taille des lèvres de cisaillement) avant qu'un essai puisse être considéré comme ayant abouti à une valeur  $K_{IC}$ .

Lorsqu'un essai ne satisfait pas à l'épaisseur et aux autres exigences de déformation simple, la valeur de ténacité à la rupture produite reçoit la désignation  $K_c$ . Parfois, il n'est pas possible de produire un échantillon qui répond à l'exigence d'épaisseur. Par exemple, lorsqu'une plaque relativement mince avec une ténacité élevée est testée, il peut ne pas être possible de produire une éprouvette plus épaisse avec des conditions de déformation plane au fond de fissure.[9]

## 1.5 Résistance à la fatigue :

### 1.5.1 Courbe S-N ou la courbe de Wöhler:

La courbe S-N peut révéler l'existence d'une "limite de durabilité", définie comme le niveau de contrainte auquel un matériau résistera "indéfiniment" à une contrainte cyclique sans tomber en panne. Évidemment, la connaissance de ce niveau de contrainte est importante pour l'ingénieur car elle lui fournit une contrainte de référence réaliste sur laquelle il peut baser ses conceptions. Cependant, pour de nombreux matériaux, aucune limitation de ce type n'a été trouvée dans le temps expérimental pratique. Dans ces cas, le concepteur doit se référer directement à la courbe S-N pour obtenir la contrainte appropriée correspondant à la durée de vie prévue du produit qu'il conçoit. Cette courbe peut généralement être divisée en trois régions [10] figure 5

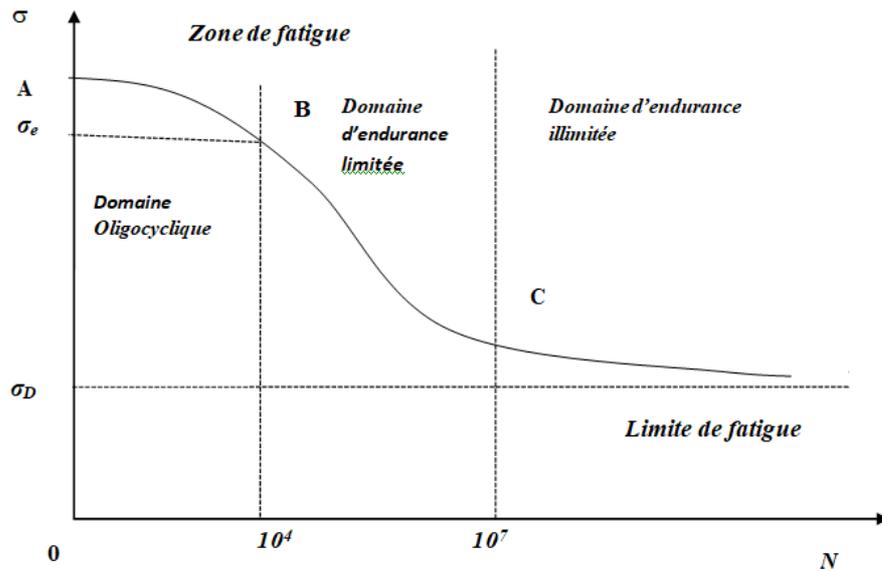


Figure 5 : Courbe de Wöhler[11].

Sur la courbe de Wöhler, on observe une dispersion statistique de la durée de vie, et pour une même contrainte, celle-ci est principalement due aux défauts du matériau (tolérances d'usinage, défauts de surface, et surtout facteurs métallurgiques) conduisant à l'initiation et à la propagation de fissures. Leur forme, leur taille et leur position sont variables. La durée de vie des pièces est donc également variable. Le dimensionnement structural basé sur les courbes de Wöhler doit fournir une certaine probabilité de défaillance. Plus la durée de vie moyenne augmente, plus la dispersion des durées de vie augmente. Cela limite l'application des courbes de Wöhler au dimensionnement des dispositifs de sécurité structurelle.

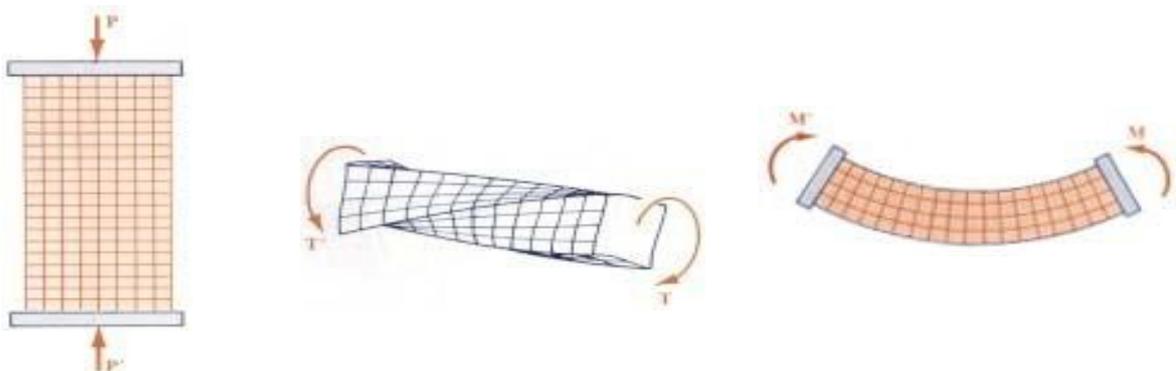


Figure 6 : charges appliquées (traction -compression/torsion/flexion).

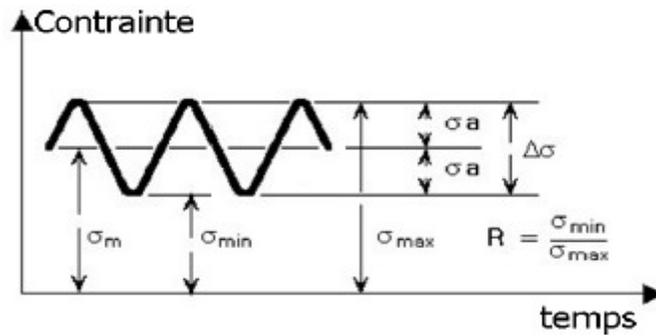


Figure 7 : paramètres de la sollicitation.

### I.5.2 Les trois domaines de la courbe de Wöhler:

- La zone AB, dite oligocyclique, qui correspond aux contraintes les plus grandes, supérieures à la limite d'élasticité macroscopique et où le nombre de cycles à la rupture s'étend de 0.5 jusqu'à  $10^4$  ou  $10^7$  (pour les aciers doux).  
L'éprouvette atteint généralement un état d'accommodation plastique ou un rochet élastoplastique :
- L'accommodation plastique se produit lorsque la réponse de l'éprouvette devient périodique, c'est-à-dire la déformation plastique devient périodique, un cycle d'hystérésis élastoplastique se produit.
- Le rochet se produit lorsque la réponse de l'éprouvette n'atteint jamais un état périodique, la déformation plastique croît sans cesse, ce qui va provoquer la ruine de la structure en un nombre de cycles relativement très faible comme la.

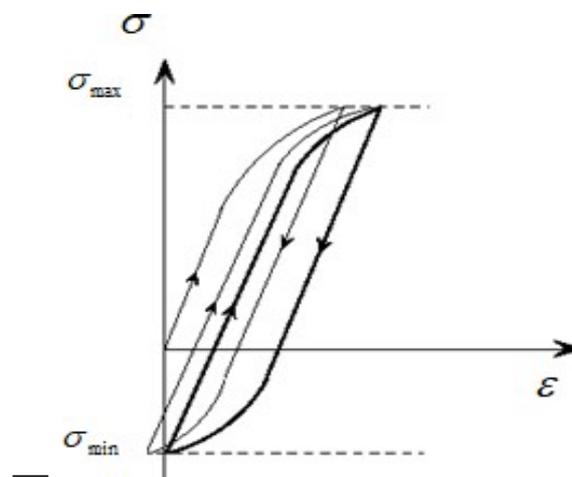
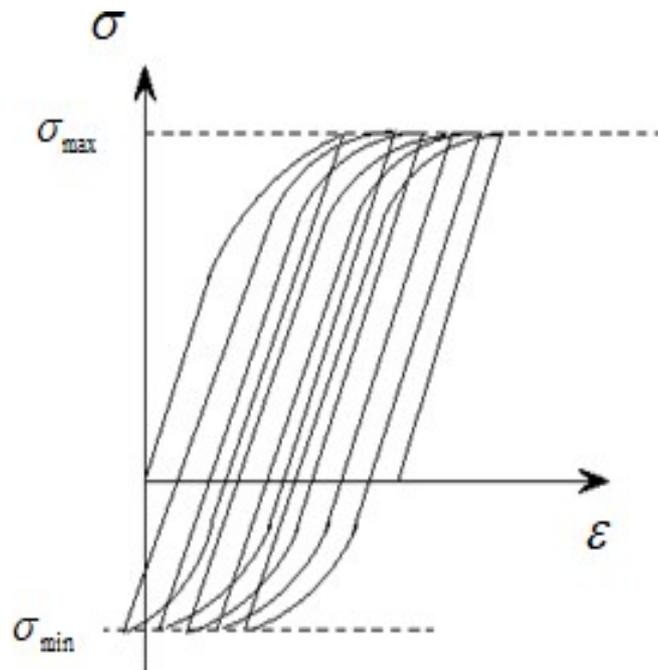


Figure 8: Accommodation.



**Figure 9:Rochet.**

Dans cette zone, la rupture survient après un petit nombre d'alternances et est précédée d'une déformation plastique notable. Par suite de l'amplitude de la contrainte maximale, chaque cycle d'effort entraîne une déformation plastique d'ensemble accompagnée le plus souvent soit d'un durcissement notable, soit d'un adoucissement du métal. La déformation plastique  $E^p$  peut être souvent reliée au nombre de cycles à la rupture par une relation simple de la forme (loi de Manson-Coffin):

$$N^k E^p = C \quad (11)$$

Où l'exposant  $k$  est voisin de 5 pour les métaux courants (aciers, alliages légers).

- La zone BC, dite zone de fatigue ou d'endurance limitée, où la rupture est atteinte après un nombre de cycles compris approximativement entre  $10^4$  et  $10^6$  à  $10^7$ . La rupture n'est pas accompagnée d'une déformation plastique d'ensemble, mesurable. La réponse de l'éprouvette atteint dans ce cas un régime adapté élastique. L'adaptation élastique est un état où la réponse de l'éprouvette devient purement élastique, il peut y avoir de la déformation plastique durant les premiers cycles, mais au bout d'un certain nombre de cycles, elle reste constante l'état final cependant dépend de l'état initial de la structure.

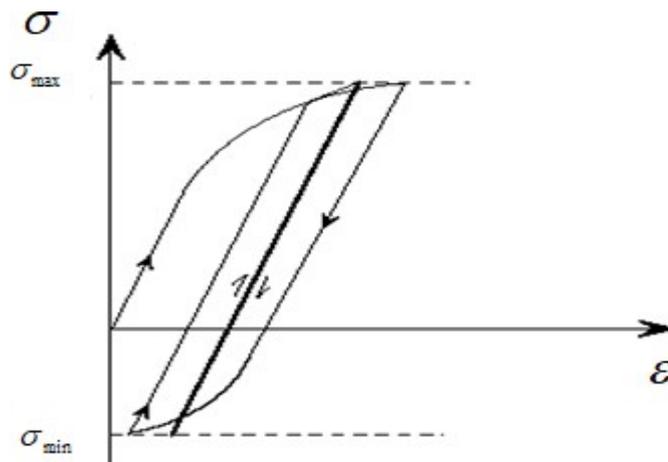


Figure 10: Adaptation.

C'est le domaine dans lequel travaillent la plupart des structures qui pour diverses raisons, doivent avoir des masses et des volumes impérativement réduits (cas des structures aéronautiques ou automobiles ou nucléaires).

Il existe de très nombreuses relations mathématiques reliant  $\sigma_D$  et  $N$  dans ce domaine.

- la zone CD, dite zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité, où D est un point pour les métaux ferreux qui est à «l'infini». La courbe de Wöhler présente généralement une variation de pente plus ou moins marquée autour de  $10^6$  à  $10^7$  cycles, suivie d'une zone (CD) où la courbe tend vers une limite asymptotique parallèle à l'axe des  $N$ . En delà de cette valeur limite notée  $\sigma_D$ , il n'y a jamais rupture par fatigue quel que soit le nombre de cycles appliqué.

$\sigma_D$  est nommé limite de fatigue ou limite d'endurance. Cette limite peut ne pas exister ou être mal définie pour certains matériaux (aciers à haute résistance, métaux non ferreux). Les grandes durées de vie concernent le domaine d'endurance illimité.

- **Formule de Wöhler**

$$\sigma_a = a - b \log N \quad (12)$$

Avec  $a$  et  $b > 0$

Cette relation ne décrit pas totalité de la courbe de Wöhler puisque  $\sigma_a$  ne tend pas vers une limite  $\sigma_D$  lorsque  $N \rightarrow \infty$ . elle ne représente que la partie BC.

- **Formule de Basquin**

$$\log N = a - b \log \sigma_a \quad (13)$$

Avec :  $a > 0$  et  $b > 0$

Ou :

$$N\sigma_a^\beta = C. \quad (14)$$

En posant  $\beta = 1/b$  . et  $\ln C = a/\beta$ .

*Avec b est nommé index de la courbe de fatigue.*

Dans l'expression de l'équation (14) : la contrainte tend vers zéro quand N tend vers l'infini. Cette relation n'est donc représentative de la courbe de Wöhler que dans sa partie BC.

Par ailleurs, elle représente des droites dans des axes logarithmiques et non dans des axes semi-logarithmiques.[11]

## **I.6 Propagation de fissure :**

L'avènement de la mécanique linéaire de la rupture a fait progresser la description des mécanismes de fissuration. S'il y a des défauts préexistants ou des fissures dans la pièce, il y a deux types de problèmes qui peuvent être traités :

- Évaluez la vitesse de propagation des fissures (ou des défauts semblables à des fissures) pour estimer la durée de vie utile restante de la pièce. L'utilisation de la mécanique de la rupture peut parfaitement résoudre ce problème ;
- Évaluez la charge à laquelle la fissure ne se propage pas.

### **I.6.1 Description des courbes de propagation des fissures :**

La façon la plus simple d'exprimer la progression de la fissure est de rapporter sa profondeur en fonction du nombre de cycles subis par l'éprouvette. Le nombre de cycles N pouvant être très élevé (plusieurs millions de cycles), une échelle logarithmique est utilisée pour le représenter.

La figure 11 représente schématiquement une courbe de ce type, avec trois éprouvettes contenant des fissures de longueur initiale  $a_i$ , en supposant les trois mêmes essais, soumises à trois sollicitations alternées différentes, la sollicitation la plus élevée conduirait naturellement à Durée de vie minimale.

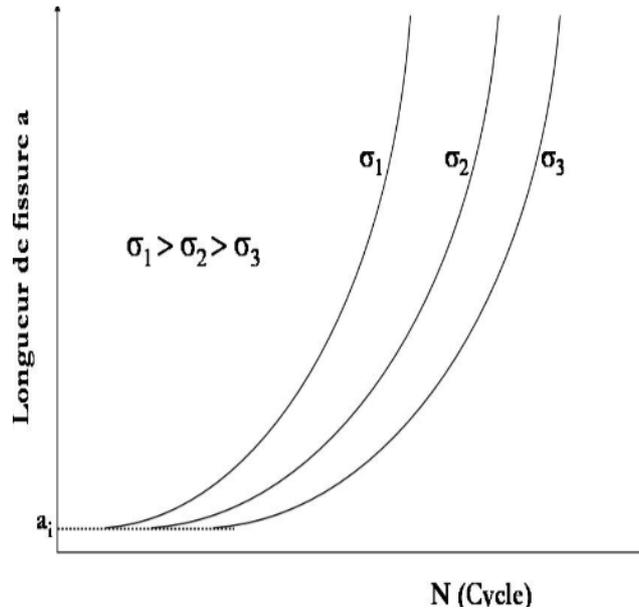
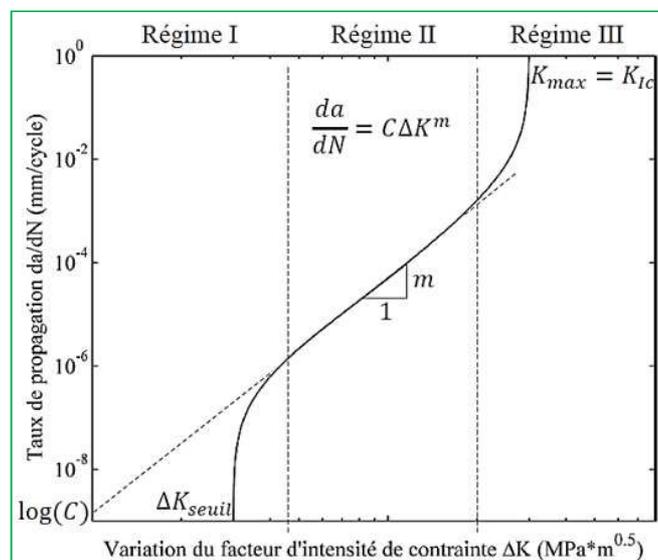


Figure 11 : Longueur de fissure en fonction du nombre de cycles[12]

A partir de l'enregistrement de la longueur de fissure (a) en fonction du nombre de cycles (N), on peut tracer la vitesse de fissure da/dN en fonction du paramètre caractérisant la charge.

Les développements en mécanique de la rupture ont permis de mieux étudier quantitativement les stades de croissance des fissures de fatigue grâce à l'utilisation d'un facteur d'intensité de contrainte (FIC) noté K. Ceci est efficace tant que la plastification du fond de fissure avec propagation reste dans une région de plus petite taille devant la longueur de la fissure et la taille de la structure de la fissure.

Les résultats expérimentaux obtenus par cette méthode montrent que l'évolution du taux de fissuration en fonction de l'amplitude du FIC est présentée sur une échelle logarithmique, avec l'aspect représenté sur la figure 12



**Figure 12 : Courbe de propagation en fatigue typique d'une fissure longue[12].**

Paris et al ont mis en évidence la corrélation entre le taux de croissance des fissures de fatigue  $da/dN$  et le facteur d'intensité de contrainte maximale  $K_{max}$  pour un chargement cyclique avec une charge minimale nulle. Cette découverte a conduit à la promulgation générale de la loi de Paris :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (15)$$

où  $\Delta K$  est la différence entre les facteurs d'intensité de contrainte maximum  $K_{max}$  et minimum  $K_{min}$  appliqués pendant le cycle de chargement, où  $C$  et  $m$  sont des constantes de matériau déterminées expérimentalement. Le facteur  $\Delta K$  peut être défini à partir de l'équation :

$$K = Y\sigma_{\infty}\sqrt{\pi a} \quad (16)$$

En introduisant un changement de contrainte.

$$\Delta\sigma_{\infty} = \Delta\sigma_{\infty,max} - \sigma_{\infty,min}; \Delta K = Y\Delta\sigma_{\infty}\sqrt{\pi a} \quad (17)$$

La (figure 12) montre la progression typique de la vitesse de propagation  $da / dN$  en fonction de  $\Delta K$  sur une échelle logarithmique. Il existe trois régimes de propagation.

- Le premier régime seuil (Régime I) est caractérisé par le seuil de propagation  $\Delta K$  seuil, en dessous duquel les fissures longues ne se propagent pas. De nombreuses études, dont plusieurs revues de la littérature, ont traité du comportement de la propagation de la fatigue en régime seuil . Plusieurs facteurs peuvent affecter le comportement à la fatigue près des seuils, notamment : B. Ultra structure, rapport de contraintes  $R = K_{min} / K_{max}$ , et propriétés mécaniques (limite d'élasticité).
- Le deuxième, le régime de Paris (régime II), concerne la propagation stable des fissures longues et est souvent modélisé par la relation de Paris (éq. 15). La vitesse de propagation dans cette région peut être influencé notamment par le rapport de charge, les effets de fermeture et la fréquence de chargement.
- Le troisième, le régime de propagation accélérée (régime III), est marqué par une accélération du taux de propagation jusqu'à la rupture brutale du matériau, où  $K_{max}$  atteint la ténacité  $K_{IC}$  du matériau.

Plusieurs auteurs ont proposé des équations permettant de modéliser les différents régimes de la courbe de propagation. Le plus connu est le modèle de Walker, qui permet de prendre en compte le facteur de charge  $R$  en introduisant une constante supplémentaire ( $b_w$ ).[12]

$$\left[ \frac{da}{dN} = C_w \left( \frac{\Delta K}{(1-R)^{1-b_w}} \right)^{m_w} \right] \quad (18)$$

On note aussi le modèle proposé par Lantaigne et al, qui permet la modélisation des régimes I et II de la courbe de propagation en introduisant une constante supplémentaire ( $b_L$ ):

$$\frac{da}{dN} = C_L (\Delta K)^{n_L} \left[ 1 - e^{-b_L \left( \frac{\Delta K}{\Delta K_{seuil}} - 1 \right)} \right] \quad (19)$$

Enfin, on note le modèle de Forman qui permet de tenir compte du rapport de charge R en plus de modéliser le régime III de la courbe de propagation :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_F (\Delta K)^{m_F}}{(1-R) K_{IC} - \Delta K} \quad (20)$$

# **Chapitre II**

## **Comportement mécanique des pipelines**

## II.1 Les types des pipelines :

Le type et le nom de la tuyauterie dépendent des caractéristiques physiques et des conditions de câblage du produit à déplacer.

- Pour le gaz naturel, on parle de gazoducs ;
- Pour le pétrole on parle de pipelines ;
- Pour les eaux industrielles, c'est le tuyau ou le drain. Le terme aqueduc est réservé aux ouvrages de maçonnerie où l'eau peut circuler librement ;
- Pour la saumure, utilisez le terme tuyau de saumure ;
- Pour l'oxygène, les termes canalisation d'oxygène ou canalisation d'oxygène sont utilisés ;
- Pour l'hydrogène, utilisez le terme canalisation d'hydrogène. [8]



*Figure 13: Pipeline dans l'environnement [13].*

De manière générale, le suffixe latin "ductus", dérivé de "ducere", signifie "conduire", permettant ainsi de construire un nom français pour un conduit spécialisé. Livrer un type de produit spécifique.

## II.2 Matériaux des pipelines :

Le matériau de construction du pipeline dépend de la nature et des conditions du produit qu'il doit transporter.

Les oléoducs et gazoducs sont généralement constitués de tubes en acier soudés bout à bout, revêtus à l'extérieur ou même à l'intérieur, et sont souvent enterrés dans le sol;

Les pipelines de saumure et les oléoducs et gazoducs à haute pression sont construits avec des tuyaux en acier soudés bout à bout et revêtus ;

Les canalisations de distribution de gaz moyenne pression sont généralement réalisées en (PEHD) ;[8]

### II.3 Évolution des caractéristiques mécanique et dimensionnelle :

La plupart des tuyaux sont en acier, bien que le plastique et l'aluminium soient parfois utilisés dans les réseaux de distribution de gaz naturel. Les tuyaux en acier sont fabriqués en soudant des tuyaux courts (20 m) les uns aux autres. Une fois les composants passés aux rayons X, les tuyaux ont été recouverts d'une couche protectrice avant d'être enterrés. Tous les tuyaux sont inspectés et testés sous pression avant utilisation sans exception.

Ces principales propriétés (diamètre, épaisseur, type d'acier, spécifications structurales, température et pression de fonctionnement, etc.) sont régies par un ensemble de règles et font l'objet de multiples calculs et compromis économiques. (Figure 14)

Le diamètre de la canalisation est déterminé en fonction du débit, de la viscosité et de la densité du produit à véhiculer, Atteindre un compromis économique entre la puissance de la station de pompage ou de compression à installer et l'importance de l'investissement total [14]

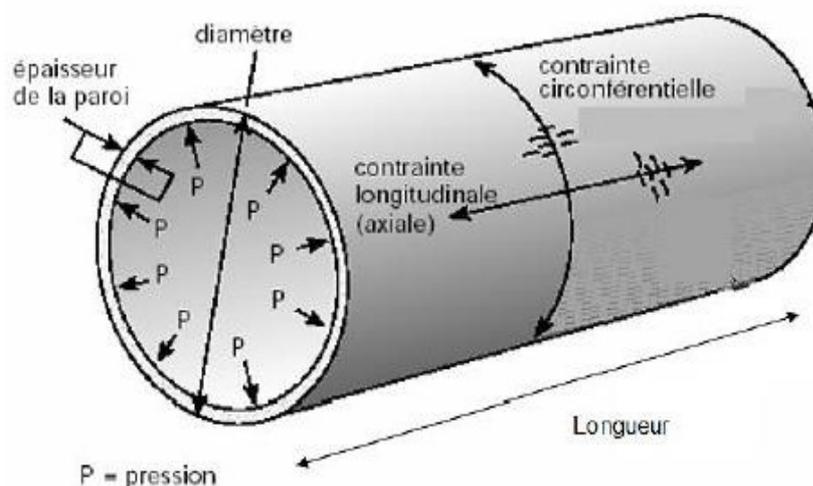


Figure 14: Caractéristique des tubes [14].

Si des facteurs techniques et économiques peuvent ainsi déterminer le diamètre ainsi que la pression de travail, l'épaisseur est calculée en fonction de cette pression de travail ou des conditions de pose qui imposent parfois des caractéristiques dimensionnelles plus strictes.

Les administrations des différents pays responsables de la sécurité des populations traversées par les canalisations sur leur territoire ne resteront pas indifférentes à ces calculs qui déterminent le niveau de sécurité de l'installation.

Dans la plupart des pays où des canalisations sont posées, des réglementations énoncent les lois générales que les constructeurs et les installateurs doivent respecter. Ces réglementations sont basées sur la notion de pression maximale de service, de facteur de sécurité et d'autres conditions de construction, telles que les méthodes d'inspection des canalisations, les méthodes d'essai de pression qui doivent être effectuées avant toute mise en service de la canalisation, les mesures de protection spéciales (mesures pour éviter les fuites dans les zones particulièrement conséquences dangereuses).

### II.3.1 Les aciers:

Le développement du transport longue distance de grandes quantités d'hydrocarbures a rendu nécessaire l'utilisation de conduites de grand diamètre fonctionnant à des pressions plus élevées.

Une nouvelle nuance aux propriétés mécaniques améliorées pour éviter d'atteindre des épaisseurs difficiles à souder et économiser de l'acier.

Par conséquent, l'apparition des variétés X60, X65, X70, X80, X100 et même X120 a été observée. L'acier fondu est de nature effervescente (le gaz est présent sous forme d'oxydes). Lors de la coulée, l'oxygène se combine avec le carbone dans le métal pour former du CO, qui tente de s'échapper en se solidifiant. Si le bloc refroidit trop rapidement,

Une zone poreuse se créera au sommet pour éviter ces problèmes

la plupart des aciers sont écrouis Ajoutez un désoxydant au lot qui est plus efficace que le carbone (ferromanganèse, ferrosilicium, etc.) et l'aluminium dans la casserole.

Ces objets se traduisent par un composé liquide qui rejoint le laitier en saillie. En fait, l'acier contient ou ajoute divers éléments spontanés (C, Mn, Si, ...) à la solution (Cr, Ni, Nb, V, Mo, Cu, Al, Ti, B) et est très complexe. C'est un métal corps. .. ) Et les impuretés issues de la production (P, S, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ...).

L'acier pour tuyaux peut être divisé en deux groupes :

l'acier à faible teneur en carbone et l'acier à faiblement allié.

Dans le premier groupe, on trouve les aciers X42 à X52 (selon API) contenant jusqu'à 0,3% C, 1,6% Mn et 0,7% Si. Carbone X56, X50, X65, X70, 0,12 % C, 0,45 % Si, 0,25 % S, 1,9 % Mn, 0,1 % V, 0,1 % Nb, 0,015 % Al. Pour tuyaux Les tuyaux en acier d'un diamètre supérieur à 1020 mm sont couramment utilisés pour un fonctionnement sous haute pression (Figure 15) .[15]

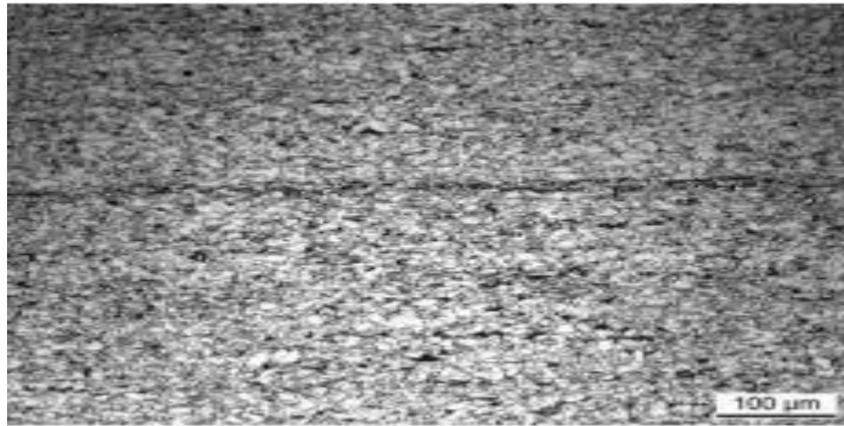


Figure 15: Microstructure ferrito-perlitique de l'acier API5LX70 [14].

## II.4 Les défauts dans les pipelines :

### II.4.1 Corrosion dans les pipelines :

#### II.4.1.1 Différents types de corrosion :

D'un point de vue général et macroscopique, on distingue deux types de corrosion :

- **Corrosion uniforme** : La corrosion uniforme est caractérisée par un taux de corrosion relativement uniforme sur l'ensemble d'une surface exposée. Ce type de corrosion est habituellement prévu pour les pièces faisant partie d'élément structural qui peuvent être sacrifiés au fil du temps, mais elle affecte tous les métaux communs. Dans le cas des aciers au carbone, le fer réagit avec l'oxygène pour former de la magnétite minérale, qui est de l'oxyde de fer dont la formule chimique est  $Fe_2O_3$ .

Les sites anodiques et cathodiques se forment au hasard sur l'électrode, ce processus conduit à une corrosion de type généralisé. Avec le temps, le métal voit sa masse et son épaisseur diminuer régulièrement[16]

- **Corrosion générale** : Ce type affecte toute la structure du métal, il n'aura donc qu'un effet néfaste sur l'esthétique et seulement un petit effet sur les propriétés mécaniques du matériau. (Figure 16.a)[17]
- **La corrosion localisée (piqûres)** : est la plus dangereuse car elle provoque des dommages profonds qui réduisent fortement la résistance électrique du métal. Généralement, cette corrosion se produit sur des matériaux avec des surfaces inégales. (Figure 16.b)[17]

La réaction à l'anode:	$F_e \rightarrow F^{++} + 2e^-$
Dissociation de :	$H_2S \rightleftharpoons H^+ + HS^-$ $HS^- \rightleftharpoons S^{2-} + H^+$
La réaction à la cathode:	$2H^{++} + 2e^- \rightleftharpoons H_2$ $F^{++} + S^{2-} \rightleftharpoons FS$
Réaction globale:	$F_e + H_2S \rightleftharpoons F_eS + H_2$



Figure 16: Types de corrosion[17]

#### II.4.1.2 Mécanisme de corrosion des pipelines :

La corrosion des matériaux, en particulier des pipelines, fait référence aux modifications de ce matériau (le pipeline) par réaction avec des oxydants (principalement l'oxygène et les cations H). Le principal agent corrosif dans l'industrie pétrolière est le sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ), qui provient à la fois du pétrole brut et principalement de la décomposition thermique des composés soufrés. La corrosion de  $H_2S$  est causée par les mécanismes suivants [18]:

*Tableau 1 : les Mécanismes de corrosion des pipelines*

### II.4.1.3 Fatigue-corrosion

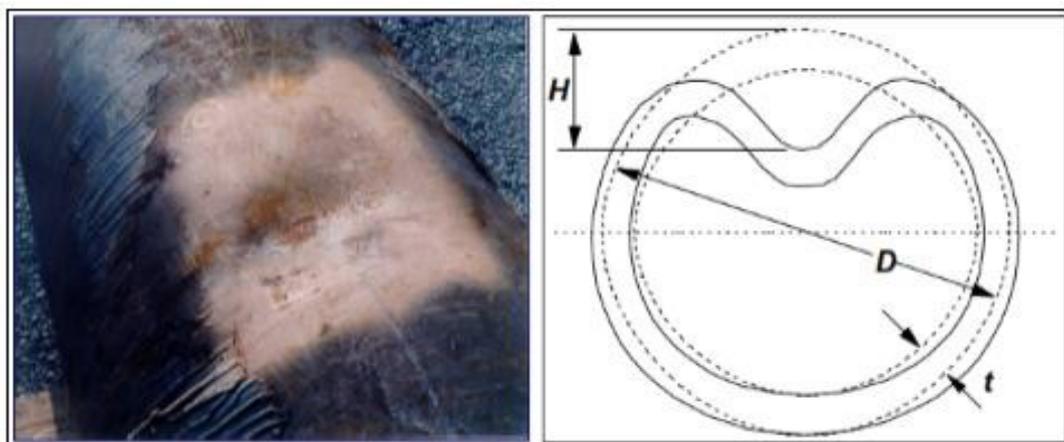
Les matériaux qui sont très résistants à la fatigue et à la corrosion dans un environnement donné peuvent échouer de manière catastrophique sous les effets combinés de la fatigue et de la corrosion.

La corrosion augmente le taux de croissance des fissures de fatigue dans la plupart des métaux et alliages. Le taux de croissance des fissures est généralement beaucoup plus élevé que la somme des taux de corrosion et de fatigue. [17]

### II.4.2 Défaut d'enfoncement :

L'enfoncement une dépression dans une conduite est une section circulaire de la paroi de la conduite due à des corps étrangers (ex : godets d'engins en construction pour conduites enterrées ou posées au sol, conteneurs pour conduites sous-marines).

En d'autres termes, une bosse est un changement de la courbure de la paroi du tuyau sans changement d'épaisseur. La profondeur de cette dépression est définie comme la réduction maximale du diamètre de la conduite par rapport à son diamètre d'origine voir (Figure 17)



*Figure 17: défaut d'enfoncement[17]*

Les bosses entraînent des concentrations locales de contraintes et de déformations et des réductions locales du diamètre de la conduite. L'existence de dépressions dans le pipeline peut être résumée dans les situations suivantes [17]:

- Indentation lisse (Indentation normale) : Cette indentation correspond à une indentation sans réduction d'épaisseur de paroi.
- Indentation de pli (indentation de pli): C'est une dépression qui provoque un changement soudain de la paroi du tuyau Indentation dans la soudure, cette configuration reflète une combinaison de bosses et d'un autre défaut, car des fissures sont probables dans la soudure, ...

#### II.4.2.1 La géométrie et caractérisation des enfoncements :

La profondeur d'affaissement est généralement mesurée par rapport au plan circonscrit d'origine du tuyau complet, généralement exprimée en pourcentage du diamètre du tuyau d'origine. La forme d'indentation peut être définie en termes de rayons de courbure locaux dans des directions circulaires et/ou axiales. (Figure 18)

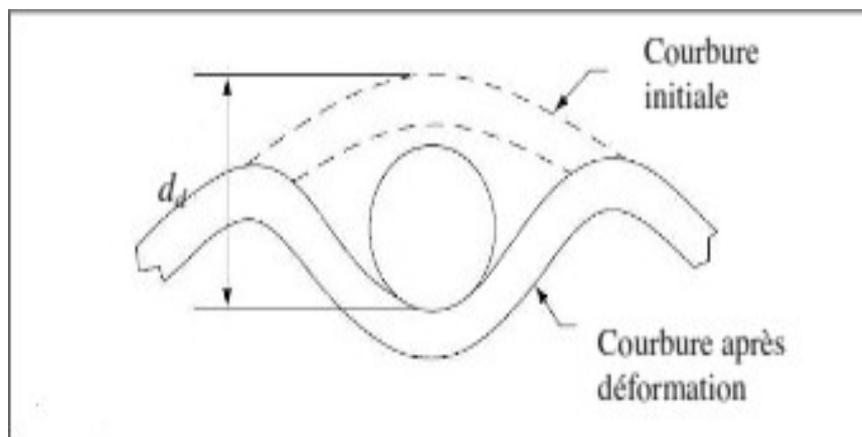
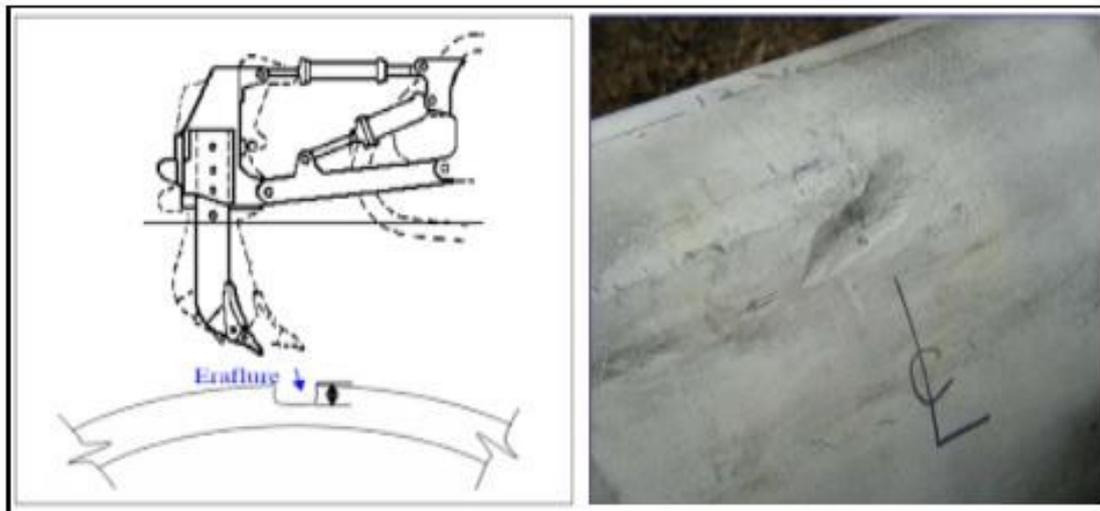


Figure 18: géométrie et caractérisation des enfoncements[17]

#### II.4.3 Les éraflures :

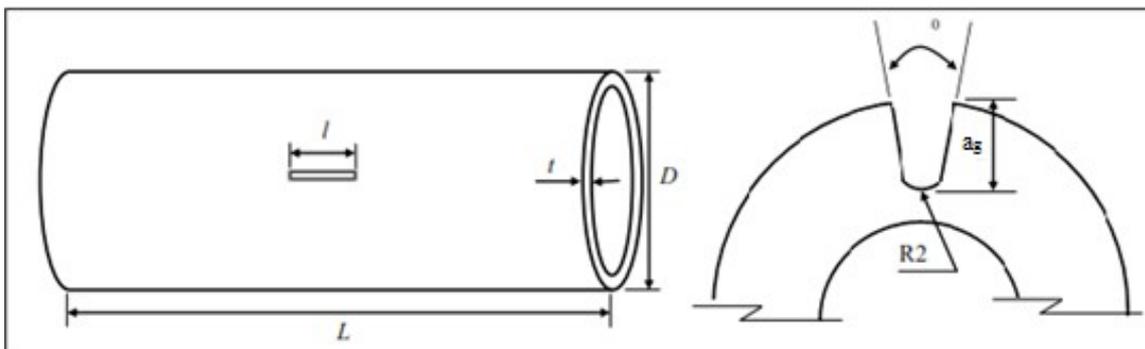
Les tuyaux sont souvent soumis à des chocs causés par des outils (par exemple, des pioches) ou des engins de chantier, voir (Figure 19). La plupart du temps, l'incident est ignoré ou pas signalé du tout.[17]

**Figure 19: choc provoqué par un engin de chantier[17]**



Les rayures sont des dommages superficiels causés à une surface par le retrait de matière du contact avec un corps étranger (figure 20). Cette rayure peut être considérée comme une encoche. La taille de la rayure est définie comme la longueur supérieure à la largeur.

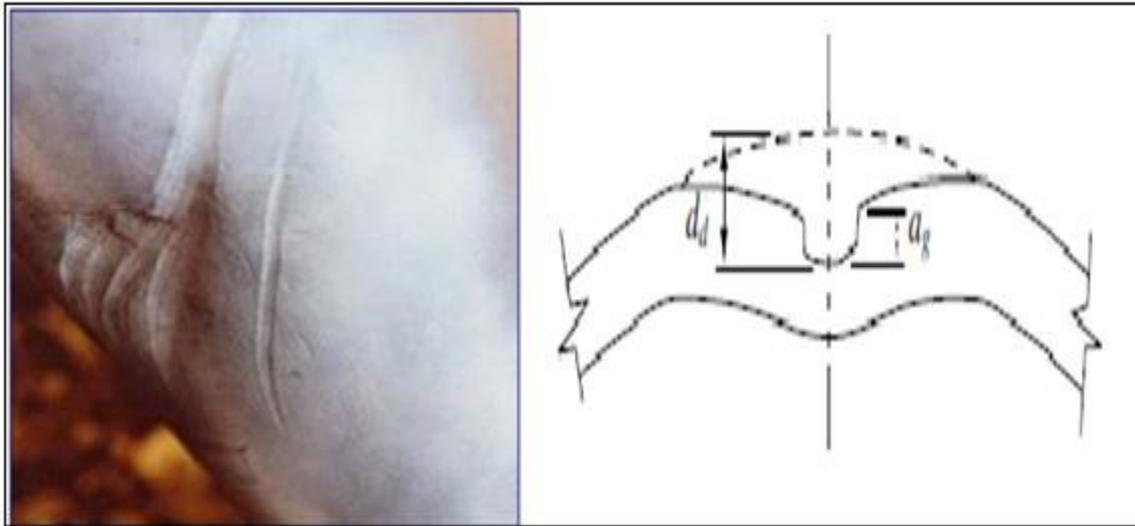
Cependant, des chocs provoqués par des agressions extérieures peuvent causer de graves dommages à la canalisation. Lors de l'utilisation, l'action de la pression peut provoquer une rupture locale, qui elle-même peut entraîner une fuite et une éventuelle explosion.



**Figure 20: géométrie et caractérisation des éraflures[17]**

### II.4.3.1 Les défauts combinés (enfoncements + éraflures)

Une bosse est la déformation plastique permanente d'un tronçon de tuyau due au contact avec des corps étrangers (érosion externe), ce même contact pouvant également entraîner un enlèvement de matière. Dans ce cas, on se retrouve en déficit combiné (dépression + rayures), voir (Figure 21). Ce type de défaut est très complexe car il implique des non-linéarités géométriques et matérielles.



*Figure 21: Défauts combinés (enfoncements éraflures)[17]*

Les défauts tels que les bosses et les rayures dans les tuyaux sont très dangereux. En effet, en plus de la concentration de contraintes causée par l'érosion étrangère, il existe également des cas où l'épaisseur du tuyau est réduite en raison de la présence de rayures. On observe donc une diminution locale de la résistance mécanique du tuyau.

### II.4.4 Les fissures:

Une fissure est définie comme une surface qui sépare localement un solide en deux parties. Dans ce cas, le champ de déplacement devient discontinu dans cette région. L'objet de la mécanique de la rupture est d'étudier cette évolution de surface (propagation de fissure) en fonction de la charge appliquée et des propriétés du métal de base.

Les pipelines sont le plus souvent assemblés aux joints de tuyaux en acier soudés bout à bout sur le terrain (soudures bout à bout). Les joints verticaux créés lors du formage des tuyaux en usine sont vérifiés avant que les tuyaux ne soient expédiés sur le chantier. D'autre part, le soudage in situ (soudage bout à bout) peut être réalisé dans des conditions difficiles et peut provoquer des fissures. Les défauts qui se produisent dans les joints soudés sont généralement comparés aux fissures qui se produisent, par exemple, en raison d'une pénétration insuffisante du matériau. [19]



Figure 22 : Fissure dans les joints de soudure.[19]

#### II.4.4.1 Les différents types de fissure :

##### — Fissuration longitudinale dans un tube :

Les fissures verticales sont le mode de défaillance qui se produit. B. Les conduites d'eau en fonte impliquent de gros tuyaux fragiles. Les fissures se propagent verticalement et la pression interne peut faire éclater complètement la canalisation. Ces sursauts sont souvent provoqués par des montées en pression brutales et anormales et des coups de bélier.

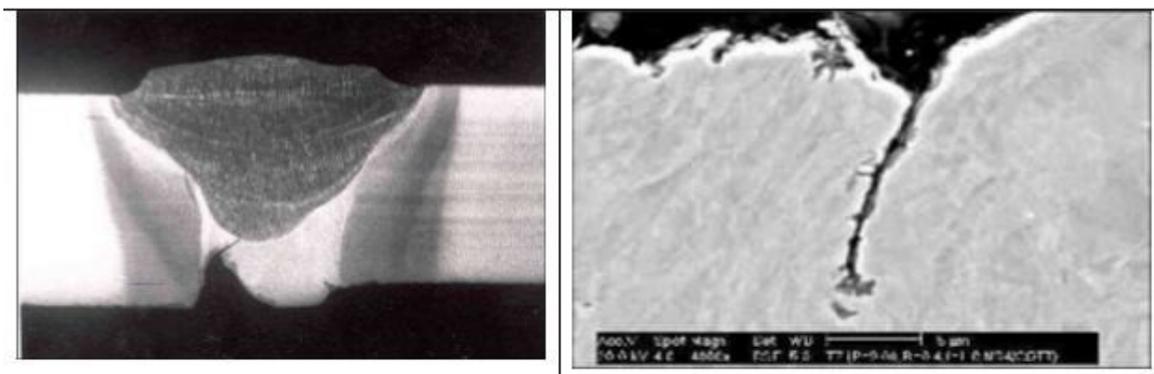


Figure 23 : Mode de rupture d'une canalisation dans le cas d'une fissuration longitudinale[20]

##### — Fissuration circonférentielle dans un tube:

En plus des fissures longitudinales, des fissures circonférentielles peuvent également se produire dans le tuyau. Ce dernier se propage dans toute l'épaisseur de la conduite et peut entraîner une rupture brutale sous diverses charges.[20]

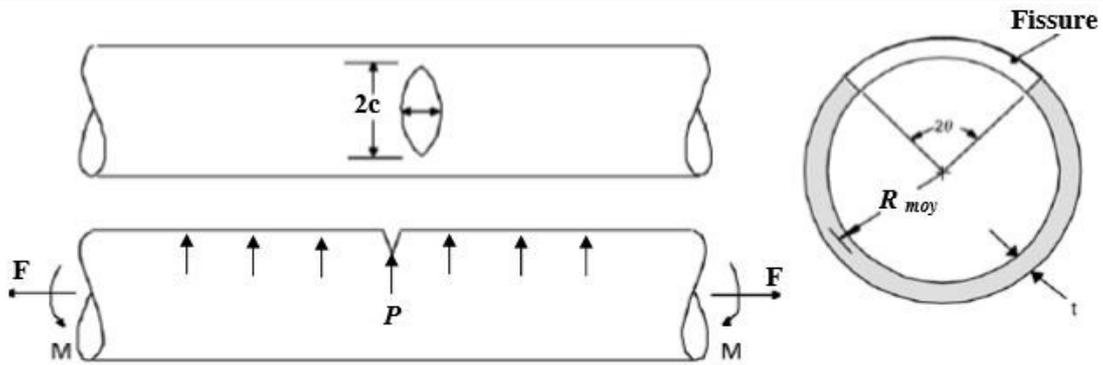


Figure 24: Géométrie d'un tube avec une fissure circonférentielle.[20]

## II.4.5 Les défauts dans les soudures

### II.4.5.1 Orientation des fissures :

Les fissures peuvent être qualifiées de longitudinales ou transversales, selon leur orientation. Lorsqu'une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, on l'appelle une fissure longitudinale, qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal en fusion ou d'une fissure dans la région du joint du métal de base affectée thermiquement [21].

#### — Les fissures longitudinales :

Dans les petites soudures entre pièces solides, il est souvent le résultat de vitesses de refroidissement élevées et de contraintes résiduelles. En soudage à l'arc submergé, elles sont généralement associées à des vitesses de soudage élevées, ou peuvent être associées à des problèmes de porosité discrets sur la surface de la soudure. Les fissures longitudinales dans la zone affectée par la chaleur sont généralement causées par l'hydrogène dissous (Figure 25)[21].

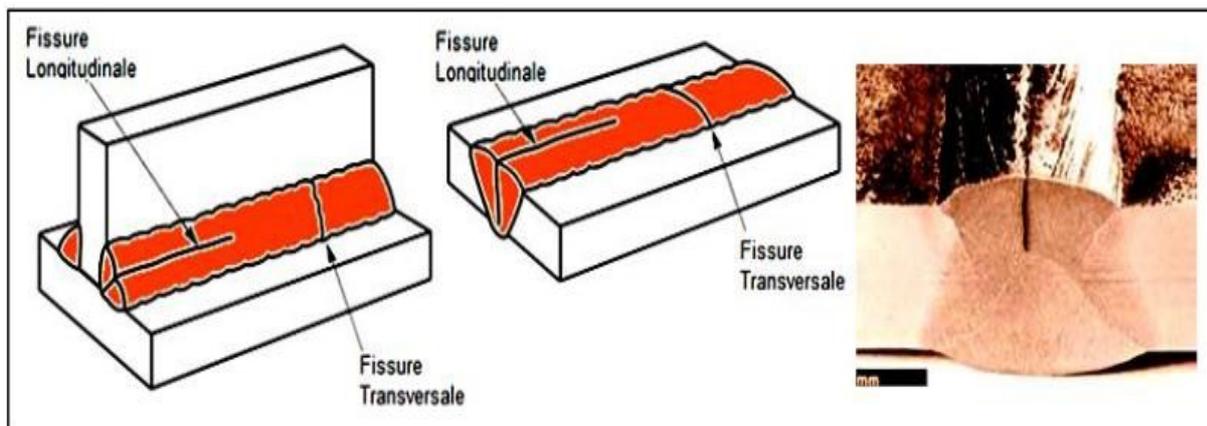
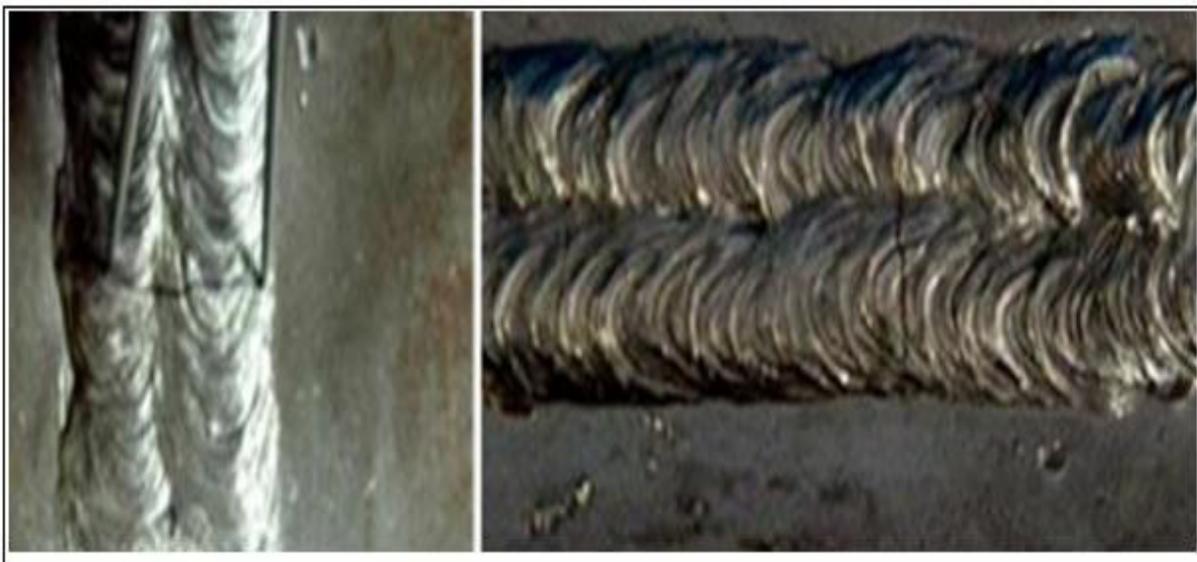


Figure 25: Fissure longitudinale[21]

— **Les fissures transversales :**

Perpendiculaire à l'axe de la soudure. Ceux-ci peuvent être limités en taille et entièrement contenus dans le métal fondu, ou peuvent se propager à la zone affectée thermiquement adjacente, puis du métal fondu au métal de base.

Dans certains joints soudés, des fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur plutôt que dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu à faible ductilité. Le craquage à l'hydrogène du métal en fusion peut être orienté latéralement (Figure 26)[21].



*Figure 26: fissure transversale[21].*

**II.4.5.2 Cause de fissuration dans la soudure :**

- Hydrogène coincé dans la soudure
- Tensions internes résiduelles importantes
- Joints trop étroits
- Présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore)
- Métal d'apport incompatible avec le métal de base
- Cordon trop petit
- Trop de retrait durant ou après[17]

**II.4.5.3 Effet des défauts de soudure sur la durée de vie de fatigue :**

Les fissures dans les joints soudés peuvent réduire considérablement la résistance à la fatigue. Les résultats des essais de fatigue en présence de divers défauts sont présentés sur la (Figure 27) (essai de durabilité). Ces tests de durabilité montrent que les joints soudés présentant des fissures de solidification (sous-pénétration), une porosité et des défauts de gouttière ont une résistance à la fatigue inférieure à celle des spécimens avec des joints idéaux,[17]

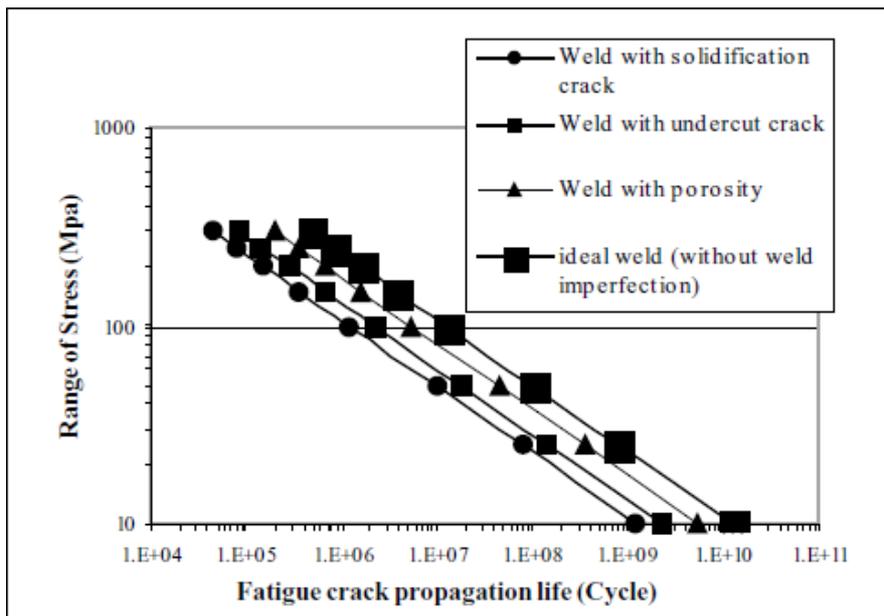


Figure 27: Effet des défauts de soudure sur la vie de propagation de fissure de fatigue[17].

**Chapitre III**  
**Réparation par patch composites des**  
**fissures**

### III.1 La Composition Du Patch Composite :

Le patch composite est une technologie émergente qui se développe rapidement et qui a d'abord été étudiée des les années 1970 par la Royal Australien Air Force . Ils ont essayé le développement et l'application de pièces composites pour réparer les pièces d'aéronef, comme les piliers, les revêtements et les longerons.

Depuis lors, différents constructeurs d'avions militaires et civils ont développé technologie de patch composite. En outre, la technique de réparation composite est également utilisée dans d'autres domaines, tels que la construction navale et l'entretien du génie maritime, les structures de génie civil et structures métalliques, etc.

L'objectif principal de la réparation du système composite d'armature est de transférer la charge appliquée d'un côté de la structure endommagée à l'autre, en contournant la zone désordonnée, en évitant l'expansion du défaut, comme le montre la (figure28). Traditionnellement, de tels dommages ont réparé par des raccords mécaniques avec des goupilles ou des vis.

Cependant, ces réparations entraînent la formation d'une concentration de contraintes autour des attaches (goupilles, vis), ce qui entraîne d'autres problèmes structuraux, tels qu'une durée de vie réduite à la fatigue. En théorie, le type de matériaux de renforcement, l'épaisseur et la géométrie locale des plaques composites et le structure endommagée, lissée de la surface, et les facteurs environnementaux ont tous une incidence sur l'effet de renforcement. La question centrale de cette technologie est de savoir comment appliquer les matériaux existants.

Pour obtenir la meilleure résistance des patchs composites. Avec le développement rapide de diverses technologies de traitement de surface, telles que le meulage du papier de verre, le sablage, l'anodisation et traitement plasmatique, dans une certaine mesure, une résistance suffisante de l'interface entre l'adhésif et l'adhésif. Le dispositif transdermique composite est garanti.

Néanmoins, il convient de noter qu'en raison de la discontinuité du matériau dans la zone collée, la concentration de contrainte est toujours présente entre les patchs et la matrice adhérente.

La capacité de charge de l'ensemble renforcé structure est déterminée par sa partie la plus faible.

La contrainte principale existant entre le composite patch et la matrice endommagée peuvent être divisés en contrainte de cisaillement et contrainte de pelage, où le la contrainte de pelage charge directement la matrice composite dans le sens non renforcé, qui a un impact plus important sur la résistance de l'articulation. Généralement, des contraintes plus élevées apparaîtront sur les bords de la zone de jonction[22]



*Figure 28 : Application d'un patch composite pour le renforcement du pont.[22]*

### **III.2 Avantages Des Composites :**

Les composites offrent deux avantages majeurs, parmi lesquels une meilleure résistance et une meilleure rigidité, notamment par rapport aux autres matériaux par unité de poids. Ces rapports résistance/densité et rigidité/densité sont respectivement appelés résistance spécifique et rigidité spécifique. Par exemple, un matériau composite peut être fabriqué qui a la même résistance et la même rigidité que l'acier mais qui est 70 % plus léger. Il existe d'autres composites avancés qui sont trois fois plus résistants que l'aluminium, comme les structures d'avion qui sont 60 % plus légères. L'industrie aéronautique a été attirée par le titane dans les années 1950 pour des raisons similaires, mais a trouvé de sérieux défauts après avoir investi des millions de dollars dans la recherche, le développement et l'usinage.

Cette expérience malheureuse avec le titane a incité une approche plus prudente, prudente, holistique et équilibrée du développement des composites.

Le remplacement des matériaux traditionnels par des composites est motivé par un autre facteur, l'augmentation du poids, qui se traduit par une augmentation du carburant dans les structures aéronautiques. Récemment, l'effet de l'aérodynamisme et de la réduction de poids par les composites sur le gain de carburant a été évalué. Il s'avère que les deux facteurs ont la même importance.[23]

### **III.3 Domaines d'applications des matériaux composites :**

Les matériaux composites offrent des avantages significatifs par rapport aux matériaux traditionnels. Ils offrent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et

chimique, entretien réduit, forme libre. De par leurs propriétés mécaniques et chimiques, ils peuvent prolonger la durée de vie de certains équipements. Ils contribuent à améliorer la sécurité grâce à une meilleure résistance aux chocs et au feu. Ils assurent une meilleure isolation thermique ou acoustique, et pour certains une bonne isolation électrique. Ils enrichissent également les possibilités de conception en allégeant les structures et en créant des formes complexes, permettant de multiples fonctions. Dans tous les marchés d'application (automobile, construction, énergie, équipements industriels, etc.), ces propriétés exceptionnelles sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

Les composites offrent aux industriels de nouvelles possibilités pour corrélérer fonction, forme et matière dans des matériaux et systèmes de plus en plus performants, et pour mieux répondre à des besoins parfois contradictoires (poids, fonction, etc.) que les matériaux homogènes traditionnels peinent à satisfaire. Attendez).

### III.3.1 Industrie Aérospatiale :

Dans l'industrie aéronautique, la course à la maîtrise des solutions composites est lancée, avec de nombreuses annonces médiatiques entre les deux grands constructeurs d'avions commerciaux, Airbus et Boeing. C'est ainsi qu'Airbus a clairement mis l'accent sur la construction du caisson central composite de l'A380 (Figure 29a), qui joue un rôle structurel clé en assurant la reprise des efforts de flexion de la voilure et sa liaison au fuselage. Boeing a annoncé le lancement imminent du B787, le premier avion de ligne doté d'une aile et d'un fuselage composites (Figure 29b). En réponse, Airbus a annoncé mi-2006 le programme A350 XWB, basé principalement sur l'utilisation de matériaux composites .[23]

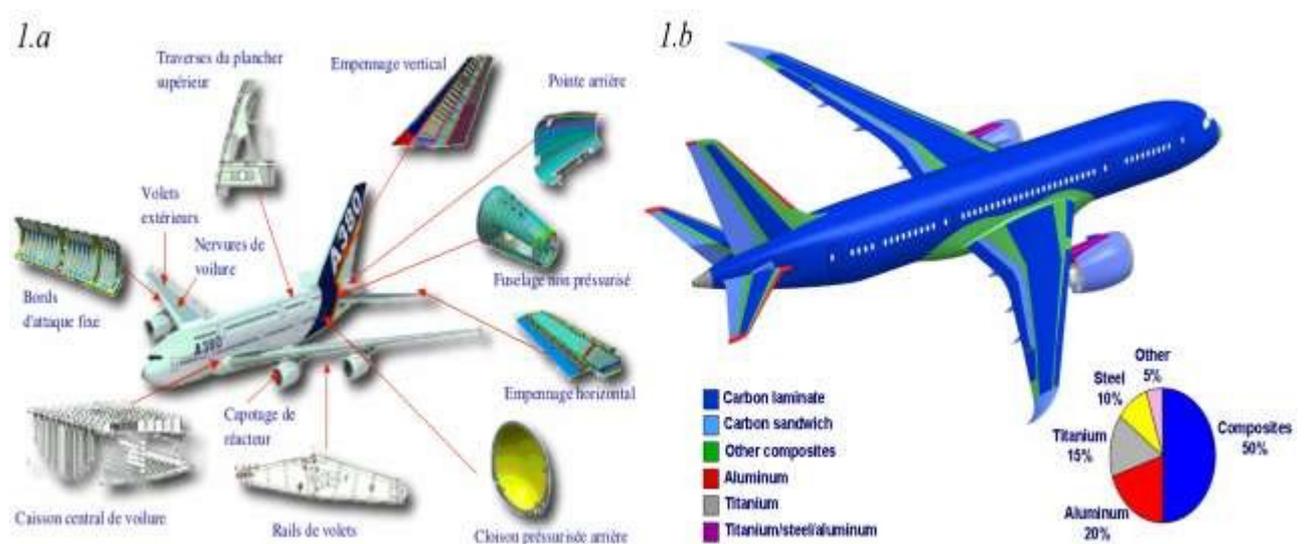


Figure 29: Répartition des matériaux composites dans l'A380..(a) et dans le B787(b), [23].

Les composites en fibre de carbone hautes performances pour l'aviation présentent trois caractéristiques principales qui peuvent intéresser les concepteurs :

- Bien supérieures aux propriétés mécaniques spécifiques des matériaux métalliques,
- "Adapter" les propriétés mécaniques en adaptant la disposition des fibres dans le matériau au chemin de contrainte attendu,
- Faible sensibilité à la fatigue et à la corrosion pour réduire les coûts de maintenance.

Surtout face à la hausse actuelle du prix du baril de pétrole, les constructeurs aéronautiques s'emploient à minimiser la consommation de carburant de leurs avions dans un cercle vertueux :

- Réduire la masse des équipements
- Réduire la motorisation
- Réduire la charge de carburant.

Par conséquent, la minimisation de la masse structurelle constitue un défi technique majeur pour les fabricants à relever par une double approche. D'une part, l'utilisation de matériaux aux propriétés mécaniques spécifiques plus élevées permet de dimensionner des structures plus légères mais aussi performantes que les structures classiques. Cela se traduit notamment par l'utilisation omniprésente des matériaux composites dans les structures secondaires de l'industrie aéronautique et leur introduction progressive dans les structures primaires pour supporter toutes les contraintes majeures des avions. En revanche, trouver les dimensions les plus précises permet de tracer tout excès de masse, ouvrant la porte à la pratique de l'optimisation structurelle.

### **III.3.2 Industrie Des Articles De Sport Et De Loisir :**

En raison de leur faible poids, de leur bonne résistance à la fatigue statique et dynamique et de leur stabilité dimensionnelle, les composites sont idéaux pour la fabrication et la conception d'une large gamme de produits de sports et de loisirs , tels que les snowboards et les clubs, les raquettes de tennis, la pêche et crosses de hockey, planches à voile et leurs mâts, voiliers de plaisance, arcs, porte-vélos, instruments de musique, plutôt que le bois, qui ne répond plus aux besoins créés par la civilisation des loisirs, ou l'aluminium, qui ne répond plus aux standards modernes de performance et d'endurance.

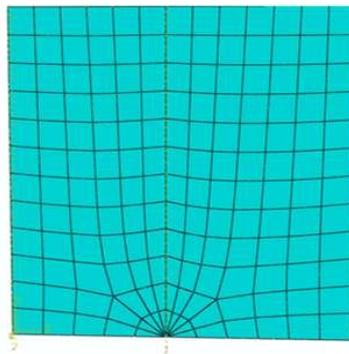
Les résultats de nombreuses études ont confirmé les propriétés élevées d'amortissement des vibrations des skis sur la neige, procurant un confort au skieur tout en conservant les propriétés essentielles du produit. De plus, les matériaux composites peuvent être utilisés pour concevoir des raquettes légères, rigides et dotées d'excellentes propriétés de fatigue dynamique, réduisant ainsi le stress sur les muscles des bras des athlètes, réduisant la fatigue et améliorant le confort.

### III.4 Effet des propriétés mécaniques :

La réparation composite devient de plus en plus importante pour prolonger la durée de vie des structures endommagées. Selon les performances de la réparation composite, il existe de nombreux paramètres tels que les propriétés mécaniques du patch et de l'adhésif, la configuration du patch et la forme du patch.

#### III.4.1 Effet des propriétés mécaniques du patch :

En raison de divers avantages des matériaux composites, la méthode de collage par patch a fait l'objet d'une attention considérable de la part des chercheurs et des ingénieurs. De nombreuses études ont été menées pour mettre en évidence l'effet de type des patches composites collés sur des paramètres de rupture.[24] Dans cette étude, en vue d'analyser le comportement d'une structure fissurée et réparée par raidisseur, La plaque en aluminium Al 2024 dont la loi de comportement (contrainte-déformation). Les modèles en éléments finis utilisés dans le calcul sont représentés dans les (figures 30-31-32). Elles représentent les maillages des 3 structures représentant les techniques de réparation utilisées : par raidisseur en aluminium et par raidisseur et patch en composite.



*Figure 30: Maillage de la plaque non renforcée[24]*

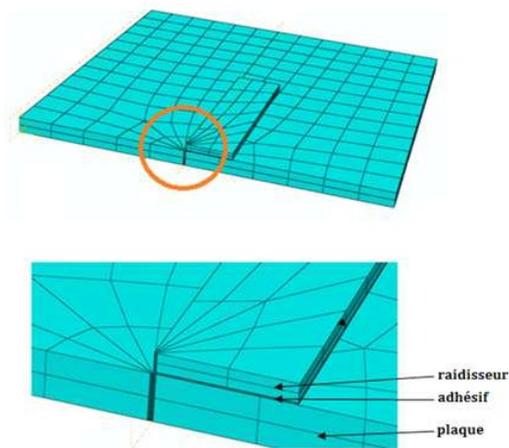


Figure 31:Maillage de la plaque renforcée avec raidisseur[24]

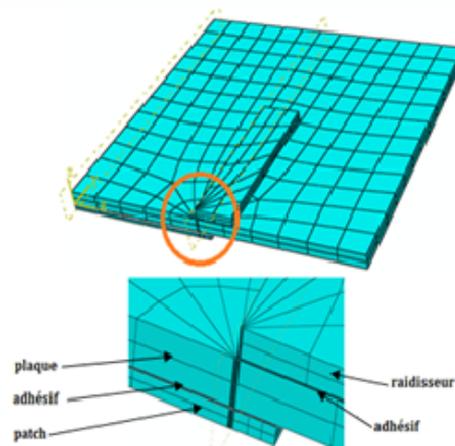


Figure 32:Maillage de la plaque réparée avec raidisseur et patch sur la face opposée.[24]

Les dimensions et les propriétés des matériaux du modèle réparé sont données indiquées dans le tableau 2

Propriétés et dimensions	Matériaux		
	Aluminium2024-T3	Adhésif (FM73)	Bore-époxyde
E1 (GPa)	72	0.97	200
E2 ;E3 (GPa)	-	-	25
v12;v13	0.33	0.32	0.21
v23	-	-	0.21
G12 (GPa)	-	-	7.2
G13; G23 (GPa)	-	-	5.5
W (mm)	15	15	30

H (mm)	60	60	60
e (mm)	0.2	0.2	2

Tableau 2 : Dimensions et propriétés des matériaux.

La (figure33) présente la variation de l'intégral J en fonction de la longueur de la fissure pour les trois configurations.

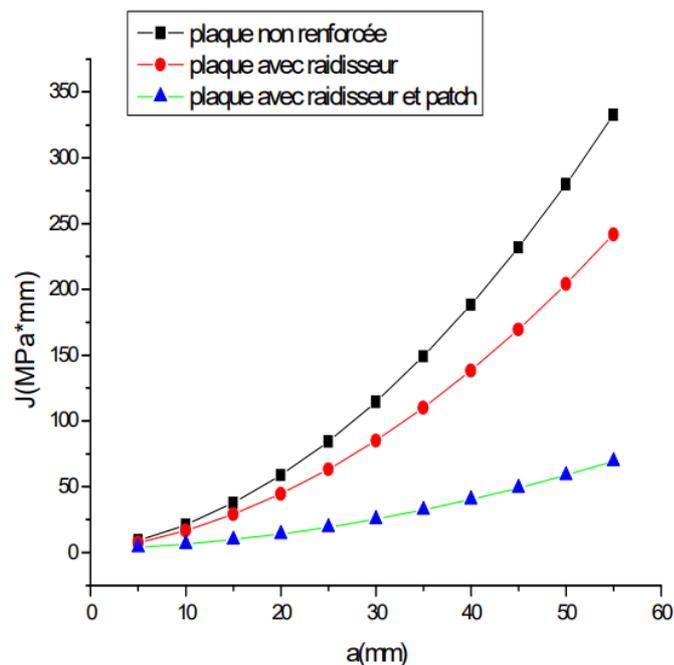


Figure 33 : Comparaison de renforcement par raidisseur et par patch+ raidisseur.

On peut voir pour cette fissure que la réparation par raidisseur plus patch en composite est beaucoup plus efficace que la technique du raidisseur seul. En effet, en comparant les valeurs de l'intégral J pour les deux techniques avec le cas de la fissure non réparée, on remarque que la technique du raidisseur donne une réduction maximale de l'intégral J de l'ordre 27.4% alors que la technique du patch réduit l'intégral J avec un taux maximal de l'ordre de 79.30%.[24]

### III.4.2 Effet des propriétés mécaniques de l'adhésif :

L'adhésif joue un rôle important dans la réparation du patch composite collé, car d'une part il assure le transfert de charge entre le patch composite et la plaque rompue et d'autre part il fixe les deux structures entre elles. C'est pour cette raison que plusieurs travaux ont été menés pour étudier l'effet des propriétés mécaniques des adhésifs sur les structures réparées. Les adhésifs de la meilleure qualité se caractérisent par un faible module de cisaillement, ce qui contribue à réduire la contrainte transmise par la liaison. Dans le cas d'une structure réparée, l'objectif est de transférer un maximum de contraintes à l'adhésif, et donc au patch, pour réduire les contraintes en pointe de fissure. Par

conséquent, en théorie, il est préférable d'utiliser des adhésifs à module de cisaillement élevé (mauvaise qualité de liaison) pour réparer des fissures ou des défauts

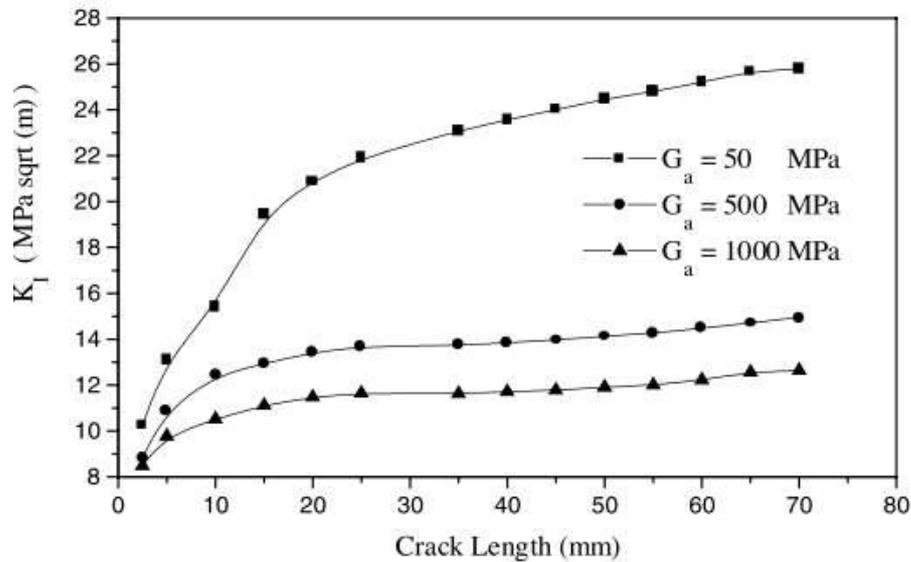


Figure 34: Effet de module de cisaillement de l'adhésif sur les Valeurs de FIC[23].

La (figure 34) montre la variation du facteur d'intensité de contrainte avec la longueur de fissure pour différentes valeurs de module de cisaillement de l'adhésif. Remarquons que lorsque le module de cisaillement de l'adhésif augmente, le facteur d'intensité de contrainte diminue. Ce résultat confirme ce que nous disions précédemment. Pour mieux expliquer l'effet du comportement de l'adhésif sur la valeur du facteur d'intensité de contrainte, nous montrons la (figure 35). Ce dernier suggère que l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif réduit la force de liaison, entraînant une rupture de liaison. Par conséquent, le choix de l'adhésif (caractérisé par le module de cisaillement) pour réparer les fissures doit être optimisé afin de transmettre les contraintes au patch et d'éviter la rupture de l'adhésif.[23]

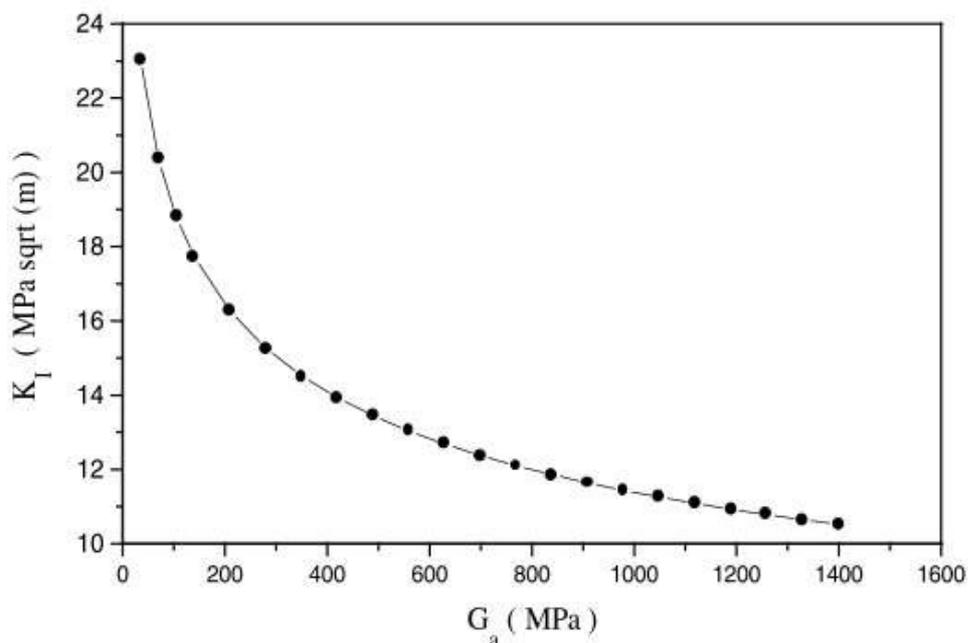


Figure 35:  volution de FIC en fonction de module de cisaillement de l'adessif [23].

### III.4.3 L'orientation Des Fibres Du Composite :

Deux cas ont été considérés pour mettre en évidence l'effet de l'orientation des fibres du patch composite sur la réparation centrale des crevasses. La première consiste à guider les fibres aux propriétés mécaniques les plus élevées dans la direction de la fissure. C'est-à-dire que  $E_1$  est dans la direction de l'abscisse (orientation 1). Dans le second cas, ces fibres sont perpendiculaires à la fissure et  $E_1$  est parallèle à l'axe vertical (orientation 2). Les résultats obtenus sont présentés dans la (figure 36).[25]

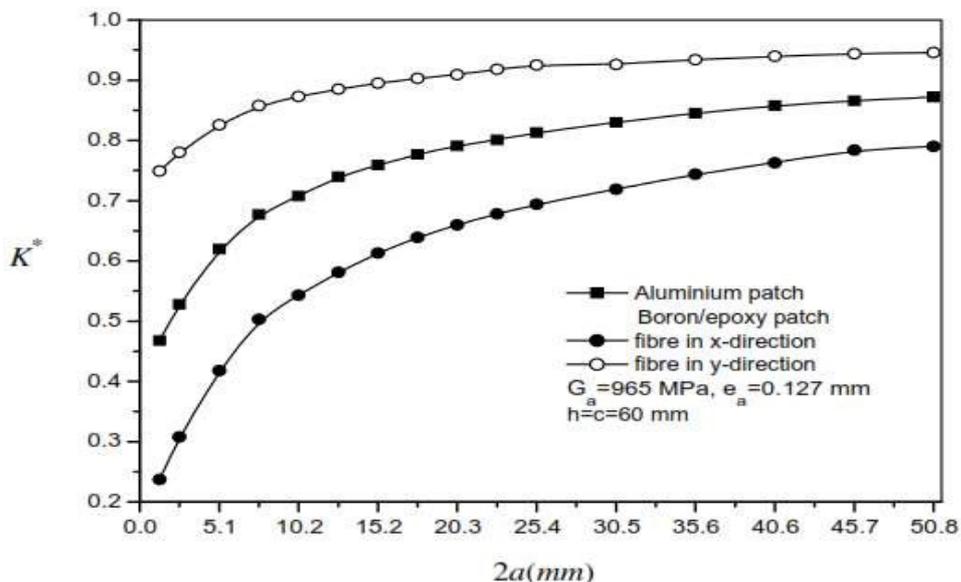


Figure 36: L'effet de l'orientation des fibres d'un patch octogonal sur la réduction du FIC[25].

### III.4.4 Le Nombre Des Couche Du Patch :

Une analyse tridimensionnelle a été réalisée pour étudier l'effet du nombre de couches de patch sur la durée de vie des fissures de fatigue des structures contenant des fissures renforcées par des patches composites. Dans cette analyse l'étude le comportement de propagation des fissures de fatigue des fissures centrales dans les plaques d'aluminium sous le mode de réparation I du patch composite simple face. La (figure 37) représente le modèle géométrique étudié[23].

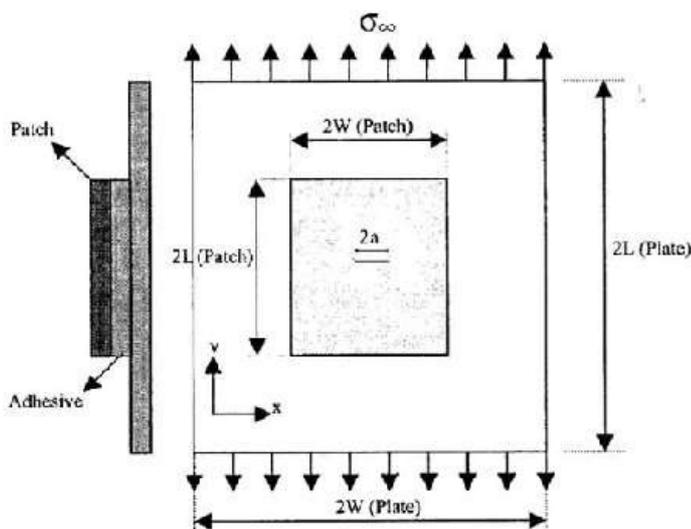
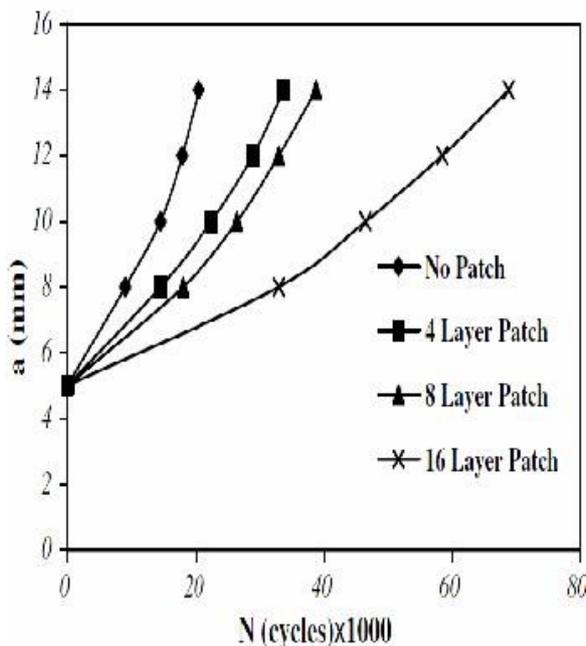


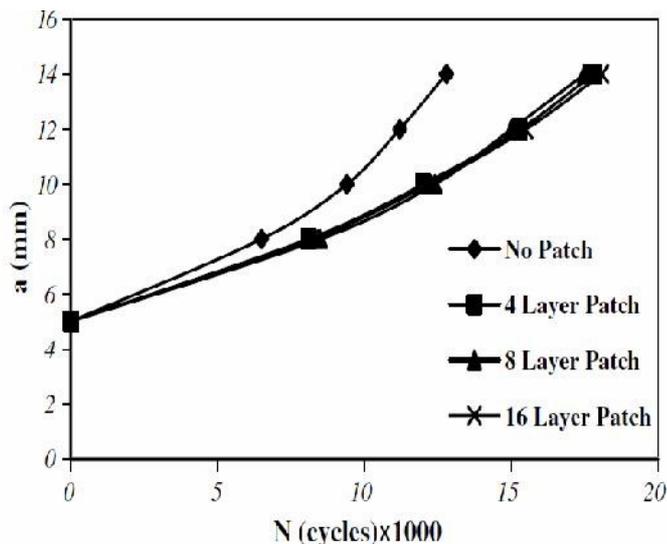
Figure 37: géométrie et chargement de la structure patchée d'un seul côté [23]

L'effet du nombre de couches de patch sur le comportement à la fatigue des plaques d'aluminium de type M(T) réparées et non réparées a été étudié par[26]. Les résultats montrent que



l'augmentation de la durée de vie pour la plaque de 2,29 mm d'épaisseur (Figure 38) augmente significativement avec le nombre de couches de patch composite. En revanche, pour des plaques d'une épaisseur de 6,35 (Figure 39), on ne constate aucune différence de durée avec les changements du nombre de plis[27].

**Figure 38: Longueur de fissure en fonction du nombre de cycles obtenus à partir des expérimentations pour panneaux réparés et non réparés, (d'épaisseur=2.29)[26]**



**Figure 39: Longueur de fissure en fonction du nombre de cycles obtenus à partir des expérimentations pour panneaux réparés et non réparés, (d'épaisseur=6.35)[26]**

Réparation de fissures sur une plaque en alliage d'aluminium 7075T6Le "V" de bore/époxy avec nombre de plis a fait l'objet d'une étude numérique menée par[28], qui a montré qu'après la création d'une fissure initiale de 3 mm sous chargement cyclique de 8 couches, la plaque était réparée par le patch fourni La résistance à la fatigue maximale est 3 fois supérieure à celle de la configuration non patchée. Les résultats ont également montré que les patchs 4 couches et 6 couches avaient la même résistance à la fatigue (Figure 40)[27].

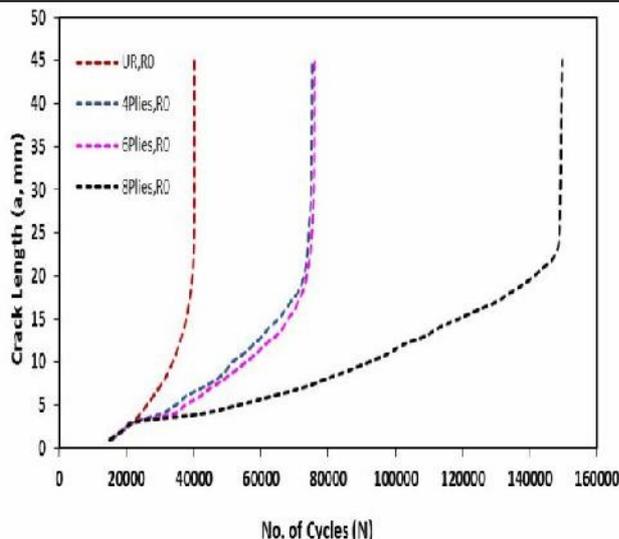


Figure 40: L'effet de nombre de couche sur la durée de vie d'une plaque réparée[28]

### III.4.5 Effet de la forme du patch :

Le matériau de chaussée à emboîtement sélectionné représente des paramètres importants pour améliorer le comportement à la rupture et à la fatigue des structures endommagées. Des études numériques menées par [29] révèlent l'effet des propriétés du matériau de patch sur les changements du facteur d'intensité de contrainte (FIC) des plaques d'alliage d'aluminium 2024 T3 fissurées.

La plaque a été réparée avec divers patchs : bore/époxy, verre/époxy, et rectangulaire carbone/époxy. Les résultats présentés à la (Figure 41) montrent que la résistance à la rupture des panneaux réparés au bore/époxy est significativement améliorée par rapport aux autres types de patchs (carbone/époxy et verre/époxy).

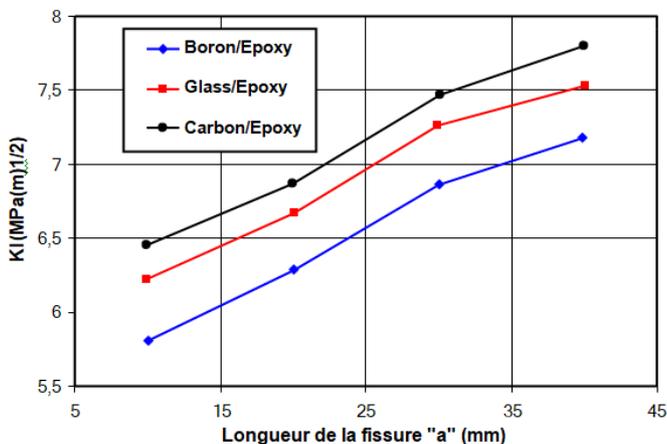


Figure 41 : Effet de la nature du patch sur l'évolution du facteur d'intensité de contrainte [29]

La géométrie du patch représente un autre paramètre qui peut affecter la résistance à la rupture. L'étude numérique [30] montrent de petites variations des facteurs d'intensité de contrainte entre les plaques réparées avec des patches elliptiques et des patches circulaires. La variation maximale est de l'ordre de  $0.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$  (figure 42).

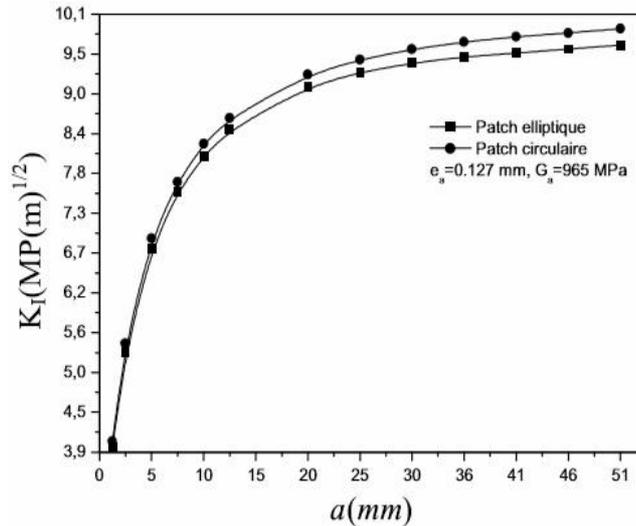


Figure 42 : Influence de la forme du patch sur le FIC[30]

Récemment, [31] montrent que les formes elliptiques et circulaires ont de meilleures performances en résistance à la rupture, caractérisées par un paramètre d'efficacité de patch "R" par rapport aux formes octogonales, carrées et rectangulaires. Une étude comparative de deux types de patches bore/époxy collés sur une plaque M(T) fissurée en alliage 2024 T3 (Figure 43) montre que le patch en forme de double flèche est supérieur au patch rectangulaire. une performance. [30].[27]

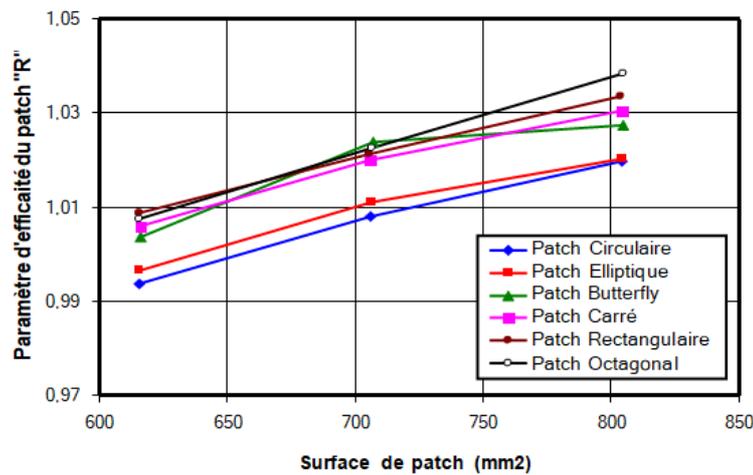


Figure 43 : Effet de la géométrie sur l'évolution du paramètre d'efficacité du patch[31]



# **Chapitre IV**

## **Simulation**

### III.5 Présentations du logiciel :

AFGROW est un programme informatique d'analyse de la tolérance aux dommages (DTA) qui calcule l'initiation des fissures, la croissance des fissures de fatigue et la rupture pour prédire la durée de vie des structures métalliques. Développé à l'origine par le Laboratoire de recherche de l' Air Force , AFGROW est principalement utilisé pour les applications aérospatiales, mais peut être appliqué à tout type de structure métallique qui subit des fissures de fatigue.

La bibliothèque de facteurs d'intensité de contrainte fournit des modèles pour plus de 30 géométries de fissures différentes (y compris la tension, la flexion et la charge d'appui pour de nombreux cas).

De plus, une capacité de fissures multiples permet l'analyse de deux fissures indépendantes dans une plaque (y compris les effets de trous) et d'un coin fissuré non symétrique.

Des solutions basées sur les éléments finis (FE) sont disponibles pour deux fissures traversant et non symétriques au niveau des trous ainsi que pour les fissures se développant vers les trous. Cette capacité permet l'analyse de plus d'une fissure se développant à partir d'une rangée de trous de fixation.

AFGROW implémente cinq modèles différents de croissance des fissures (équation de Forman, équation de Walker, recherche tabulaire, méthode Harter-T et équation NASGRO) pour déterminer la croissance des fissures par chargement cyclique appliqué. Les autres options utilisateur incluent cinq modèles d'interaction de charge (retard) (fermeture, Fastran , Hsu, Wheeler, et Generalized Willenborg ), un modèle d'amorçage de fissures de fatigue basé sur la durée de vie et la possibilité d'effectuer une analyse de la croissance des fissures avec l'effet de la réparation collée. Le programme comprend également des outils tels que : des solutions d'intensité de contrainte, des facteurs de modification bêta (capacité à estimer les facteurs d'intensité de contrainte pour des cas, qui peuvent ne pas correspondre exactement à l'une des solutions d'intensité de contrainte fournies), une capacité d'analyse de contrainte résiduelle, un comptage de cycles , et la possibilité de transférer automatiquement les données de sortie vers Microsoft Excel.

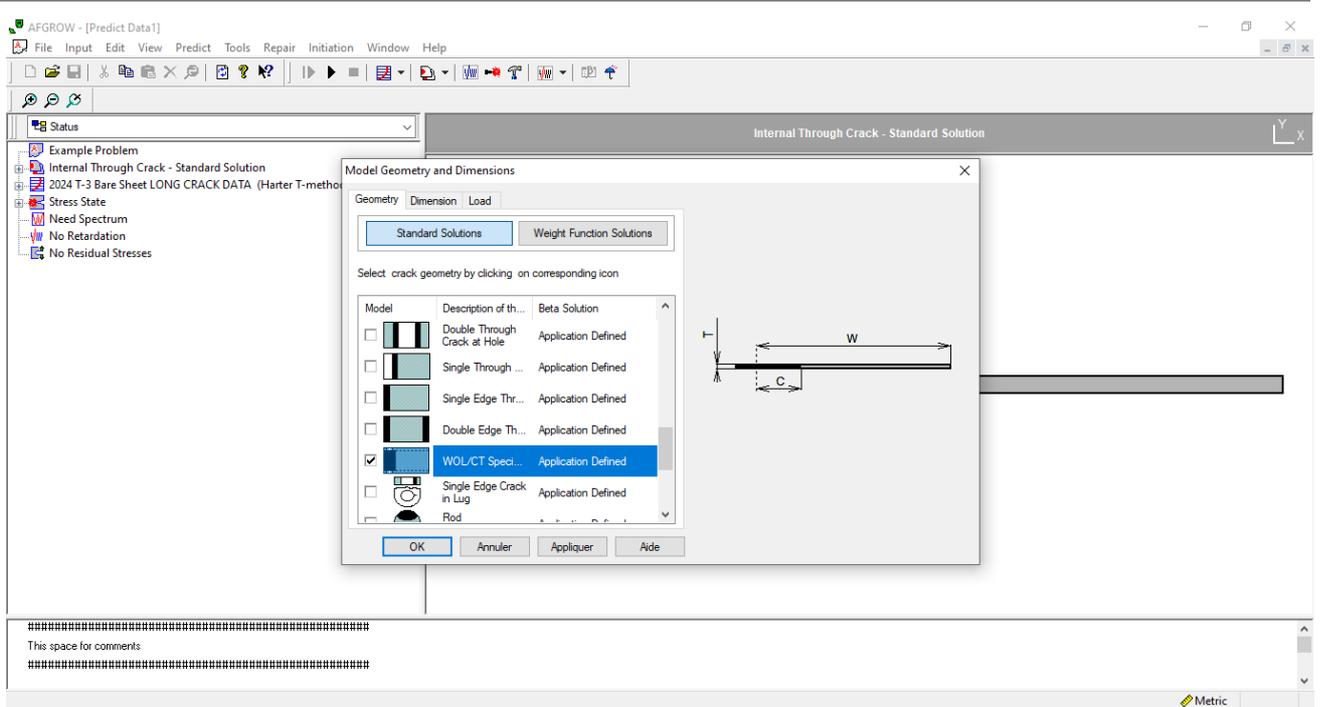


Figure 44: Interface du logiciel AFGROW

### III.6 Les propriétés mécaniques :

- **Propriétés d'éprouvette :**

Tous les essais ont été effectués sur un acier ASTM A536-80-56-06, qui présente des propriétés mécaniques moyennes ; le tableau ci-dessus présente quelques propriétés mécaniques du matériau ainsi que les propriétés mécaniques en fatigue, les détails sont présentés à l'annexe

E (MPa)	Ys (MPa)	$\nu$	C	n
172369	400	0.32	1.35 10 <sup>-11</sup>	2.9

Tableau 3 : propriétés mécaniques du matériau

- **Propriété adhésive :**

L'adhésif utilisé dans notre étude c'est L'ADEKIT A-140 , un adhésif époxyde bi-composants de haute résistance utilisé pour des applications structurales en aéronautique dont les propriétés élastiques sont les suivantes :

E (MPa)	G <sub>a</sub> (MPa)	e (mm)
2690	1000	0.28

Tableau 4 : propriétés mécaniques de l'adhésive

- **Propriété du patch :**

le patch utilisé c'est le Bore/époxyde avec les propriétés élastiques suivantes :

$E_L$ (MPa)	$E_T$ (MPa)	$G_L$ (MPa)	$G_T$ (MPa)	$\nu_L$	$\nu_T$
200000	19600	7200	5500	0.30	0.28

Tableau 5 : propriétés mécaniques du patch

### III.7 Présentation du modèle géométrique :

Dans cette étude, nous avons choisi de faire nos simulations sur des éprouvettes CT75, dans la (figure 45) qui suit, nous présentant tous les dimensions de cette éprouvette selon la norme ASTM; l'éprouvette est prés fissuré

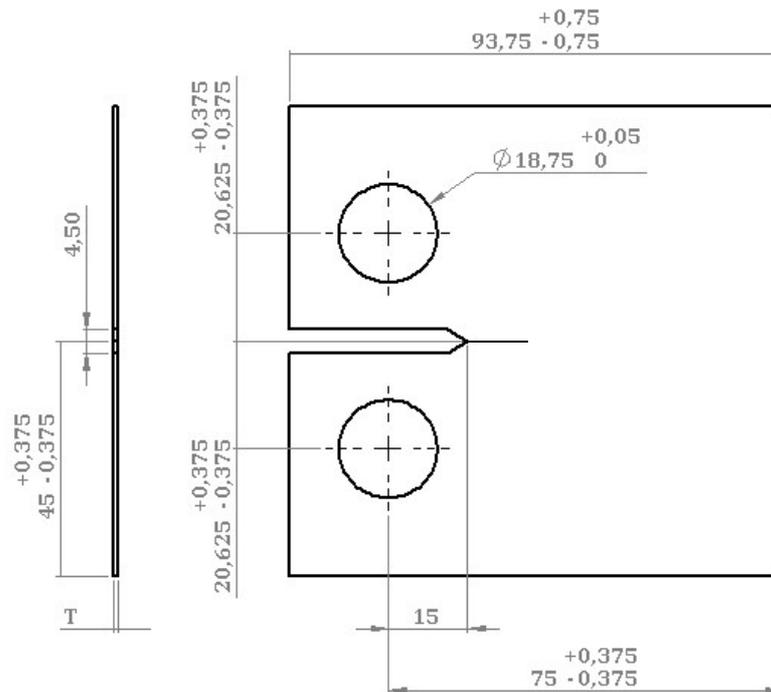


Figure 45 : model géométrique

Dans la suite des simulations de propagation des fissures en fatigue, nous avons les mêmes dimensions d'un patch carré de 30mm x 30 mm et épaisseur  $T = 1.1$  mm

Les charges appliquées sont on (**mode I**) mode d'ouverture

### III.8 Influence du rapport de charge sur la durée de vie :

Dans le but de visualiser l'influence du rapport de charge sur la durée de vie du matériau, nous avons simulé la propagation la fissure sous différents rapport de charges :

$R=0.1$  ;  $f_{\max}=9000N$  ,  $f_{\min}=900N$  .

$R=0.3$  ;  $f_{\max}=9000N$  ,  $f_{\min}=2700N$  .

$R=0.5$  ;  $f_{\max}=9000N$ ,  $f_{\min}=4500N$  .

Après analyse de la (figure 46), nous avons conclu que le rapport de charge influe considérablement sur la durée de vie du matériau, lorsque le rapport de charge augmente la durée de vie augmente

Elle est de 85542 cycles pour un rapport de charges de  $R=0.1$  ; de 124321 cycles pour un rapport de charges de  $R=0.3$  et de 270 587 cycles pour un rapport de charges de  $R=0.5$

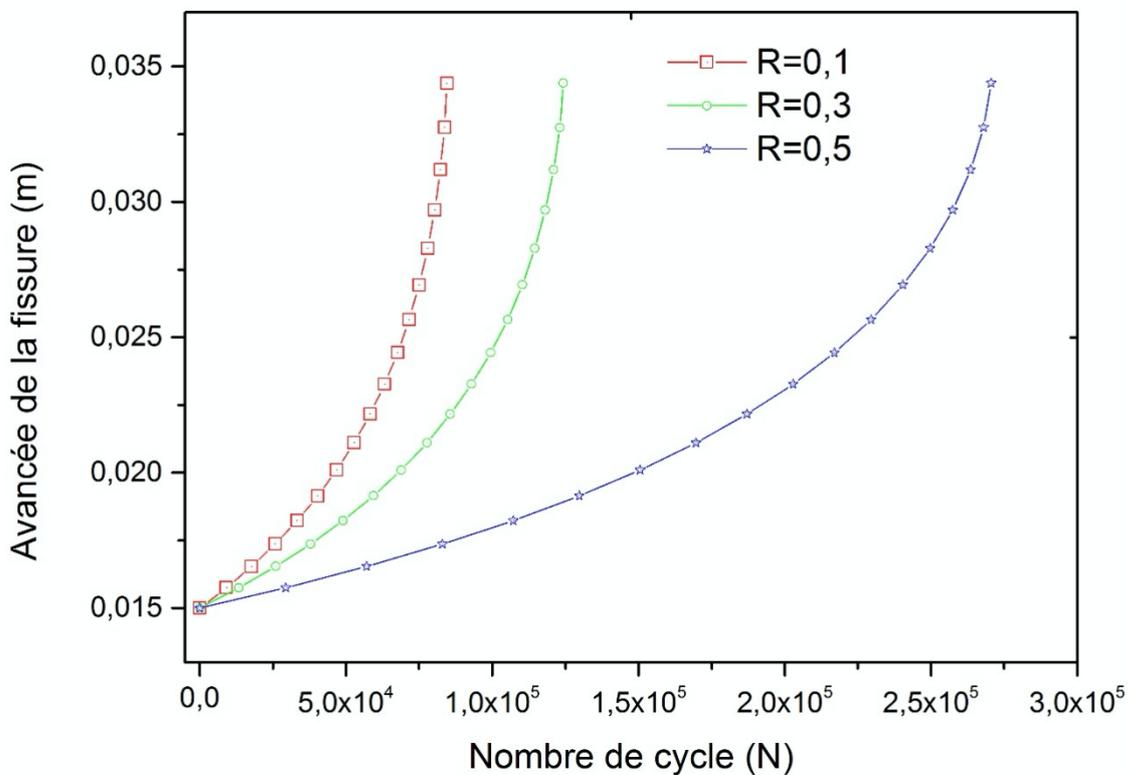


Figure 46 : représente la variation de l'avancée de fissure (m) en fonction de nombre de cycles (N) (sans réparation)

### III.9 Influence de la réparation sur la durée de vie :

Cette partie, nous avons essayé de voir l'influence de réparation sur la durée de vie sans réparation afin d'apparaître l'effet bénéfique de la réparation.

La (figure 47) montre une étude comparative sous différents rapports de charge 0.1 ;0.3 et 0.5 simuler sans et avec réparation

Suite à la simulation, plusieurs conclusions peuvent être faites

- On voit clairement quel que soit le rapport de charge l'effet bénéfique de la réparation en comparant entre la propagation de la fissure sans et avec réparation pour les différents rapports de charge 0.1 ; 0.3 et 0.5, ces résultats sont illustrés dans le tableau suivant

Rapport de charge	Durée de vie avant réparation	Durée de vie après réparation	Gain en %
0.1	84542	186443	54,65%
0.3	124321	274743	54,75%
0.5	270587	603632	55,17%

Tableau 6 : recapitulatif des résultats

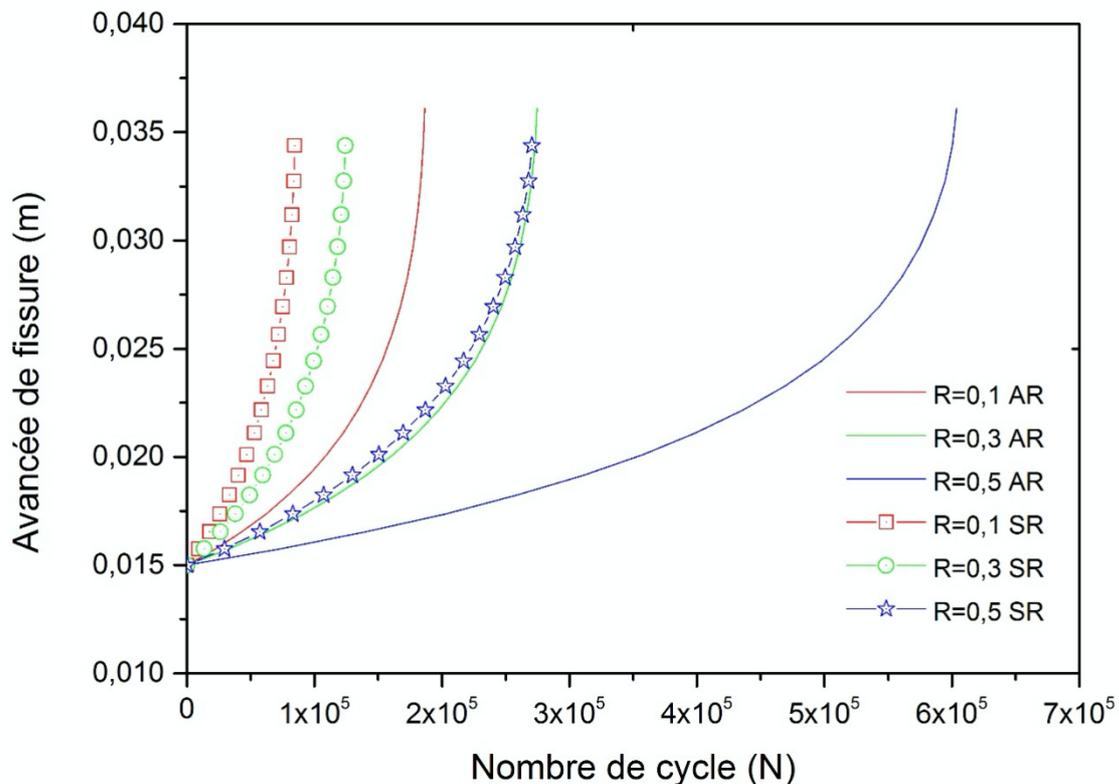


Figure 47 : Avancée de fissure en fonction de nombre de cycle (Sans réparation) et (avec réparation)

### III.10 Influence de l'orientation des fibres sur la durée de vie réparation (simple et double) :

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence de l'orientation des fibres et le type réparation sur la durée de vie du matériau

Afin de faire ces simulations, nous avons retenu qu'un seul rapport de charge  $R=0.1$  sous différentes configurations (tableau 5), afin de comparer entre les deux types de réparations.

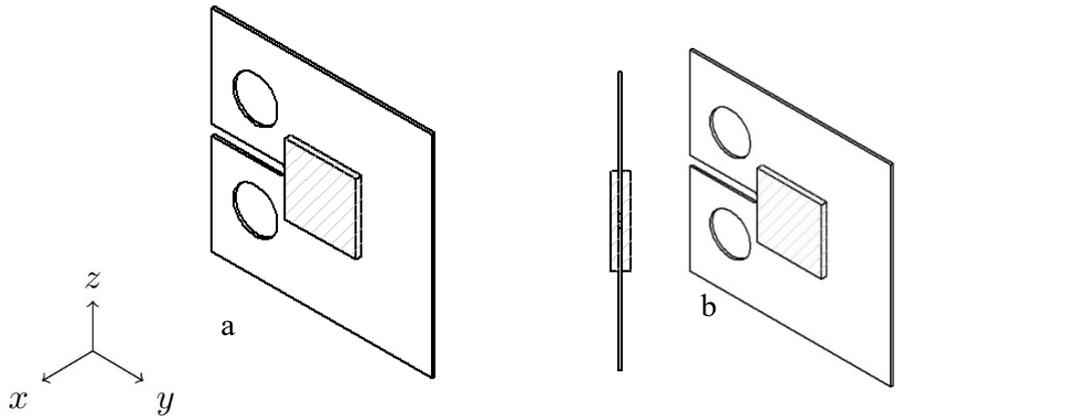


Figure 48 : type de patch (simple (b) / double (a))

Les détails et les schémas de toutes les configurations sont donnés dans les figures suivants

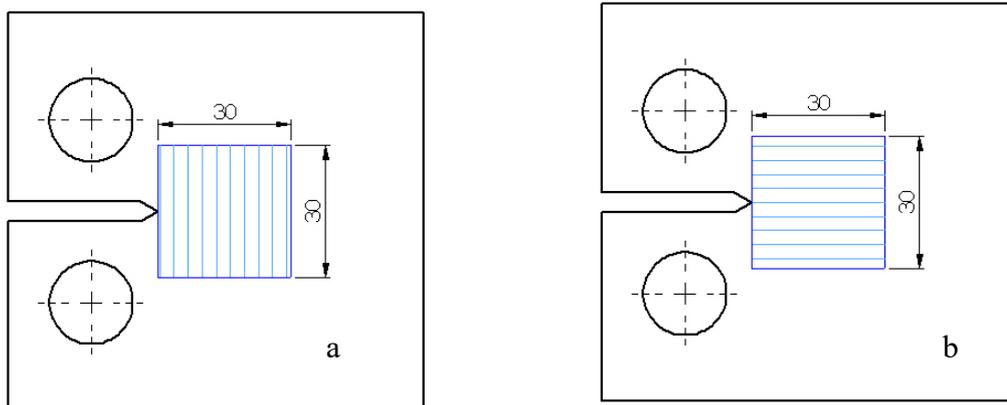


Figure 49 : Orientation : a (0°), b (90°)

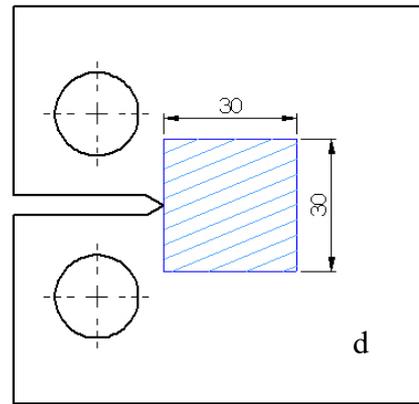
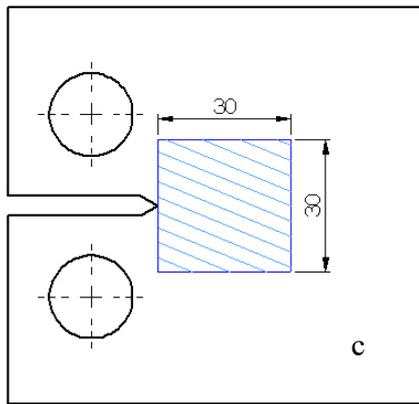


Figure 50 : Orientation : c (22.5°), d (-22.5°)

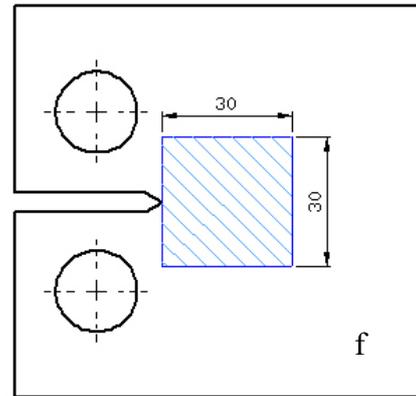
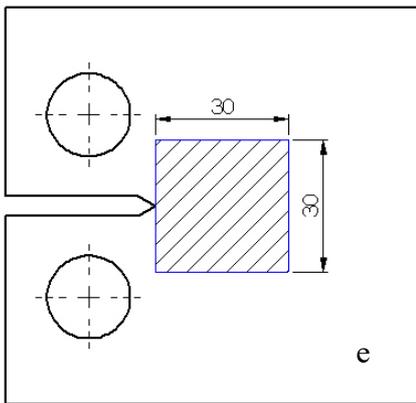
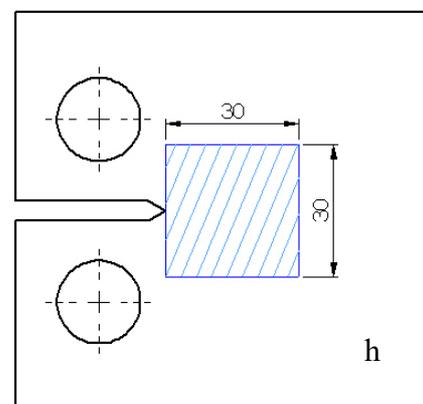
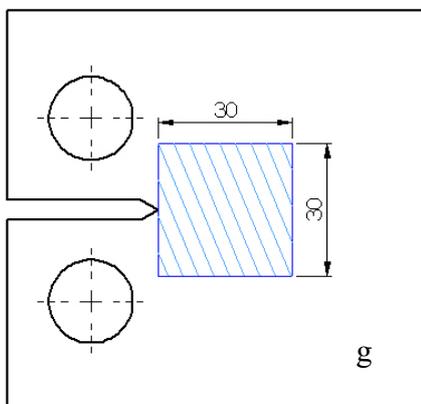


Figure 51 : Orientation : e (45°), f (-45°)



*Figure 52 : Orientation : g (67.5°), h (-67.5°)*

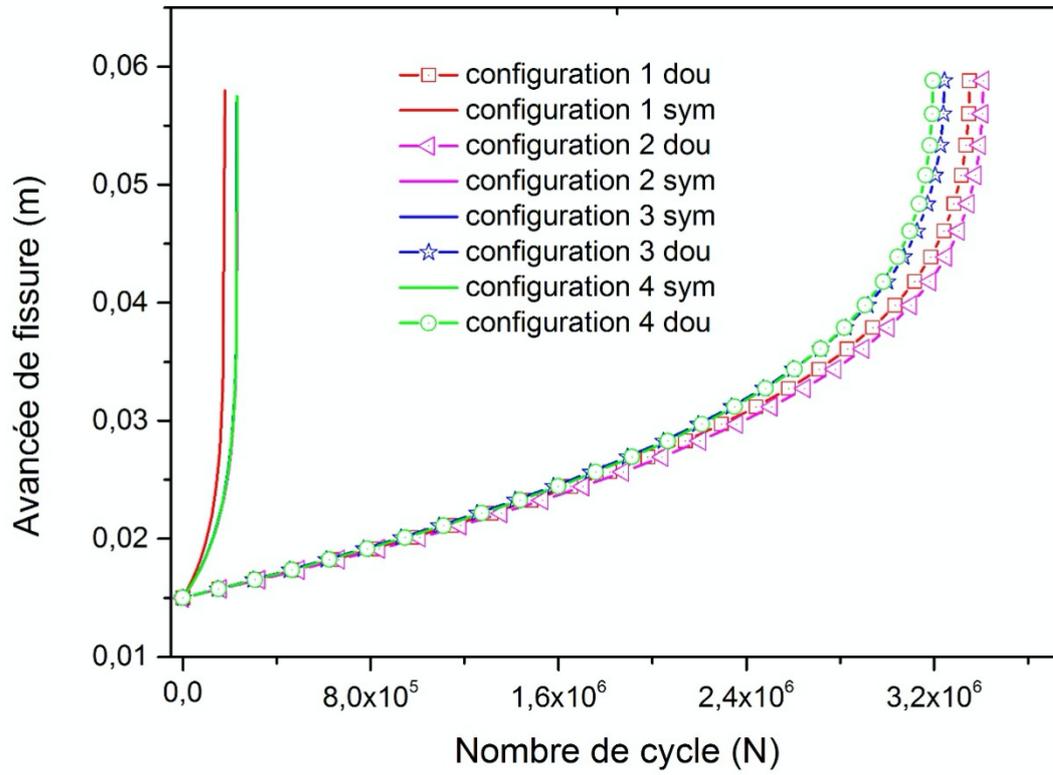
Combinaisons	Orientation en °						
	0	22.5	-22.5	0	22.5	-22.5	0
<b>Combinaison 1</b>	0	22.5	-22.5	0	22.5	-22.5	0
<b>Combinaison 2</b>	0	45	-45	0	45	-45	0
<b>Combinaison 3</b>	0	90	-90	0	90	-90	0
<b>Combinaison 4</b>	0	67.5	-67.5	0	67.5	-67.5	0

*Tableau 7 : représente les différentes combinaisons étudiées*

En analysant l'étude comparative effectuée entre l'influence entre le type de patch utilisé, nous pouvons conclure que quel que soit la combinaison ou l'orientation donnée le double patch augmente considérablement la durée de vie par rapport au patch d'un côté ou symétrique, attitre d'exemple, pour la combinaison 2 et pour le même rapport de charge  $R=0.1$ , la durée de vie été de 231000 pour le simple patch par contre elle été de 3409546 lorsque nous avons utilisé le double patch , soit un gain de 3178546 , une augmentation de 14,7 fois qu'avec le simple.

Pour le cas du double patch, on remarque que pour tous les combinaisons la durée de vie varié entre 3195271 et 3409546 avec un avantage pour la combinaison 2 (45°).

Pour le cas du patch simple, on remarque que pour tous les combinaisons la durée de vie varié entre 180000 et 233000 avec un avantage pour la combinaison 2 (45°).



**Figure 53 :** Représente la variation de l'avancée de fissure(m) en fonction de nombres de cycles sous l'influence de différentes orientations des fibres (réparation simple /double)

# **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

### **Conclusion Générale et Perspectives :**

A l'issu de ce modeste travail et suite à l'élaboration de l'étude bibliographique réalisée ainsi que les simulations numériques effectués avec le logiciel AFGROW, nous avons développés plusieurs compétences et tirer plusieurs conclusions

Sur le premier plan nous avons pu développer nos compétences dans le domaine de recherche bibliographique et la rédaction de notre manuscrit, ainsi que l'utilisation du logiciel AFGROW dans la simulation

Sur le deuxième plan ; nous avons tirées ces conclusions :

- Les simulations elles nous a permis de d'étudier et conclure que le rapport de charge a une influence direct sur la durée de vie du matériaux, la relation entre les deux est proportionnelle, dès que le rapport de charge augmente la durée de vie du matériau.
- Quel que soit le type de réparation et quel que soit le rapport de charge, la réparation avec patch est toujours bénéfique car elle augmente la durée de vie du matériau.
- Le patch double augmente considérablement la durée de vie par rapport au patch simple.
- La combinaison 2 est la meilleure orientation comparativement avec les autres, et la combinaison 4 est la plus intéressante.

Cette étude, nous a permet d'ouvrir plusieurs perspectives de recherche dans l'avenir et même étudier d'autre paramètre et voir leurs influences sur la durée de vie du matériau, on peut envisager d'étudier la géométrie du patch, la taille du patch ou même étudier d'autre paramètres tel que le facteur d'intensité de contrainte et de quel valeur les fissures s'amorce

# **REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE**

---

### Référence bibliographique:

- [1] A. BOUSSOULA and K. MADANI, "Nouvelle méthode de la conception de réparation par patch en composite," 2012.
- [2] J.-D. Mathias, "Etude du comportement mécanique de patches composites utilisés pour le renforcement de structures métalliques aéronautiques," Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2005.
- [3] P. Cheng, X.-J. Gong, J. Rousseau, and S. Aivazzadeh, "OPTIMISATION DES PATCHS DE RÉPARATION DES STRUCTURES COMPOSITES."
- [4] A. SALMI, "Etude de la propagation de fissures sous chargement thermomécanique," 2020.
- [5] M. yacine, "Application De la Méthode De Collocation De frontière Au Calcul Du Facteur," Master, Génie Mécanique, Université Saad Dahleb, 2014.
- [6] G. R. Irwin, "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate," 1957.
- [7] H. Westergaad, "Bearing Pressures and cracks Trans ASME," *Journal, Appl, Mech*, 1939.
- [8] a. achwek, "etude de la reparation Des pipes endommagés par patch en composite " mémoire, faculte des sciences de l'ingenieur, djillali liabes de sidi bel-abbes, 2012.
- [9] [https://stringfixer.com/fr/Fracture\\_toughness](https://stringfixer.com/fr/Fracture_toughness).
- [10] Y. L. Lee, "JP an, R. Hath away, M. Barkey. Fatigue testing and analysis," ed: Elsevier icc, 2005.
- [11] S. Abdelsadok and M. Ghalem, "Calcul En Fatigue Des Structures Sollicitées Sous Chargements Multiaxiaux D'amplitude Constante," Master, Génie Mécanique, Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2019.
- [12] A. ALIOUA, "Étude probabiliste sur la pertinence des concepts de la mécanique de la rupture pour la prédiction de la ténacité des matériaux soudés cas de pipelines: approche expérimentales et numériques," 2020.

- 
- [13] Available: <https://africanmanager.com/le-plus-grand-pipeline-dafrique-passera-par-la-tunisie/>
- [14] M. Abderrahim, "Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines," *Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en génie mécanique. Université Aboubekr BELKAID-Tlemcen.*
- [15] M. B. Ali and M. B. Baghdad, "Centre Universitaire BELHADJ BOUCHAIB d'Ain Témouchent Institut des Sciences et de la Technologie Département de Génie Mécanique."
- [16] N. Djamel, "Optimisation des Méthodes de Réparation des Gazoducs," Doctorat en sciences, Génie Mécanique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf USTOMB, 2019-2020.
- [17] H. M. Amine, "Défauts Dans Les Pipelines Et Leurs Effets Sur Le Comportement En Fatigue.," Génie Mécanique, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2015.
- [18] M. Fekih, "Etude Sur La Méthode De Réparation Des Ouvrages Métalliques Par Collage De Matériau Composite Cas De La Ligne De Pipeline Gz1 40," Master, Génie Mécanique, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2014.
- [19] M. Meriem and E. Houria, "Comportement en rupture d'une fissure circonférentielle dans un pipeline soumis au chargement mixte (Pression, moment et traction)," Master, Département de Génie Mécanique, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent 2019/2020.
- [20] M. Allouti, "Etude de la nocivité de défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaisons," Université Paul Verlaine-Metz, 2010.
- [21] M. BENEDDEB, "Étude les défauts de soudage des pipelines," 2012.
- [22] M. Zhang, "Composite patches for enhancing application on civil infrastructures," Lyon, 2020.

- 
- [23] A. Baltach, "Contribution à l'étude des fissures de fatigue réparées par patch en composite," 2017.
- [24] F. Hamida, S. Mokadem, K. Malika, O. Wahid, and M. Kouider, "Effet de la réparation par patch des structures aéronautiques raidies," 2014.
- [25] O. Djamel, Z. Ramdane, and S. Mohamed, "Effet de la forme géométrique du patch sur la réduction du FIC en modèle," *Nous*, vol. 4, p. 50.0.
- [26] H. Hosseini-Toudeshky, "Effects of composite patches on fatigue crack propagation of single-side repaired aluminum panels," *Composite structures*, vol. 76, 2006.
- [27] S. F. Zohra, "Etude Du Comportement En Rupture Par Fatigue Des Structures Réparées Par Patch Sous Chargement Variable," *Génie Mécanique*, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2018.
- [28] S. M. Khan and M. Es-Saheb, "Fatigue crack growth analysis of cracked aluminum plates repaired with bonded composite patch," *IJMPE*, vol. 8, 2015.
- [29] M. N. Khodja N., "Analyse élastoplastique de la réparation d'une fissure émanant d'un trou," *Mémoire de Master*, U.D.L.Sidi Bel Abbés, 2013.
- [30] R. Mhamdia, B. B. Bouiadjra, B. Serier, M. Belhouari, B. M'hidi, S. B. Abbes, *et al.*, "The patch shape effects on the performances of bonded composite repair in aircraft structures," in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Istanbul, Turkey*, 2012.
- [31] E. Besseghier, A. Djebli, M. Bendouba, and A. Aid, "Effect of Patch Shape on the Repair Efficiency of a Cracked Aluminum Panel," *Materials and Engineering Structures*, vol. 4, pp. 225-233, 2017.

