



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN-
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master
En
Génie Mécanique

Option

Ingénierie des systèmes mécaniques productives

Présenté par

MECHERNENE Abderrahim

THÈME

Etude du comportement en fatigue des aciers pour
pipelines.

Soutenu en octobre 2013

Devant le jury :

Président	HADJOUI Abdelhamid	Pr	UABB Tlemcen
Encadreur	HADJOUI Fethi	MC_B	UABB Tlemcen
Co-Encadreur	BENACHOUR Mustapha	MC_A	UABB Tlemcen
Examineur	SEBAA Fethi	MC_B	UABB Tlemcen
Examineur	MEFTAH Khouane	MC_A	UABB Tlemcen

Année universitaire 2012-2013

دعاء

اللهم بك أستعين وعليك أتوكل اللهم ذلك لي صعوبة أمري

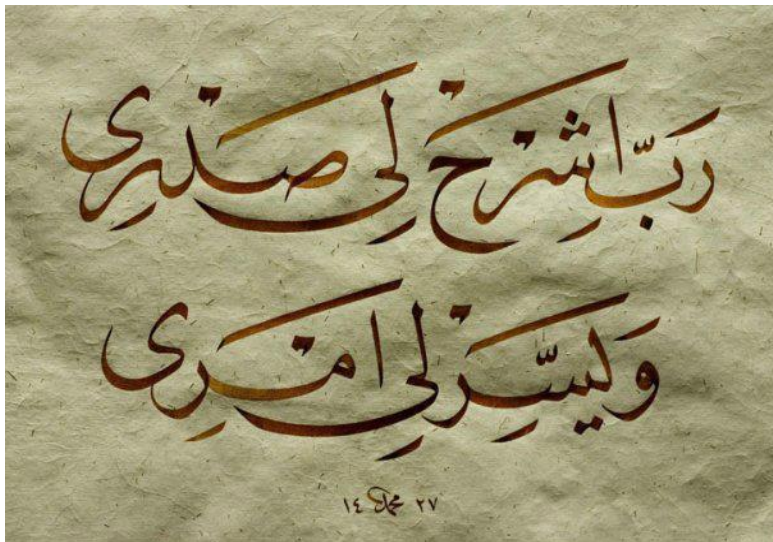
وسهل لي مشقته وامزقني من الخير كله أكثر مما أطلب

وإصرف عني كل شئ - رب اشرح لي صدري - ويسر لي

أمري كله يا كريم واحلك عقدة من لساني يفهموا قولي

اللهم أسألك أن تيسر لي هذا الأمر واجعل الخيرة في

ذلك إنك على كل شيء قدير



رَبِّ لَيْسِرٌ وَلَا تُعْسِرُ رَبِّ تَجَمُّ بِالْخَيْرِ

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A Ma très chère Mère qui a été toujours à mes côtés ;

A Mon Père qui m'a toujours guidé et soutenu ;

A mes frères Lakhdar et sa femme, Zakaria, Sid Ahmed et ma sœur pour leur soutien moral ;

A mes demi-frères Mohammed, Fatima et Nour Elhouda.

A mes amis intimes Mohammed, Ismail, Amin et Ahmed ;

A la mémoire de mon défunt ami Zohir Ternane ;

A mes amis auxquelles j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie et mes amies qui ont toujours encouragé ;

A mes amis de Bloc B de centre de formation et tous les personnes de la direction (Sonatrach – Hassi R'mel) ;

A tous les membres de SMA Tlemcen et spécialement de groupe ALAQSSA de Ain Fezza et tous mes amis de Foot ;

A toutes les familles MECHERNENE, BALEGU, BENNACEUR, HAMADOUCHE et KHEFFAF ;

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin et qui me connaissent

MECHERNENE ABDERRAHIM

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie **ALLAH** le tout puissant pour ces faveurs et ses bontés, de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de terminer ce modeste travail.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements à mon encadreur monsieur **HADJOUI FETHI** Maitre de conférence au département de génie mécanique (faculté des sciences de l'ingénieur- université Abou Bakr BELKAID- Tlemcen) d'avoir accepté de diriger ce travail ainsi que pour son entière disponibilité, soutien et ses précieux conseils durant toute la période de l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à mon co-encadreur monsieur **BENACHOUR MUSTAPHA** Maitre de conférence au département de génie mécanique (université Abou Bakr BELKAID- Tlemcen) pour l'aide qui m'a apportée.

C'est un honneur pour moi que Monsieur **HADJOUI ABDELHAMID** Professeur à l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, qui a accepté de présider le jury.

Je remercie également messieurs **SEBAA Fethi** maitre de conférence au département de génie mécanique et **MEFTAH Khouane**, Maitre de conférence (faculté des sciences de l'ingénieur -université Abou Bakr BELKAID de Tlemcen) qu'ils ont accepté d'examiner et évaluer le contenu scientifique de ce mémoire.

Mes vifs remerciements vont aussi à messieurs **FILLOULI.M** (R. bureau d'étude service maintenance) et **LACHKHEM.Y** (R. service corrosion) de la direction technique (zone de production Hassi R'mel) pour leurs aides et leurs précieux conseils.

Mes remerciements s'adresser à tous les professeurs de notre cursus universitaire, à centre de formation du Hassi R'mel et à tous mes amis de master ISM et MI.

Et je n'oublie pas un vif remerciement à toute ma famille qui n'a jamais arrêté de me soutenir et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES ABREVIATIONS.....	IX
LISTE DES SYMBOLES.....	X
RESUME.....	XIII
ملخص.....	XIV
ABSTRACT.....	XV

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

PRESENTATION DU CHAMP DE HASSI R'MEL

I.1. Introduction.....	3
I.2. Situation Géographique De Hassi R'mel.....	4
I.3. Historique Du Champ De Hassi R'mel.....	5
I.4. Présentation Du Champ De Hassi R'mel.....	6
I.5. Carte Géométrique De Hassi R'mel Et Les Sites Des Modules.....	7
I.5.1. Organisation de la direction régionale de Hassi R'mel.....	7
I.6. Organisation Fonctionnelle Du MPP II.....	9
I.6.1. Procédés de traitement du gaz.....	10
A. Procédés « HUDSON ».....	11
B. Procédés « PRITCHARD ».....	11
I.6.2. Composition du gaz brut de Hassi R'mel.....	11
I.6.3. Description du process.....	12
A. Symbolisation.....	12
B. Description du fonctionnement d'un train.....	12
I.7. Conclusion.....	16

CHAPITRE II.

GENERALITES SUR LES ACIERS & ANOMALIES DES PIPELINES

II.1. Generalites Sur Les Pipelines Et Les Aciers.....	17
--	----

II.1.1. Introduction.....	17
II.1.2 Définition	17
II.1.3. Caractéristiques des tubes	19
II.1.4. Les aciers	20
II.1.5 Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers.....	22
II.1.6 Contexte industriel	24
II.1.6.1. Procédé de fabrication des tubes de pipelines.....	24
II.2. Principales causes de defaillance des pipelines	28
II.2.1. Introduction.....	28
II.2.2. Défaillances Des Tubes.....	28
II.2.2.1 Les Fissures et ruptures des tubes cylindriques sous pression.....	31
II.2.2.2 Définition d'une fissure.....	31
II.2.2.3. Différents types de fissures.....	32
II.2.3 Phénomène De La Corrosion	32
II.2.3.1. Définition.....	32
II.2.3.2. Processus (types) de corrosion.....	33
II.2.3.3. Morphologie de la corrosion	35
II.2.4. Erosion	36
II.2.4.1. Théorie de l'érosion.....	36
II.2.4.2. Mécanismes de l'érosion par des particules solides.....	37
II.2.5. Rapport D'incidente Ligne 8" De Décharge Des PSV Vers Torche Ligne 325-326/SCN	38
II.2.6. Conclusion	43

CHAPITRE III.

ETUDE BIBLIOGRAPHIE & COMPORTEMENT EN FATIGUE

III.1. Introduction	44
III.2. Approche Théorique Sur La Mécanique Linéaire De La Rupture	45
III.2.1. Introduction	45

III.2.2. Définitions	45
III.2.3. Contraintes Mécaniques	45
A. Contraintes mécaniques et déformation.....	46
B. Contraintes résiduelles.....	47
C. Etat de contrainte.....	47
III.2.4. Equations de la mécanique de la rupture	49
III.2.5. Transition Ductile-Fragile	50
A. Ductilité.....	50
B. Effets de la microstructure sur la rupture ductile.....	51
C. Fragilité.....	52
D. Différences entre le comportement ductile et la rupture fragile.....	52
III.3. Etude D'un Milieu Fissuré	53
III.3.1. Modes de rupture	54
III.3.2. Dimensionnement d'un tube sous pression concept de fuite avant rupture	56
III.4. Propagation De Fissures Par Fatigue	58
III.4.1. Mécanismes de fatigue	60
III.4.2. Caractérisation de la propagation de fissure	61
III.4.3. Paramètres influant sur le comportement en fatigue	63
A. Paramètres d'ordre métallurgique.....	63
B. Paramètres d'ordre mécanique et géométrique.....	64
III.4.4. Modèles de prédiction de la durée de vie	65
III.5. Comportement En Fatigue Des Aciers Pipelines	66
III.6. Conclusion.....	68

CHAPITRE VI.

SIMULATION DE LA FISSURATION & RESULTAT ET DISCUSSION

IV.1. Simulation De La Propagation Des Fissures Par Fatigue	69
IV.1.1. Introduction	69
IV.1.2. Présentation Du Code.....	69
IV.1.3. Modèle de paris	78

IV.1.4. Matériaux D'étude.....	79
IV.2. Résultats Et Discussion.....	82
IV.2.1. Introduction.....	82
IV.2.2. Effet Du Rapport De Charge R.....	82
IV.2.3 Effet De L'amplitude De Chargement.....	84
IV.3. Conclusion.....	86
Conclusion Générale.....	87
Références Bibliographiques.....	89

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE -01-

Figure 1.1. Situation géographique de Hassi R'mel	4
Figure 1.2. Les secteurs et les modules du HASSI R'MEL	6
Figure 1.3. Organisation de la Direction régionale de Hassi R'mel	9
Figure 1.4. Vue générale d'un module	10
Figure 1.5. Vue partielle d'un train de traitement de gaz	12
Figure 1.6. Description technique du train	15

CHAPITRE -02-

Figure 2.1. Pipeline dans l'environnement	18
Figure 2.2. Caractéristiques des tubes	20
Figure 2.3. Microstructure de l'acier API 5L X65, analyse longitudinale avec un grossissement de X570 et de X1150	21
Figure 2.4. Sens longitudinale et transversale de tube	23
Figure 2.5. Technique de fabrication des tubes soudés en spirale	24
Figure 2.6. L'angle d'introduction de la bande	25
Figure 2.7. Croquage	25
Figure 2.8. Formage sous forme "U"	26
Figure 2.9. Formage sous forme "O"	26
Figure 2.10. Soudage manuelle et automatique des tubes	26
Figure 2.11. Expansion	27
Figure 2.12. Fabrication de pipe sans soudure « Schéma du filage sur aiguille permettant d'obtenir un tube sans soudure »	27
Figure 2.13. Organigramme présente les grandes catégories d'endommagement	29
Figure 2.14. Causes des ruptures de pipelines en cours d'exploitation	30
Figure 2.15. Microscopie optique sur un acier corrodé	33
Figure 2.16. Corrosion par piqûres	36
Figure 2.17. Corrosion intergranulaire d'un acier inoxydable	37

Figure 2.18. Mécanismes d'érosion par des particules	39
--	----

CHAPITRE -03-

Figure 3.1. Exemple de fissure sur une plaque	46
Figure 3.2. Types de contraintes	48
Figure 3.3. Etat de contrainte	50
Figure 3.4. Rupture ductile d'un tuyau de D. moyen sous l'effet de la pression interne	53
Figure 3.5. Courbes contrainte-déformation	54
Figure 3.6. Les zones de champs mécaniques.....	56
Figure 3.7. Plasticité en pointe de fissure.....	57
Figure 3.8. Modes principaux de chargement.....	57
Figure 3.9. Schématisation du cycle de chargement et de la géométrie.....	58
Figure 3.10. Schématisation des défauts dans le tube	59
Figure 3.11. Courbe définissant le domaine sécurité dans le plan $a-\sigma$ sous chargement monotone et en fatigue.	60
Figure 3.12. Représentation schématique d'un chargement de fatigue	61
Figure 3.13. Amorçage de microfissures dû à la formation d'intrusions et extrusions.....	62
Figure 3.14. Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycle	63
Figure 3.15. Régimes de propagation des fissures de fatigue	64
Figure 3.16. Phénomène de fermeture de la fissure	65
Figure 3.17. Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X42, et X70.....	69
Figure 3.18. Effet de l'orientation des fissures sur la vitesse de fissuration de l'acier API 5L X65 (Sens T-L et T-S).....	69
Figure 3.19. Vitesse de fissuration (a) l'acier pour pipeline dans le sens TL (b) zone de fusion sous l'effet du rapport de charge.	70

CHAPITRE -04-

Figure 4.1. Le site eFatigue	73
Figure 4.2. La fenêtre du code eFatigue	73
Figure 4.3. Barre latérale gauche pour choisir les types d'analyses.....	74
Figure 4.4. Calculatrice de la fatigue	74

Figure 4.5. L'analyse de propagation de fissure à amplitude constante.....	75
Figure 4.6. Les paramètres du chargement.....	75
Figure 4.7. Caractéristiques des matériaux	76
Figure 4.8. Facteur d'intensité de contrainte	76
Figure 4.9. La géométrie du matériau	77
Figure 4.10. Le choix de pipeline.....	77
Figure 4.11. Pipeline à une fissure longitudinale	78
Figure 4.12. Les variables géométriques du composant	78
Figure 4.13. Les résultats de la fonction d'intensité de contrainte	79
Figure 4.14. Résultat graphiquement	79
Figure 4.15. La validation des variables de la géométrie.....	80
Figure 4.16. La barre du calcul finale.....	80
Figure 4.17. Résultats finale de l'étude.....	80
Figure 4.18. Les résultats détaillés	81
Figure 4.19. Modèle de Paris [45].....	82
Figure 4.20. Les paramètres du chargement de l'acier API 5L X65	83
Figure 4.21. Les variables géométriques de l'acier API 5L X65	83
Figure 4.22. Caractéristiques de l'acier API 5L X65	84
Figure 4.23. Le choix de la longueur initial et finale de la fissure pour l'acier API 5L X65... ..	84
Figure 4.24. Effet du rapport de charge sur la durée de vie de l'acier pour pipeline en API 5L X65	86
Figure 4.25. Effet du rapport de charge sur la durée de vie de l'acier pour pipeline en API 5L X70	87
Figure 4.26. Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue de l'acier API 5L X65 à R=0.1	88
Figure 4.27. Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue de l'acier API 5L X70 à R=0.1	89

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE -01-

Tableau 1.1. Composition du gaz brut de Hassi R'mel.....	11
--	----

CHAPITRE -02-

Tableau 2.1. Composition chimique de l'acier API5L X 65 (p. massiques en%).....	22
Tableau 2.2. Caractéristiques mécaniques par (N/mm ²) (Tubes de conduite PSL 1).....	23
Tableau 2.3. Caractéristique mécanique de l'acier X65 selon la norme API.....	23
Tableau 2.4. Record photographique du l'incident.....	42

CHAPITRE -03-

Tableau 3.1. Caractéristiques de la rupture ductile et de la rupture fragile.....	53
---	----

CHAPITRE -03-

Tableau 4.1. Caractéristiques mécaniques des aciers API 5L	79
--	----

LISTE DES ABREVIATIONS

HR: Hassi R'mel

MPP: Module Processing Plant

CTH : Centre de Traitement d'Huile

GMAO : Gestion et maintenance assisté par ordinateur

API : American Petroleum Institute

PSL : Pipes Steel Line (tube de conduite en acier)

GPL : Propane et butane liquide

MLR : Mécanique linéaire de la rupture

MNLR : Mécanique non linéaire de la rupture

MEPR : mécanique élasto-plastique de la rupture

PEHD : Polyéthylène haute densité

FIC : Facteur d'intensité de contrainte

SCN: Station compression nord.

PSV : Pressure safety valve. (Soupape de sécurité)

PPL : Collecteur principale

V2002-F : Vessel (Séparateur ou ballon)

151 A/B : Tag number (identification de la ligne)

APB : Acide producing bacteria

BM : métal de base

ZAT : zone affectée thermiquement

T-L: Sens longitudinal. **T-S :** Sens Transversal

PH : potentiel hydrogène

LISTE DES SYMBOLES

Pa, MPa, GPa, Kg/cm² : (Unités de pression)

m : Mètre (Unité de longueur)

N : Newton (Unité de force)

L : Longueur de tube [m]

E: Module de Young [Pa]

P: Pression [Pa]

σ : Contrainte

$\sigma_{\theta\theta}$: Contrainte de référence

σ_y : Limite d'élasticité

μ : Module cisaillement

λ : Coefficient de Lamé

ν : Coefficient de poisson

R : Limite d'élasticité conventionnelle

Re : Limite d'élasticité

Rm : Résistance à la traction

Atm : Atmosphère

(") : Pouce, (1pouce = 2,54 centimètres)

β : L'angle d'introduction de la bande par rapport au l'axe symétrique

B : La largeur de bande

C, m : Coefficient de paris dépend du matériau

Dext : Le diamètre extérieur de tube formé

d : Diamètre interne de tube

e : Epaisseur du tube

F(a) : Fonction d'intensité de contrainte

K : Facteur d'intensité de contrainte

K_{crit} : Facteur d'intensité de contrainte critique

K_{IC} : Ténacité du matériau

K_{max} : Facteur d'intensité de contrainte maximale

K_{min} : Facteur d'intensité de contrainte minimale

R : Rapport de charge

σ_c : Valeur de la contrainte appliquée à la rupture

a : Longueur de la fissure

a₀ : Longueur de la fissure initiale

α : Rapport de contrainte / déformation plane

Δk : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte

Δk₀ : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil à R = 0

Δk_{th} : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil donné

ΔK_{eff} : Amplitude de FIC effective

r : Rayon

K_C : La ténacité du matériau

σ_y : Limite d'écoulement de la tôle

σ_a : L'amplitude de contrainte

σ_m : Contrainte moyenne

σ_{max} (S_{max}) : Contrainte maximale

σ_{min} (S_{min}) : Contrainte minimale

T : La période

f : fréquence

σ_{0,2} : Limite d'élasticité (0,2% de déformation plastique)

σ_R : Résistance à la rupture

ε : Déformation

H₂ : Hydrogène

P : Phosphore

S: Soufre

Cr : Chrome

Ni : NICKEL

Nb : Niobium

V : Vanadium

Mo : Molybdène

Cu : Cuivre

Al : Aluminium

Ti : Titane

B : Bor

C : Carbone

Mn : Magnésiums

Fe : Fer

Si : Silicium

CO : Cobalt

Al : Aluminium

Résumé

Les causes des ruptures des pièces ou des structure en service sont multiples mais d'importance très diverse. Parmi celles-ci, l'endommagement par fatigue qui peut se produire dans toutes pièce soumises à des vibrations périodiques d'effort. Le comportement en fatigue des pipelines dépend de plusieurs paramètres de nature métallurgiques, des propriétés mécaniques et des conditions de service caractérisé par la pression mise en œuvre.

Du point de vue numérique, la propagation de fissure est un problème complexe puisqu'il nécessite de suivre la géométrie de la fissure au cours du temps. De plus, l'augmentation des contraintes de travail, et l'allégement des canalisations qui à partir d'une conception plus efficace et des taux de travail plus élevés produit des amplitudes de contraintes variables plus importantes qui conduisent à s'intéresser sérieusement au phénomène de fatigue. En effet, on considère aujourd'hui que la fatigue est responsable d'au moins 90% de toutes les ruptures en service dues à des causes mécaniques.

Enfin, Le transport du gaz dans des conditions économiques nécessite l'utilisation de pressions élevées, et donc l'utilisation d'aciers à haute limite d'élasticité ainsi la sécurité des installations demande une bonne ténacité pour éviter la ruine des pipelines par propagation rapide de fissures. Les chargements cycliques à amplitudes constantes caractérisés par le rapport de charge et l'amplitude de chargement cyclique ont été mis en évidence sur différents grades d'aciers API 5L à travers l'utilisation de la méthode de **Paris** afin de prédire la durée de vie résiduelle en fatigue.

MOTS CLÉS: l'endommagement par fatigue, mécanique de la rupture, pipeline, acier, propagation de fissure, rapport de charge, amplitude, contrainte, modèle de PARIS.

ملخص

أسباب الكسر و التقطع للأجزاء و الأنابيب كثيرة و متعددة ولكن ذات أهمية متفاوتة، من بينها الضرر بالتعب الذي قد ينتج في جميع الأجزاء التي تخضع لاهتزازات دورية. تحمل الكلال أو التعب الميكانيكي لأنابيب توصيل الغاز و البترول يعتمد أساسا على عدة عوامل منها ذات طابع معدني، خصائص ميكانيكية و ظروف التشغيل التي يؤثر عليها الضغط الموجود في الأنابيب.

من وجهة النظر الرقمية، انتشار التشققات يعتبر مشكلة معقدة لأنه يتطلب متابعة التصدع مع مرور الوقت، وبالإضافة إلى ذلك زيادة ضغوط العمل وتمدد الأنابيب المصممة بتشكيل فعال و أوقات عمل عالية تنتج مدود ذات ضغط متغير مهم، تؤدي بنا إلى الإهتمام الفعلي و الجاد بظاهرة التعب الذي يعتبر في يومنا هذا هو المسؤول الأول بنسبة 90 % على الأقل لجميع الكسور و التقطعات الناتجة عن أسباب ميكانيكية أثناء نشاطها.

في نهاية المطاف، فإن نقل المحروقات في ظروف اقتصادية مثالية يستوجب استخدام ضغوط عالية، و بالتالي استخدام صلب عالي التمدد، و حماية المنشآت يتطلب صلابة جيدة من أجل اجتناب انهيار الأنابيب بانتشار التشعر. الحمولات الدورية بقيم ثابتة و المتعلقة بنسبة الحمولة و قيم الدورة للحمولة قد ضبطت على عدة أصناف من الصلب API5L من خلال استخدام طريقة "Paris" لانتشار التشعر من أجل التنبؤ بمدة الحياة عند التعب و الكلال.

الكلمات المفتاحية : الكلال و التعب، ميكانيك الكسر، خطوط الأنابيب، الصلب، انتشار التشعر، نموذج Paris، نسبة الحمولة، الضغوط.

Abstract

The causes of breakage of parts or structure in use are multiple but very varying importance. Among them, the fatigue damage that may occur in any part subject to periodic vibrations effort. The fatigue behavior of pipelines depends on several parameters of metallurgical nature, mechanical properties and operating conditions characterized by pressure service.

From the numerical point of view, the crack propagation is a complex problem since it requires to follow the geometry of the crack over time. In addition, the increased stresses of work and the relief pipelines from more efficient and higher levels of work product design amplitudes most important variables constraints that lead to serious interest in the phenomenon fatigue. Indeed, today it is considered that fatigue is responsible for at least 90% of all service failures due to mechanical causes.

In the end, the gas transport in economic conditions requires the use of high pressures, and thus the use of steels with high yield. In addition, the safety of installations demands toughness to prevent collapse of the structure by rapid crack propagation. The cyclic loading at constant amplitude characterized by the stress ratio and the amplitude of cyclic loading have been highlighted on various grades of steel API 5L through the use of the method of **Paris** in order to predict the residual life fatigue.

KEY WORDS: fatigue damage, fracture mechanics, pipeline, steel, corrosion, crack growth, method of Paris, stress ratio.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La mécanique de la rupture est une science assez récente qui a eu la majeure partie de ses développements théoriques durant le *XX^{ème}* siècle. En parallèle, le phénomène de fatigue a intéressé la communauté scientifique une centaine d'années plus tôt, dès le début du *XIX^{ème}* siècle. La problématique de ces deux domaines de la mécanique est identique : il s'agit pour le chercheur de prévoir le comportement des structures jusqu'à leur ruine. Les avancées scientifiques dans la prévision du comportement des structures et le besoin de réduire les coûts rendent ces problématiques de plus en plus importantes dans le processus de conception au sein de l'industrie mécanique, par exemple les pipelines. [1]

Dans ce cas, L'augmentation de la demande d'énergies telles que le gaz et le pétrole nécessite de plus en plus la construction de nouvelles lignes de pipelines. En effet, ces derniers, sont devenus, durant les 50 dernières années le moyen d'acheminement le moins coûteux et le plus sûr pour de grandes quantités d'énergies et sur de longues distances (plusieurs centaines voire plusieurs milliers de kilomètres). Quel que soit l'endroit que le pipeline traverse (mer ou terre), ce dernier est toujours exposé aux différents risques d'endommagements par fatigue.

Les structures mécaniques en service sont soumises à des sollicitations cycliques de différentes natures (phénomène de fatigue). L'étude en fatigue sous chargement à amplitude constante représente la première étape de caractérisation du comportement du matériau. Ce type de chargement permet l'étude de l'influence d'un paramètre bien particulier : rapport de charge « R ». En effet, il existe une multiplicité de paramètres influant sur la durée de vie et la vitesse de fissuration. En plus du rapport de charge, on a les conditions d'utilisation, du matériau, de la géométrie (présence d'entailles), de l'environnement, la direction de propagation des fissures, état de surface, les contraintes internes...etc.

L'objectif du présent mémoire intitulé « *Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines* », vise à signifier les différentes causes des défaillances des aciers pour pipeline, ainsi étudier la propagation sous contrainte constant et rapport de charge varié puis l'inverse, et répondre à certaines conditions de fonctionnement affectant la fissuration par fatigue. Pour cela, ce manuscrit est scindé en quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est consacré à une description générale sur le champ -HASSI R'MEL- -S.SONATRACK- où j'ai passé mon stage ainsi le fonctionnement du module 2 de production tel que les procédés de traitement du gaz et description technique du train.
- ❖ Le deuxième chapitre divisé en deux parties : Une première partie a été réservée à la présentation des caractéristiques mécanique et chimique des aciers ainsi les différentes procédures de fabrication des tubes des pipelines. La deuxième partie a été axée sur les défaillances et les anomalies les plus célèbres qui peuvent provoquer des fissures aux pipelines, et se clôturera par un rapport d'incident au champ de Hassi R'mel.
- ❖ Le troisième chapitre est une étude bibliographique et généralités sur les outils fondamentales qui régissent la mécanique de la rupture et les concepts de fissuration par fatigue. Puis une étude du comportement en fatigue des aciers à différents grades pour pipelines montrant l'effet des paramètres liés au chargement, et la durée de vie des aciers avant la rupture.
- ❖ Le dernier chapitre présente la simulation numérique du comportement en fatigue (propagation des fissures par fatigue) par le code **eFatigue** (code basé sur le WEB) où les caractéristiques mécaniques de propagation du matériau sont présentées ainsi la géométrie étudiée et se finit par les différents résultats obtenus et discussions montrant les influences des paramètres de chargement cyclique.

Enfin, on a donné une conclusion générale et des perspectives sur ce travail.

CHAPITRE I

PRESENTATION DU

CHAMP DE HASSI

R'MEL

I.1. Introduction

Le poids des hydrocarbures dans l'économie de notre pays est particulièrement significatif et marqué par la présence d'un potentiel important et varié de ressources énergétiques dont on citera : le gaz et le pétrole.

La compétition mondiale et la protection de l'environnement ont conduit à l'augmentation de la productivité ainsi qu'à l'amélioration de la qualité, cela a nécessité une évolution dans le secteur des équipements de contrôle des procédés au sein de l'industrie et dans les méthodes de maintenance et de la conception de pièces de rechange en cas d'indispensabilité sur le marché.

Vue l'importance et la complexité des installations industrielles d'aujourd'hui, l'exploitation des usines ne peut plus se faire manuellement, d'où la nécessité de l'automatisme.

L'objectif principal de l'automatisation est de contrôler une usine de la manière la plus sûre et la plus efficace possible. Elle protège l'usine contre les dangers d'origine multiple grâce à la sécurité qu'elle offre.

La croissance accrue de la demande mondiale des hydrocarbures incite la SONATRACH à procéder à une nouvelle politique de gestion de transport et de commercialisation des hydrocarbures.

Les études sur l'acheminement du brut et du condensât à travers des pipelines sont nécessaires afin d'assurer une bonne réalisation des débits et des délais de transport.

L'Algérie est l'un des pays principaux producteurs de gaz naturel, possédant environ 10% de réserve mondiale, elle se place en cinquième rang international. Plus de 50% de ces réserves connues sont concentrées dans le gisement de Hassi R'mel. [4]

I.2. Situation Géographique De Hassi R'mel

Hassi R'mel porte du désert, se trouve à 550 Km au sud d'Alger, située entre les deux villes du Sud LAGHOUAT et GHARDAIA. Dans cette région relativement plate du Sahara septentrional l'altitude moyenne est d'environ 750m. (Figure 1.1).

Le paysage, vaste plateau rocailleux est parsemé de « daïas » petites dépressions dans lesquelles s'est accumulé un peu de terre et où pousse une végétation composée essentiellement de buissons mais aussi d'arbres (pistachiers sauvages).

Le climat est caractérisé par une faible pluviométrie (140mm par an) et une humidité moyenne de 19% en été et 34% en hiver, les températures varient entre -5°C en hiver et $+45^{\circ}\text{C}$ en été. Les vents dominants sont de direction Nord-Ouest.

Le gisement gazier du champ de HR est l'un des plus grands gisements de gaz naturel dans le monde. Le réservoir de HR a la forme elliptique orientée Sud-Ouest / Nord Est. Couvrant une surface gazière de 3500 Km² (70 Km du Nord au Sud et 50 Km d'Est en Ouest) entourée d'un anneau d'huile (pétrole brut).

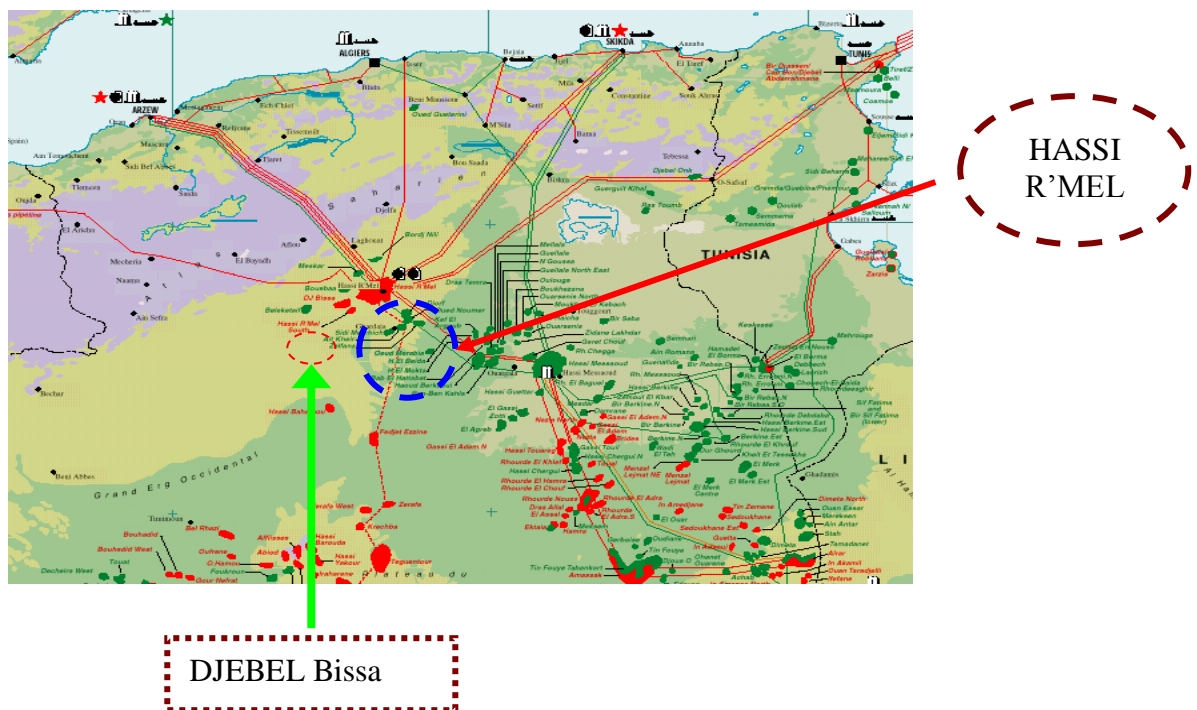


Figure 1.1. Situation géographique de Hassi R'mel [4]

I.3. Historique Du Champ De Hassi R'mel

Le gisement de Hassi R'mel a été découvert en 1951. Le forage du premier puits d'exploitation HR1, a eu lieu en 1952 à quelques kilomètres de la localité de Berriène, ce premier puits a mis en évidence la présence d'un gaz riche en condensât dans le trias gerseaux à une pression de 310 atm et une température de 90 °C, la profondeur atteinte était de 2332 m où se trouve un réservoir de gaz humide évalué à plus de 2800 milliards m³.

Entre 1957 et 1960, sept autres puits ont été forés (HR2, HR3, HR4, HR5, HR6, HR7, HR8).une énorme réserve de gaz estimée à 2415 billions m³. Ce gaz se trouve entre 2110 et 2280 m de profondeur.

Les principaux champs sont : Hassi R'mel, Djebel Bissa, Oued Noumer, Ait Kheir, Sidi Mezghiche et Makouda. Les réserves trouvées en place sont évaluées à plus de 2800.10⁹ m³.

Quatre étapes importantes ont marqué le développement du champ :

➤ Première étape 1961-1969

En1961, réalisation d'une petite unité de traitement de gaz (Module 0) de 1.3 milliards m³ par an, cette réalisation a coïncidé avec la construction de la première usine de liquéfaction du gaz en 1964 à Arzew. En1969, la capacité de production et portée à 4 milliards m³ par an.

➤ Deuxième étape 1969-1971

Après la nationalisation des hydrocarbures en 1971, la capacité de traitement du champ atteinte était de 14 milliards m³/an.

➤ Troisième étape

La capacité de traitement a été portée à 94 milliards m³/ an par :

- La réalisation de 4 complexes de traitement de 20 milliards m³/an chacun.
- La réalisation de deux stations de réinjection de gaz d'une capacité unitaire de 30 milliards m³/ an et d'une puissance unitaire de 44742x10⁴ watt.

➤ Quatrième étape

Après un quart de siècle d'exploitation du gisement de Hassi R'mel, ils ont constaté une diminution de pression venant des puits de gaz pour ce là ils ont mis en place le système d'augmentation de pression qu'on appelle Boosting pour maintenir la pression et l'exploitation des unités en place sans changement du process.

I.4. Présentation Du Champ De Hassi R'mel

Le développement de Hassi R'mel a été lié au développement de l'industrie du gaz dans le monde. Hassi R'mel est divisée en trois secteurs qui sont:

➤ **Secteur nord:**

Constitué de MPP3 et d'une station de compression.

➤ **Secteur centre:**

Constitué de MPP0, MPP1 et MPP4, Le Centre de Stockage et de Transfert des Fluides (condensât et du GPL), d'un Centre de Traitement d'Huile (CTH) et l'unité commune - phase B.

➤ **Secteur sud:**

Constitué de MPP2, la station de compression sud, Djebel Bissa HR sud.

Les quatre unités 1, 2, 3 et 4 de traitement du gaz ont une capacité de $60 \text{ m}^3/\text{jour}$ chacune. Elles ont été construites en 1979/ 1980. Cependant MPP0 a une capacité de 30 millions m^3/jour et Djebel Bissa de 6 millions m^3/jour .

Les deux centres de compression nord et sud, ils sont conçus pour compresser les ventes en excès asphyxiant et l'injection dans le réservoir du gaz dans l'ordre de maximiser la récupération du liquide et maintenir la pression dans les puits.

Un autre poste de compression est appelé Boosting est actuellement en fonctionnement, il est conçu pour augmenter la pression d'entrée du gaz des modules du traitement afin d'assurer l'exploitation continue du champ du gaz. (Figure 1.2)

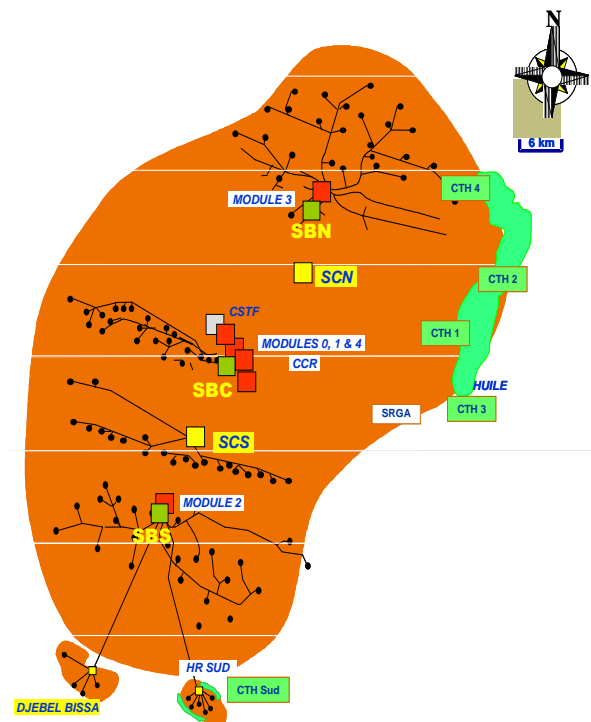


Figure 1.2. Les secteurs et les modules du HASSI R'MEL [4]

I.5. Carte Géométrique De Hassi R'mel Et Les Sites Des Modules

I.5.1. Organisation de la direction régionale de Hassi R'mel (voir figure 1.3)

❖ Direction régionale

La Direction Régionale, structure mise en place en 1990, répond aux objectifs suivants :

- Développement du gisement gazier et l'anneau d'huile de Hassi R'mel.
- Mise en place des nouvelles technologies dans l'engineering des installations.

Les missions des structures composant la direction régionale sont les suivantes :

➤ Division approvisionnement et transport

L'approvisionnement de matériel et pièces de rechange au moyen des divers budgets, appels d'offres et commandes locales.

La réception des équipements et pièces de rechange, la vérification de leur conformité et leur mise en stock.

➤ Direction technique

La gestion et la prise en charge des nouveaux projets industriels.

La réalisation des modifications suggérées par les sites utilisateurs.

➤ Direction engineering et production

Développement du gisement.

Entretien des puits et installations de surface (wire-line et work-over).

➤ Direction exploitation

Exploitation optimale des unités.

Planification et réalisation des programmes de production.

➤ Direction maintenance

Maintien des équipements en état de bon fonctionnement.

Planification des entretiens préventifs.

Mise en place des politiques de maintenance.

Mise en place et développement de l'outil informatique (GMAO)

➤ **Direction logistique**

Suivi et réalisation des infrastructures de base de la région.

Entretien des installations domestiques de la région (électricité, froid, plomberie, menuiserie).

➤ **Division sécurité**

Application des mesures de sécurité (prévention des accidents).

Mise en place de la politique HSE (hygiène, sécurité et environnement) au niveau du site industriel.

➤ **Division informatique**

Développement des logiciels d'exploitation pour l'ensemble des structures de la direction régionale.

Entretien du réseau et de l'outil informatique.

➤ **Division intendance**

Suivi des prestations en matière de restauration et hébergement.

Suivi de la gestion du patrimoine.

➤ **Division finances**

Gestion des budgets des structures, ordonnancement.

Suivi financier des projets d'investissement, d'exploitation et d'équipement.

Gestion de la trésorerie, comptabilité générale.

➤ **Division ressources humaines**

Gestion de carrière du personnel.

Gestion du recrutement et la formation du personnel.

Gestion sociale du personnel en matière de santé, loisirs et administration générale.

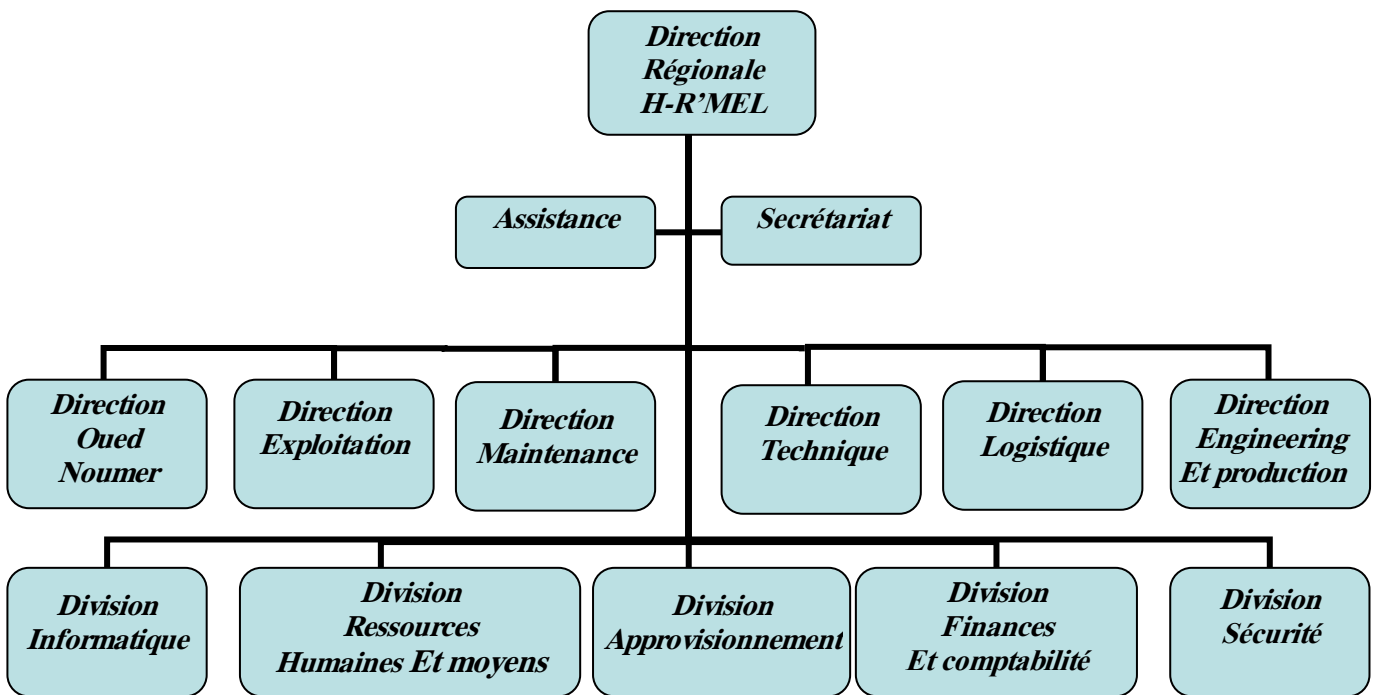


Figure 1.3. Organisation de la Direction régionale de Hassi R'mel

I.6. Organisation Fonctionnelle Du MPP II

Le module est conçu pour traiter 60 millions de m^3 / jour (standard) répartis en trois trains identiques d'une capacité de 20 millions de m^3 /j chacun complètement indépendants les uns des autres. (Figure 1.4).

Le module 2, dit MPP2 (Module Processing Plant), est un ensemble d'installations qui permettent de récupérer les hydrocarbures lourds recueillis à partir des puits et de produire des gaz secs.

Train : est un process de traitement de gaz pour la récupération des hydrocarbures lourds contenus dans le gaz brut et la stabilisation de condensât récupérés.

MPP2 contient aussi les sections suivantes :

- Commun (manifold, dégazage, stockage et transfert)
- Injection glycol
- Régénération glycol
- Utilités (gaz inerte, traitement d'eau, compresseur d'air)

- Boosting.

MPP2 est composé de trois services qui sont :

- ❖ **Service maintenance** : il comprend la section instrumentation, mécanique et électricité.
- ❖ **Service sécurité** : il assure la sécurité du personnel et du matériel du module, aussi il inclut deux sections ; la section prévention et la section intervention, il est équipé de 3 camions, de 6 pompes et d'une réserve d'eau d'une capacité de 13049 m³.
- ❖ **Service exploitation** : inclut l'exploitation du process, il assure le bon fonctionnement du procédé.



Figure 1.4. Vue générale d'un module

I.6.1. Procédés de traitement du gaz

Pour produire du gaz " on speck ", le gaz brut venant des puits subit un traitement en chaîne pour éliminer l'eau, récupérer les fractions d'hydrocarbures lourds (condensât) et le GPL (propane et butane). Un traitement complémentaire est nécessaire dans le cas des gaz acides (décarbonatation et désulfuration).

Le procédé " PRICHARD " [4] et le procédé " HUDSON " [4] sont deux procédés de traitement utilisés à Hassi R'mel.

A. Procédés « HUDSON »

Il est basé sur le refroidissement du gaz par échange thermique et par une série de détentes complétées d'une expansion à travers une machine dynamique appelée « turbo-expander » qui permet d'atteindre une température de -35°C .

Le procédé HUDSON est plus performant, il permet une meilleure récupération des hydrocarbures.

Le turbo-expander ne nécessite aucune maintenance particulière tant qu'il est exploité dans de bonnes conditions. Les coûts de maintenance sont relativement faibles.

B. Procédés « PRICHARD »

Il est basé sur le refroidissement du gaz par échanges thermiques et détentes avec utilisation d'une boucle de propane comme système réfrigérant pour atteindre en fin des températures voisines de -23°C . Cette boucle indépendante et complexe comporte plusieurs équipements. Cela implique des coûts d'exploitation et de maintenance relativement importants.

1.6.2. Composition du gaz brut de Hassi R'mel

Le gaz brut de Hassi R'mel est composé par différents pourcentages des combinaisons illustré sur le tableau suivant :

Tableau 1.1 Composition du gaz brut de Hassi R'mel [4]

C	N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	IC ₄ H ₁₀	NC ₄ H ₁₀	IC ₅ H ₁₂	NC ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄
%	5.56	0.20	78.36	7.42	2.88	0.62	1.10	0.36	0.48	0.59

C ₇ H ₁₆	C ₈ H ₁₈	C ₉ H ₂₀	C ₁₀ H ₂₂	C ₁₁ H ₂₄	C ₁₂ H ₂₆	TOTAL
0.56	0.45	0.37	0.27	0.24	0.57	100

Teneur en H₂O : Saturé à 310 Kg/cm².

Température : Mini 45°C Maxi 65°C.

Le C₁ et C₂ représente le Gaz Sec.

Le C₃ et C₄ représentent le GPL.

Le C₅⁺ représente le Condensât.

1.6.3. Description du processus

A. Symbolisation

Les symboles de différentes installations qui se trouvent dans le module 2 est comme suit :

2 0	→	Commun	D	→	Ballon
2 1	→	Train A	P	→	Pompes
2 2	→	Train B	K	→	Compresseur
2 3	→	Train C	C	→	Colonne
2 4	→	Injection de Glycol	H	→	Four
2 5	}	Récupération du Glycol	PM	→	Moteur pompe
2 6			KM	→	Moteur compresseur
2 7	→	Utilités	KT	→	Turbine
			T	→	Stockage
			E	→	Echangeur

↑
MODULE 2

B. Description du fonctionnement d'un train (Figure 1.6)

Le gaz brut qui alimente MPP2 doit être séparé d'eau et de la fraction lourde d'hydrocarbure qui l'accompagne, cette dernière sera séparé en condensât et en GPL. Pour cela ce process comporte deux opérations aux niveaux de train (Figure 1.5) :

- Séparation gaz/liquide à haute et moyenne pression.
- Séparation par fractionnement des liquides.



Figure 1.5. Vue partielle d'un train de traitement de gaz

✓ **Boosting**

Le boosting est une nouvelle installation, mis en marche en 2005, placé à l'entrée des trains. Son rôle principal est d'augmenter la pression du gaz provenant des puits.

Le gaz arrive des puits à une pression de 93 bars, il est recueilli dans les ballons de séparation (D901A/B/C), les liquides et le gaz sont séparés. Les liquides se dirigent directement vers les trains, le gaz circule vers les ballons d'aspiration des compresseurs du boosting (D902A/B/C), puis le gaz comprimé par le compresseur (K- 901A/B/C). Le gaz obtenu est diffusé vers les trois trains A, B et C. [6]

Le gaz arrive dans le ballon de distribution (D001) après son passage au boosting, ce ballon appelé diffuseur permet de repartir le gaz à travers les trois trais A, B et C (Figure 1.5). Le gaz qui rentre dans chaque train à une pression de 120 bars et à une température de 60°C, est refroidi jusqu'à 40°C à l'aide d'un aéroréfrigérant (E101), puis se dirige vers un séparateur d'admission (D101), dans lequel l'eau et la fraction d'hydrocarbures lourds se séparent du gaz.

Le gaz qui sort du séparateur (D101) est refroidi une deuxième fois dans les échangeurs gaz/gaz (E102 et E103), coté tube.

Une solution de glycol à 80% est injectée dans ce gaz à l'entrée de ces échangeurs, pour éviter la formation des hydrates qui risquent de boucher les tubes.

Le gaz sortant de ces échangeurs est collecté dans une seule conduite à une température de (-7) °C et à une pression de 110 bars, puis il subit une première détente isenthalpique jusqu'à

une pression de 100 bars et une température de (-15) °C, ensuite il est séparé de la fraction lourde et du glycol dans le séparateur (D102A-B).

Le gaz sortant de ce séparateur est détendu une deuxième fois, d'une manière isentropique, par le turbo-expander (K101) pour abaisser de nouveau sa pression à 64 bars et sa température à (-37) °C.

Les hydrocarbures lourds sont condensés suite à cette détente, se séparent du gaz dans le séparateur final à haute pression (D103).

Le gaz sec sortant de ce dernier, passe à travers les échangeurs de chaleur (E102), coté calandre, puis comprimé dans le compresseur(K101) à une pression de 71 bars et une température de 45°C et finalement envoyé comme gaz de vente ou de réinjection.

L'eau récupérée dans le (D101) est envoyée vers le bassin d'évaporation.

La fraction lourde récupérée dans le (D101) est envoyée vers le ballon séparateur à condensât riche (D105). Celles qui sont récupérées dans les ballons (D102) et (D103) sont envoyées vers le ballon (D104).

Le glycol injecté dans les échangeurs (E102) et (E103) est récupéré dans le ballon (D102), ensuite il est envoyé vers l'unité de régénération de glycol.

Le gaz qui sort du ballon (D104) et du ballon de reflux (D107) refroidi le gaz brut dans l'échangeur de chaleur (E103), coté calandre.

Le liquide sortant du ballon (D104) passe à travers l'échangeur (E106) pour alimenter la partie supérieure du Dé-Ethaniseur (C101) au 3^{ème} plateau (alimentation froide).

Le gaz sortant du ballon (D105) rencontre celui qui s'est chauffé dans l'échangeur (E103), coté calandre, ils se dirigent vers le ballon (D108) (MP) du compresseur (K002) pour qu'ils soient comprimés jusqu'à une pression de 71 bars.

Le liquide du ballon (D105) alimente le Dé-Ethaniseur après qu'il soit chauffé dans l'échangeur (E104) par le condensât qui sort du fond du Dé-Buthaniseur C102 (alimentation chaude). A ce stade la récupération du gaz est terminée, chaque train produit 20 millions m³ du gaz sec, y compris celui de (K002). [6]

➤ **Section de séparation à haute pression**

Cette section a pour fonction de refroidir le gaz brut à l'aide de l'aéroréfrigérant (E101), des échangeurs gaz/gaz (E102 et E103) et du turbo- expander (K101) afin de condenser et de séparer les constituants lourds du gaz, ce qui permet d'améliorer les propriétés.

Le gaz traité circule vers la section de transfert, après que sa pression ait été augmentée au moyen du compresseur (K101) du turbo- expander.

D'autre part, les hydrocarbures liquides sont envoyés vers la section de fractionnement pour être séparés en condensât et en GPL. (Figure 1.6)

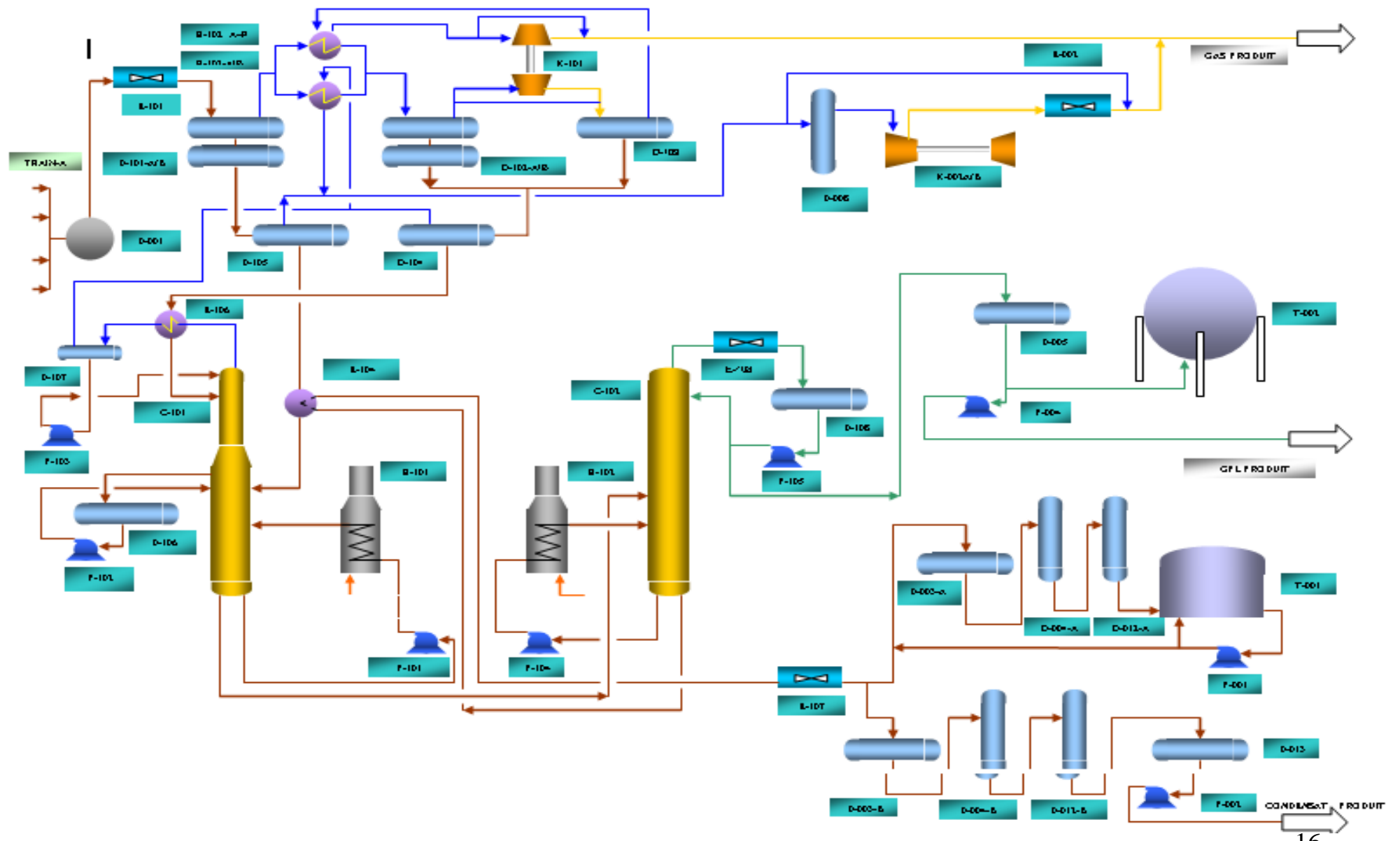


Figure 1.6. Description technique du train [4]

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre on a parlé sur les différents directions et départements qui construisent le champ de HASSI R'MEL et on a cité les principales sections de l'organisation fonctionnelle du module 2.

L'objectif de ce stage pratique est en premier lieu de faire le lien entre les connaissances acquises à l'université et leurs applications dans le milieu industriel, en second lieu c'est une grande aide pour le stage de mise en situation professionnelle et mon thème de fin d'étude.

Dans le prochain chapitre on va présenter les différentes techniques de fabrication des tubes et quelques caractéristiques concernées des aciers pour pipelines ainsi que les anomalies les plus célèbres qui provoquent des amorçages, des ruines et des fissures pour les tubes.

CHAPITRE II

GENERALITES SUR
LES ACIERS

&

ANOMALIES DES
PIPELINES

On a partagé ce chapitre en deux parties :

Dans la première partie on a présenté des généralités sur les pipelines, les caractéristiques mécaniques et chimiques des aciers ainsi que les différents procédés de fabrication des tubes pour canalisation.

Dans la deuxième partie on a proposé une étude sur les causes les plus célèbres de défaillance des pipelines, ainsi que les différents types d'endommagement tel que (érosion, corrosion, fragilisation...).

II.1. Généralités Sur Les Pipelines Et Les Aciers

II.1.1. Introduction

Le transport des hydrocarbures par pipeline reste le moyen le plus sécurisant pour, acheminer de grandes quantités de pétroles et de gaz, sur de longues distances.

Ces conduites de transport, constituent des constructions coûteuses, dues à la quantité et à la qualité de l'acier des tubes. Généralement enterrés, quelquefois, inaccessibles à l'examen, assurant leur fonction de production et de transport, se faisant même parfois oublier, les gazoducs et oléoducs baignent dans un milieu particulièrement agressif, du fait de son hétérogénéité et du grand nombre d'impuretés qu'il contient.

L'économie mondiale des coûts supplémentaires importants, de plus peut avoir des conséquences désastreuses surtout lorsqu'il entraîne l'arrêt de l'exploitation d'ouvrages de transport.

II.1.2. Définition

Une **canalisation**, ou un **pipeline** (de l'anglais) est une conduite destinée à l'acheminement de matières gazeuses, liquides, solides ou polyphasiques, d'un endroit à un autre. Le diamètre nominal d'une canalisation peut aller de trente millimètres environ (un pouce un quart) pour des fluides spéciaux jusqu'à plus de trois mètres vingt (soixante-huit pouces) pour les adductions d'eau. [3]

On désigne par « pipelines » (figure 2.1), les oléoducs ou gazoducs qui sont des canalisations de diamètres pouvant aller de 1 à 42 pouce (1pouce = 2,54 centimètres), Celles-ci sont le plus souvent en acier, constituées d'éléments linéaires soudés bout en bout et revêtus, et dans

lesquelles transitent, sous des pressions relativement élevées, des produits pétroliers, liquides ou gazeux. Ces produits pétroliers sont propulsés par des installations de pompages ou de compression. Elle sert à transporter un produit entre deux points donnés et elle est construite avec des matériaux et des techniques qui apportent la solution la plus économique au problème posé.

Lorsqu'une canalisation a un très petit diamètre (moins de trente millimètres environ), on parle plutôt de tuyauterie.



Figure 2.1. Pipeline dans l'environnement [46]

Pour la fabrication des tubes, un grand nombre de matériaux peut être utilisé : acier, fonte, plastique, résines armées, etc. . . . Le choix du matériau est fonction de la nature et de l'état des produits qu'elle doit acheminer.

Dans ce cas, on considère l'application de l'acier dans la fabrication, des tubes, pièces et matériaux qui satisfont aux exigences les plus sévères de l'industrie gazière explicites et implicites.

Le type et le nom d'une canalisation dépendent des caractéristiques physiques et des conditions d'acheminement du produit à déplacer.

- Pour le gaz naturel, on parle de gazoduc.
- Pour le pétrole, on parle d'oléoduc.

- Pour l'eau industrielle, il s'agit de conduite ou d'émissaire. Le terme d'aqueduc est plutôt réservé aux ouvrages maçonnés, avec écoulement libre de l'eau.
- Pour l'eau salée, on utilise le terme de samuduc.
- Pour l'oxygène on utilise le terme d'oxygénéduct ou d'oxyduc.
- Pour l'hydrogène on utilise le terme d'hydrogénoduc.

De manière générale, le suffixe d'origine latine "ductus", dérivé de "ducere" qui veut dire "conduire", permet ainsi de construire le nom français d'une canalisation spécialisée pour l'acheminement d'un type de produit particulier.

Les gazoducs de distribution de gaz moyenne pression sont généralement en polyéthylène haute densité (PEHD) et les canalisations d'eau, jadis maçonnées ou en fonte (métallurgie) grise à graphite lamellaire, sont aujourd'hui en fonte (métallurgie) grise à graphite sphéroïdal (également appelée fonte ductile), en polychlorure de vinyle, en polyéthylène haute densité (PEHD), mais également en béton armé ou en acier ;

II.1.3. Caractéristiques des tubes

La plupart des pipelines sont faits d'acier, bien que le plastique et l'aluminium soient parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel. Les pipelines d'acier est fabriqué en soudant de courtes sections de tuyaux (20 m) les uns aux autres. Après la radioscopie de l'assemblage, le tuyau est ensuite enveloppé d'une couche protectrice avant d'être enterré. Tous les pipelines, sans exception, font l'objet d'une inspection en plus d'être soumis à une épreuve de pression avant leur utilisation.

Ces caractéristiques principales (diamètres, épaisseur, type d'acier, spécifications de construction, température et pression d'exploitation...) sont régies par tout un ensemble de règles et font l'objet de multiples calculs et de compromis économiques. (Figure 2.2)

Le diamètre d'une canalisation est déterminé en fonction du débit des produits à acheminer, de leur viscosité et de leur densité, de façon à réaliser un compromis économique entre la puissance des stations de pompage ou de compression à installer et l'importance de l'investissement total à réaliser. [2]

Lorsque les considérations technico-économiques ont ainsi permis de fixer le diamètre, et d'ailleurs également la pression de service, on calcule l'épaisseur en fonction de cette pression

de service ou des conditions de pose lesquelles parfois imposent des caractéristiques dimensionnelles plus sévères.

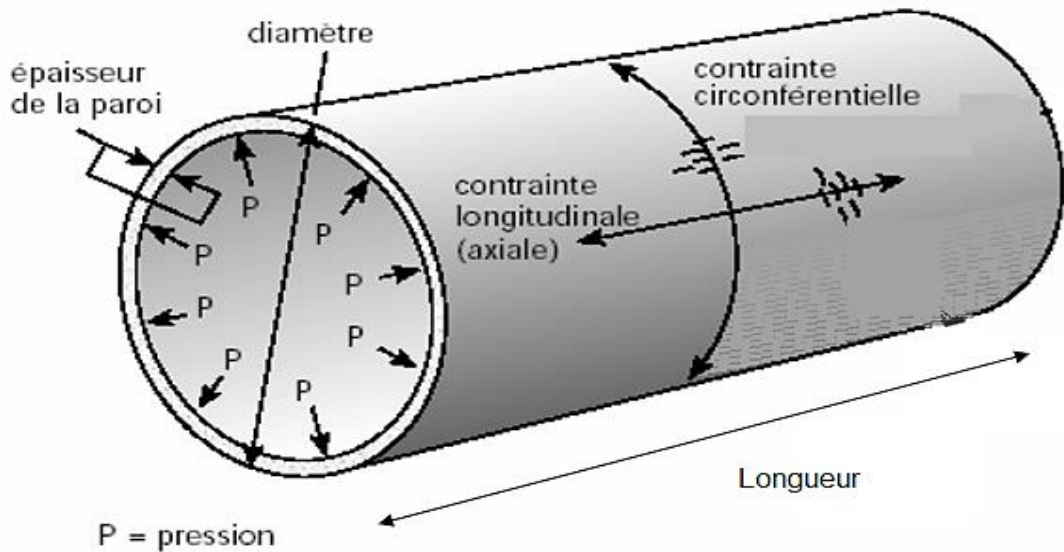


Figure 2.2. Caractéristiques des tubes

Les autorités administratives des différents pays responsables de la sécurité des populations dont le territoire est traversé par les pipelines, ne restent pas indifférentes à ces calculs qui déterminent le niveau de sûreté de l'installation.

Dans la plupart des pays où l'on pose des pipelines, des règlements fixent les lois générales que doivent suivre les constructeurs et les installateurs. Ces réglementations reposent sur les notions de pression maximum de service, de coefficient de sécurité et d'autres conditions de construction comme le mode d'inspection des tubes, les modalités des essais sous pression devant être menés à bien avant la mise en service de toute canalisation, les dispositions spéciales de protection à prendre contre les fuites dans les zones où celles-ci auraient des conséquences particulièrement dangereuses).

II.1.4. Les aciers

Le développement des transports à grande distance de quantités importantes d'hydrocarbures a nécessité l'emploi des tubes de grand diamètre, exploités à des pressions plus élevées. Pour éviter d'atteindre des épaisseurs difficiles à souder et faire des économies d'acier, des nouvelles nuances à caractéristiques mécaniques sont améliorées. C'est ainsi qu'on a vu apparaître les grades X60, X65, X70, X80 et même X100.

L'acier liquide est naturellement effervescent (présence de gaz sous forme d'oxydes). Lors de la coulée, l'oxygène s'allie avec le carbone du métal pour former du CO qui cherche à s'échapper pendant la solidification. Si la tête du lingot se refroidit trop vite, il se produit, à la partie supérieure, une zone riche en porosités.

Pour éviter ces problèmes, la plupart des aciers sont coulés calmés. On ajoute à la charge des désoxydants dont l'action est plus forte que le carbone (ferro-manganèse, ferro-silicium, etc...) et l'aluminium en poche. Ces corps donnent un composé liquide qui passe dans le laitier qui surnage. L'acier, en fait, est un corps métallique très complexe incorporant en solution divers éléments volontaires (C, Mn, Si,...) ou ajoutés (Cr, Ni, Nb, V, Mo, Cu, Al, Ti, B...) et des impuretés de l'élaboration (P, S, H₂, N₂...).

Les aciers des tubes peuvent être divisés en deux groupes : aciers au carbone faiblement alliés et aciers à faible teneur en carbone. Dans le premier groupe on trouve les aciers X42 à X52 (selon API) renfermant jusqu'à **0,3 % C, 1,6 % Mn, 0,7 % Si**. Dans le deuxième groupe on trouve les aciers faiblement alliés à basse teneur en carbone X56, X50, X65, X70 renfermant **0,12 % C, 0,45 % Si, 0,25 % S, 1,9 % Mn, 0,1 % V, 0,1% Nb, 0,015 % Al**. Pour les conduites de diamètre supérieur à 1020 mm, destinée à fonctionner sous des pressions élevées, on utilise généralement des tubes en acier de laminage contrôlé (Figure 2.3).

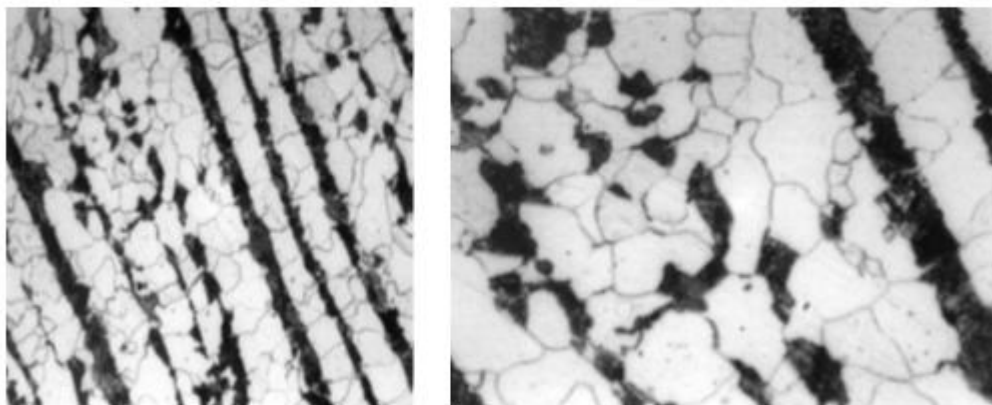


Figure 2.3. Microstructure de l'acier API 5L X65, analyse longitudinale avec un grossissement de X570 et de X1150. [20]

Nous observons des bandes de perlite colorées en noir alternées avec des bandes de ferrite en blanc, signe d'un laminage. On peut également dire que la ferrite est majoritaire dans cette structure. Une analyse chimique sur l'étude de l'amorçage de la fissuration des pipelines en milieu bicarboné à PH neutre donne les résultats suivants (Table 2.1).

Tableau 2.1. Composition chimique de l'acier API5L X 65 (p. massiques en%). [20]

C	M n	Si	Cr	Ni	Mo	S	Cu	Ti	N b	Al	Fe
0.10	1.82	0.37	0.16	0.14	0.06	0.13	0.19	0.04	<0.05	0.014	NM

Certains de ces éléments peuvent se regrouper sous la forme d'inclusions non métalliques dont les principales sont des solutions solides de sulfures, d'oxydes, de nitrures... Ces inclusions limitent la cohésion de corps métalliques et sont à l'origine de défauts internes et superficiels. [9]

II.1.5. Propriétés et caractéristiques mécaniques des aciers

L'acier est un alliage essentiellement composé de fer, sa densité varie donc autour de celle du fer (7,32 à 7,86), suivant sa composition chimique et ses traitements thermiques. La densité d'un acier inox austénitique est typiquement un peu supérieure à 8, en raison de la structure cristalline. Ils ont un module de Young d'environ 210 000 MPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermo-mécanique et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis.

Le traitement thermo-mécanique est l'association :

- d'un traitement thermique, sous la forme d'un cycle chauffage-refroidissement (trempe, revenu...);
- d'un traitement mécanique, une déformation provoquant de l'écrouissage (laminage, forgeage, tréfilage...).

Les aciers de transport des hydrocarbures sont des aciers faiblement alliés qui doivent présenter des propriétés à l'amorçage de rupture d'une part et vis-à-vis de la propagation de l'arrêt des fissures lors de rupture fragile par clivage. D'autre part, Ils présentent également une limite d'élasticité élevée due à la recherche d'une rentabilité accrue et une bonne soudabilité. Par conséquent concilier une haute limite d'élasticité et une bonne ténacité est exigé pour la fiabilité des aciers. [2]

Les essais mécaniques sur les aciers sont réalisés dans les deux sens : longitudinale et transversale (Figure 2.4)

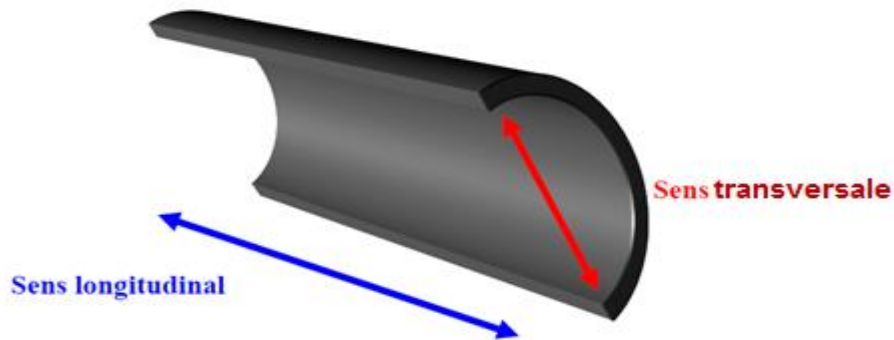


Figure 2.4. Sens longitudinale et transversale de tube

Le tableau suivant (Tab.2.2) signifie les caractéristiques mécaniques de l'acier type API 5L, Tubes de conduite PSL 1 et PSL 2 qui utilisé beaucoup dans l'industrie de tube de pipeline, on remarque les valeurs de la résistance rupture et la limite élastique d'acier, cela est dû à les résultats des essais expérimental. Les caractéristiques mécaniques obtenues sont les suivantes :

Tableau 2.2. Caractéristique mécanique par (N/mm²) (Tubes de conduite PSL 1) [11]

API 5L - PSL1	A	B	X42	X52	X56	X60	X70
Résistance rupture N/mm ²	340	420	420	470	520	517	672

Tableau 2.3. Caractéristique mécanique de l'acier X65 selon la norme API [11]

Module d'Young E (MPa)	Limite d'élasticité Re (MPa)	Résistance ultime Rm (MPa)
200 000	448	600
Distribution	Normal	Normal

II.1.6. Contexte industriel

II.1.6.1. Procédé de fabrication des tubes de pipelines

La multiplicité des diamètres et des épaisseurs de tubes et le développement avec le temps de leurs techniques de fabrication, constituent les raisons de la diversité du réseau de transport gazier algérien. On retrouve :

- ✓ Les tubes soudés sous la forme en spirale
- ✓ Les tubes soudés sous forme longitudinale
- ✓ Les tubes formés sans soudure [7]

A. Les tubes soudés sous forme spirale

Les procédures de fabrication des tubes soudés en spirale sont faites par cintrage de bande de feuilles d'acier de la forme d'un tuyau et la soudure ensemble, cette technique de production passe par des étapes, comme l'indique la figure (2.5). Le soudage se produit ici sur la production de tubes en spirale qui sont généralement fournis.

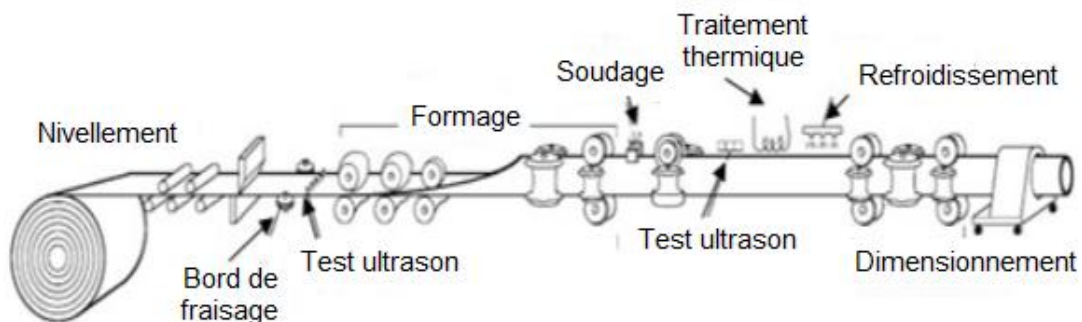


Figure 2.5. Technique de fabrication des tubes soudés en spirale [9]

Le formage du tube en spirale se fait avec inclinaison de l'angle d'introduction de la bande qui se calcule par la relation suivante (Fig.2.6):

$$\beta = \text{Arcsin}\left(\frac{B}{D_{\text{ext}} * \pi}\right) \quad (2.1)$$

Avec : B : la largeur de bande

Dext : le diamètre extérieur de tube formé

β : L'angle d'introduction de la bande par rapport au l'axe symétrique (Δ)

Pratiquement, c'est très difficile de fabriquer les tubes avec un petit angle aigu, pour cela, que les valeurs de l'angle se limitent entre 15° et 50°.

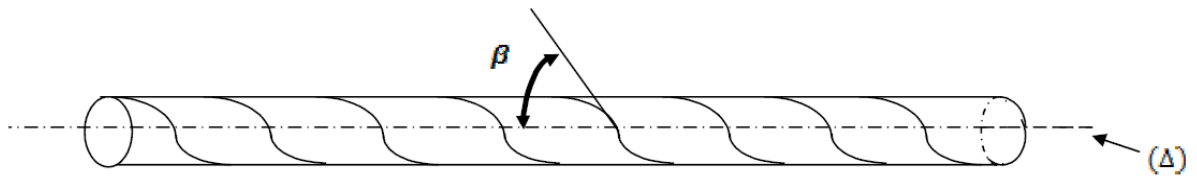


Figure 2.6. L'angle d'introduction de la bande [9]

B. Les tubes soudés sous forme longitudinale

La technique de fabrication des tubes soudés sous forme longitudinale est généralement formé à froid de la plaque à travers le processus "UOE", elle est spécifique aux tubes avec des diamètres plus que 406.4 mm. Cette technique passe par trois étapes de formage :

B. 1. Croquage et formage

Cette étape où la plaque va être pliée aux niveaux de l'extrémité, l'objectif de cette opération est de faciliter le processus de pliage par les étapes suivante, à partir de ça la tôle ou la plaque unitaire est pliée en deux types de presse la première confère la plaque sous forme "U" et la seconde lui donne une forme "O" (voir les figures 2. (7, 8 et 9)).

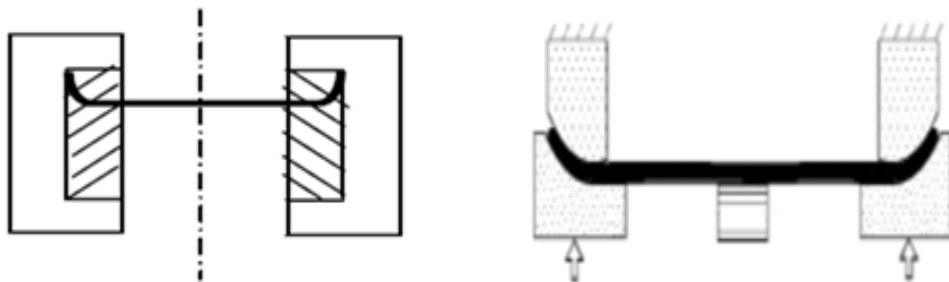


Figure 2.7. Croquage [5]

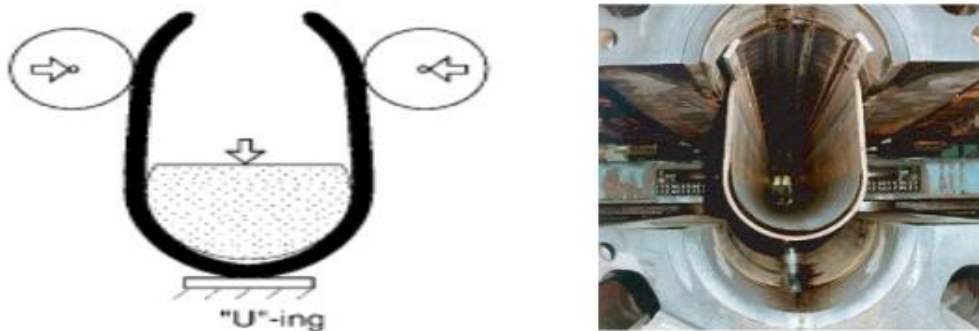


Figure 2.8. Formage sous forme "U" [5]

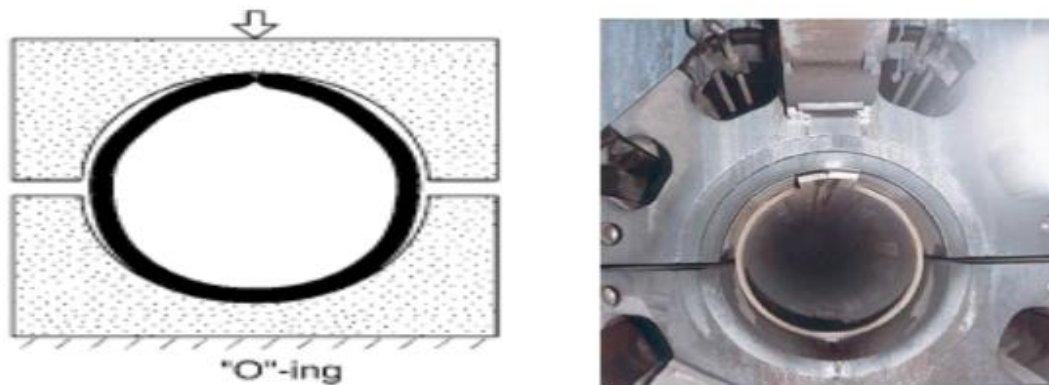


Figure 2.9. Formage sous forme "O" [5]

B. 2. Soudage

Le soudage dépend ici de la technique de soudage à l'arc sous flux à l'aide de tête soudeuse automatique, les soudures intérieures et extérieures grandissent longitudinalement sur une trajectoire d'une ligne droite, généralement le cordon intérieur est réalisé le premier, Figure 2.10.



Figure 2.10. Soudage manuelle et automatique des tubes [7]

Il existe trois grandes familles de tubes soudés :

- 1 - les petits tubes soudés dont le diamètre ne dépasse pas 219 mm.
- 2 - les moyens tubes soudés dont le diamètre est compris entre 219 et 406mm.
- 3 - Les gros tubes soudés dont le diamètre est supérieur à 406 mm

B. 3. Expansion et calibrage

L'objectif de cette opération est d'atteindre des tubes de section parfaitement circulaire, l'augmentation des diamètres ici est de plus jusque' à 1.5 m au maximum (figure 2.11).

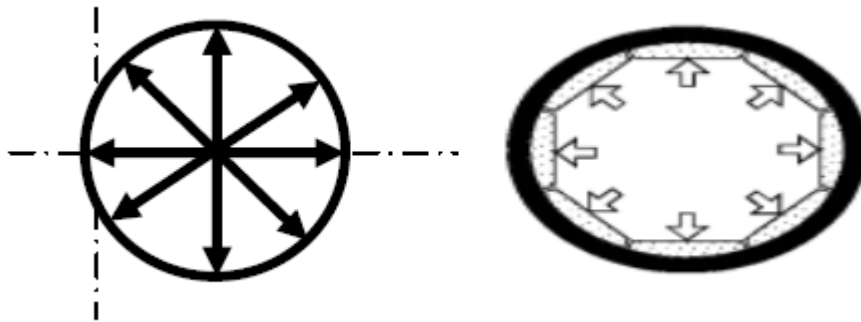


Figure 2.11. Expansion [9]

C. Les tubes sans soudure

Les tubes formés sans soudure, sont généralement de petits diamètres et de longueur moins de 450 mm, les méthodes principales de fabrication de ce type de tube comportent, le métal est contenu entre la filière et l'aiguille. On obtient un tube monobloc sans soudure. Il existe une variante dite filage sur nez d'aiguille où l'aiguille est fixe (Figure 2.12).

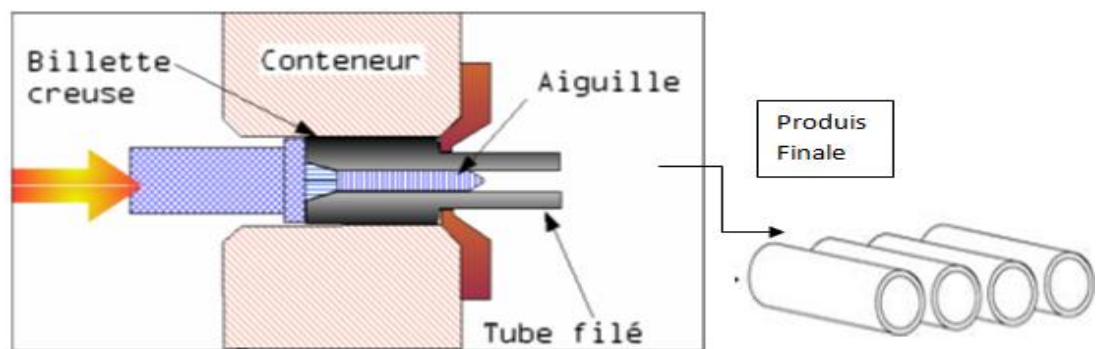


Figure 2.12. Fabrication de pipe sans soudure « Schéma du filage sur aiguille permettant d'obtenir un tube sans soudure » [7]

II.2. Principales Causes De Défaillance Des Pipelines

II.2.1. Introduction

Dans l'industrie pétrolière, l'endommagement des pipelines et des réservoirs est bien constaté. Il est dû aux conditions de service et aux paramètres d'environnement. Les structures conçues pour les produits pétroliers, sont affectées par plusieurs types d'endommagement érosion, corrosion, fragilisation...Il est de type : fissure, entaille, trou, défaut de géométrie complexe, ...etc.

Tous les aciers pour pipeline peuvent connaître des défaillances à cause des forces externes ou internes, comme les contraintes mécaniques et thermiques, ou à cause de phénomènes connexes comme le fluage, la fatigue et l'érosion.

Les tubes sont aussi susceptibles d'être attaqués par un phénomène de corrosion interne et externe, de fissuration ou bien de faille de fabrication. La corrosion interne et externe est la cause principale de fuites et de ruptures des canalisations, se traduisant parfois par des dégâts catastrophiques (dégâts humains, pollution du milieu naturel, frais supplémentaires de réparation, arrêt prolongé du pompage, etc.). Si un pipeline porteur d'eau est affecté d'un éclatement de fuite, au moins cela ne nuit pas à l'environnement. Cependant, si c'est la fuite de pipeline est de pétrole ou gaz, cela peut être un désastre environnemental.

II.2.2. Défaillances Des Tubes

Parmi les paramètres influant le comportement en fatigue des pipelines et des structures, on trouve trois grandes catégories représenté dans l'organigramme suivant (figure 2.13).

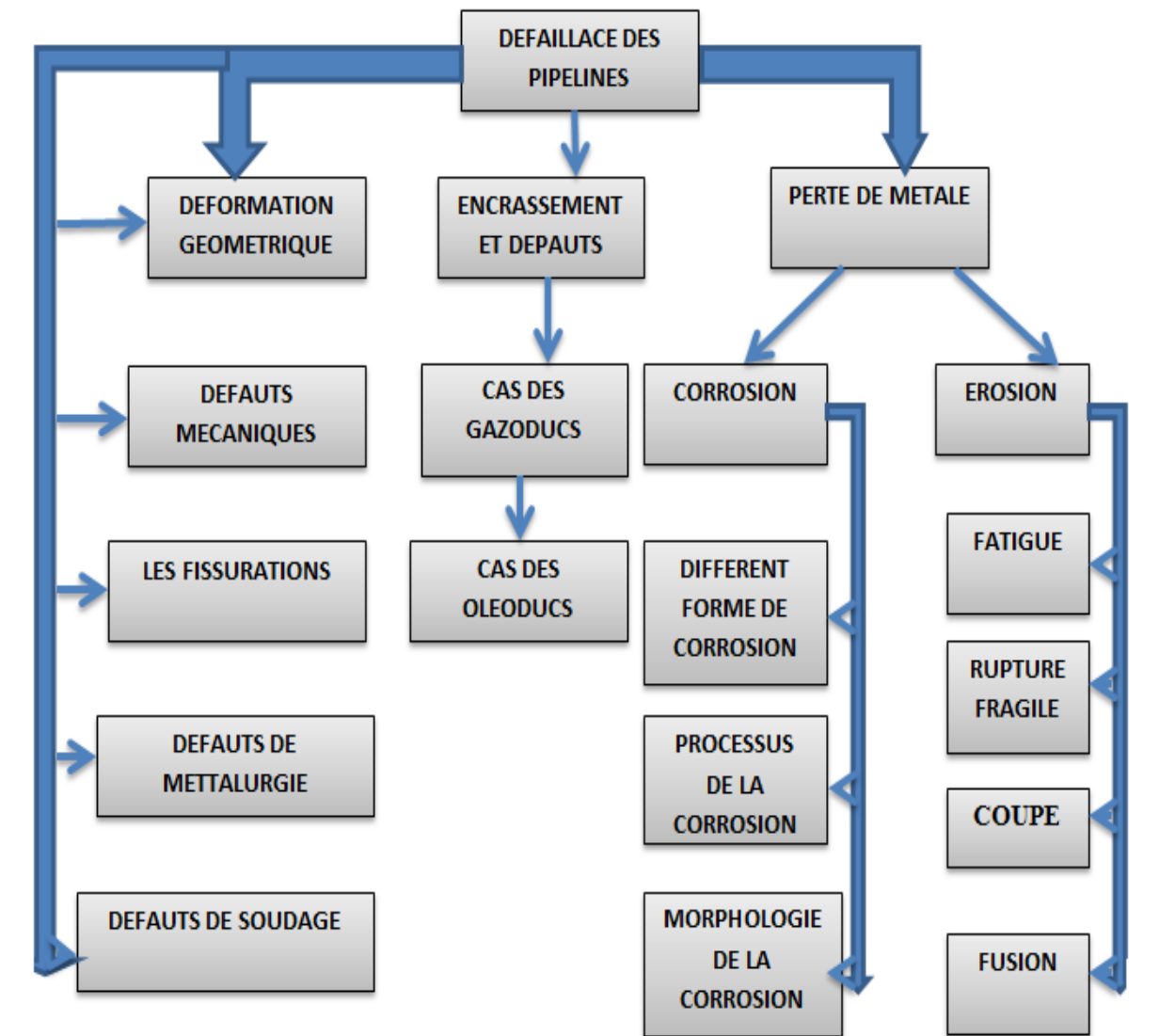


Figure 2.13. Organigramme présente les grandes catégories d'endommagement

Les causes des défaillances des tubes ou tuyaux sous pression sont de diverses natures, elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite « fissure ». La plupart de ces défaillances sont causées par des piqûres de corrosion ou par des fissurations de corrosion sous contrainte, mais il existe également des problèmes liés aux défauts de soudage. Les mouvements de terrain (glissements du sol, tremblement de terre,...) peuvent aussi être la cause de dommage sur tubes enterrés (figure 2.14). Les exploitants des tubes étudient ces problèmes depuis longtemps et possèdent une bonne connaissance des méthodes permettant de les gérer.

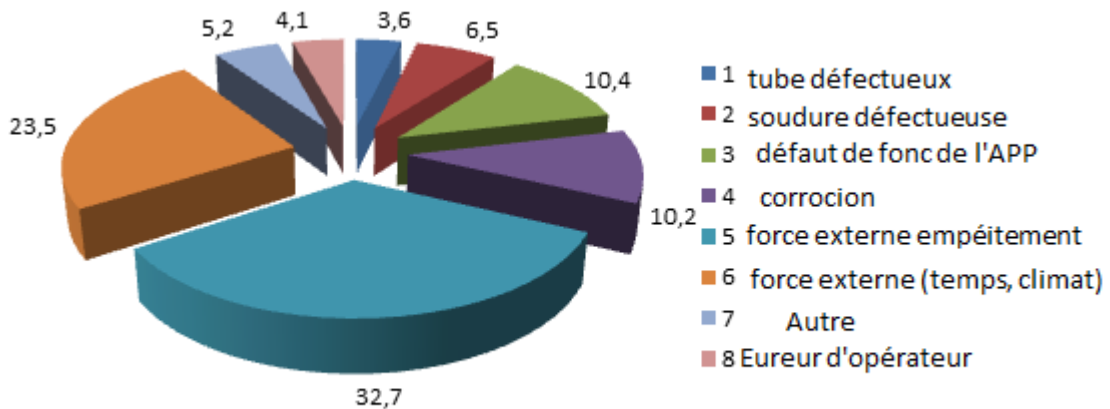


Figure 2.14. Causes des ruptures de pipelines en cours d'exploitation [10]

Les causes externes, correspondant à l'impact d'autres activités, constituent l'origine prédominante des accidents.

Le scénario est à chaque fois sensiblement le même : des travaux totalement indépendants de la canalisation, le plus souvent enterrée (2 cas sur 3) sont engagés et les engins (de terrassement, agricoles ou autres) endommagent et souvent perforent la canalisation.

Cette situation se rencontre dans près d'un accident sur deux. Il a été observé plusieurs cas où la canalisation, initialement enterrée à une profondeur significative (0,8 m à 1,0 m) lors de sa pose, se retrouve au fil des ans, du fait de l'érosion des terrains par exemple, à des profondeurs bien inférieures (jusqu'à 0,30 m), hauteur insuffisante pour éviter les impacts de socs de charrue par exemple.

Des insuffisances d'organisation dans la préparation du chantier sont fréquemment mises en évidence ou supposées : absence de demande d'intervention, méconnaissance des servitudes inhérentes au passage de la canalisation, difficulté de communication ou absence de coordination entre les différents acteurs.

L'autre cause notable d'accidents est liée à l'état des canalisations. Il s'agit alors de défaillances dues au matériel (pour les cas connus, tenue de piquage, conception des soudures, corrosion, fissuration sous contrainte notamment dans le cas de sollicitation cyclique). Cette situation est observée dans plus d'un cas sur trois.

Les canalisations cheminent souvent sur des zones très étendues et sont d'autant plus exposées aux divers types d'agressions naturelles telles que les glissements de terrains, le gel et même les impacts de foudre qui frappent les canalisations même enterrées.

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

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

II.2.2.1. Les Fissures et ruptures des tubes cylindriques sous pression

La fissuration n'est pas une maladie, mais le symptôme d'une maladie. En effet, la faible capacité de déformation et la faible résistance en traction, compression ou en pression., rendent les matériaux très sensibles à la fissuration.

L'utilisation de nouveaux matériaux ductiles (acier et autres alliages métalliques) pour des chargements en traction conduisit cependant à quelques problèmes ; des ruptures se produisaient parfois pour des niveaux de charges bien inférieurs à la limite d'élasticité ; dans un premier temps des praticiens essayé d'éviter ces risques de ruptures en sur dimensionnant les structures, mais la nécessité d'alléger de plus en plus les structures et de réduire les coûts conduit au développement des recherches sur la mécanique de la rupture.

II.2.2.2. Définition d'une fissure

Une fissure est définie comme la surface séparant localement un solide en deux parties. Le champ des déplacements est alors discontinu à travers cette surface L'objet de mécanique de la rupture est l'étude des évolutions de cette surface (propagation de la fissure) en fonction des chargements appliqués et des caractéristiques du matériau constituant. [16].

La présence d'une fissure dans une structure présente une flexibilité locale qui affecte la réponse dynamique, d'ailleurs, une fissure de fatigue est une fissure qui s'ouvre et se ferme dans le temps selon les conditions de charge et l'amplitude de la vibration. [17].

II.2.2.3. Différents types de fissures

Il y a différentes échelles de taille de fissure au-dessous desquelles le taux de croissance peut dépendre de sa taille. Suresh et Ritchie (1984 ; 1991) [36] proposent les définitions suivantes pour les fissures courtes

A) Fissures micro structurellement courtes

La taille de fissure est comparable à la taille caractéristique de la microstructure, comme la taille de grain pour les matériaux monolithiques;

B) Fissures mécaniquement courtes

La taille de la zone plastique est comparable avec la taille de fissure.

C) Fissures physiquement courtes

La taille de fissure est supérieure à la taille des grains et à la taille de zone plastique mais ne dépasse pas un millimètre.

D) Fissures chimiquement courtes

Le comportement de la fissure peut être défini par une analyse basée sur la MLR mais elle présente certaines anomalies liées à la dépendance des effets de fatigue / corrosion à la taille de la fissure.

II.2.3. Phénomène De La Corrosion

II.2.3.1. Définition

Corrosion métallique représente tout processus de dégradation des métaux et alliages faisant intervenir, au moins partiellement, la composition chimique de leur environnement, (Figure 2.15)

En d'autre terme on peut dire que la corrosion d'un métal est la destruction de celui-ci sous l'effet de réactions chimiques ou électrochimiques, lorsqu'il est en contact avec un électrolyte.

Elle correspond donc au retour de la matière à son état le plus stable. Dans le cas du fer, par exemple, la forme stable dans la nature n'est pas le métal mais l'oxyde, c'est pourquoi une pièce en acier exposée sans protection à une atmosphère humide tend à se transformer en rouille (oxyde de fer hydraté).



Figure 2.15. Microscopie optique sur un acier corrodé [6]

II.2.3.2. Processus (types) de corrosion

A. Corrosion chimique

C'est une réaction hétérogène entre une phase solide (métal) et une phase liquide ou gazeuse (l'électrolyte). Le plus souvent c'est l'oxydation des métaux par les gaz à température élevée ; on parle donc de corrosion sèche.

Il se produit donc une attaque du métal avec formation d'un produit de corrosion à la surface. Ce type de corrosion, se rencontre surtout dans les fours, les chaudières et les turbines à gaz.

B. Corrosion électrochimique

Elle se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif. L'existence de cette hétérogénéité conduit à la formation d'une pile, ainsi la zone constituant l'anode (borne négative) de cette pile est corrodée. Les hétérogénéités dans le métal peuvent être des inclusions d'impuretés précipités et celles de l'électrolyte des gradients de concentration d'ions ou de gaz dissout, autrement appelée corrosion humide. [6]

- ❖ **Une hétérogénéité dans le métal :** La surface métallique comportant des zones anodiques et des zones cathodiques, donc des hétérogénéités de potentiel; donnant naissance à des piles galvaniques.
- ❖ **Une hétérogénéité dans l'électrolyte :** L'électrolyte assurant le transport des ions afin de refermer le circuit électrique pour permettre la circulation des électrons.

C. Corrosion bactérienne

C'est l'attaque bactérienne des métaux, elle est typique aux canalisations enterrées. Les bactéries peuvent produire des composés corrosifs tels que le CO₂, H₂S, NH₃, ou des acides organiques rendant ainsi le milieu agressif pour le métal. À titre d'exemple des, cas de corrosions dans les canalisations enterrées ont été observé au voisinage des joints de soudure contenant du soufre

D. Corrosion par érosion

Lorsque les produits de la corrosion forment un dépôt adhérent, épais, continu et dur à la surface du métal, celui-ci ralenti la vitesse de la corrosion ; on dit que le métal est en état de passivation. Cette couche protectrice peut être éliminée par une abrasion du métal, due au mouvement du fluide lui-même ; on remarque alors une accélération de la corrosion.

E. Corrosion par courant vagabond

La Corrosion par courant vagabond est une corrosion électrochimique particulière (car elle reçoit son énergie d'une source de courant extérieur). On appelle courant vagabond, tout courant électrique qui utilise, pour revenir à sa source, des structures dans lesquelles il ne devrait pas, logiquement circuler. Ce type de courant est généralement rencontré aux alentours des voies ferrées électrifiées, des machines d'extraction de mine, appareils de levages, etc.

F. Usure de contact

L'usure de contact est habituellement associée à la corrosion et se produit lorsque des produits de corrosion, comme les oxydes, s'accumulent entre deux surfaces par petits déplacements, suivant un mouvement périodique les unes par rapport aux autres. Les oxydes sont très durs et amplifient le processus d'usure. Ce type de corrosion en surface se produit fréquemment dans les conduites et les échangeurs de chaleur, où même une petite vibration peut lancer le processus d'usure de contact.

G. Fissuration par corrosion

On constate souvent que la corrosion aqueuse attaque les métaux de manière localisée autant que ou plutôt uniforme, et ceci peut conduire à la rupture d'une pièce beaucoup plus rapidement et insidieusement que ce qu'on supposerait d'après les vitesses moyennes de corrosion La

contrainte et la corrosion agissant simultanément peuvent être particulièrement nocives, et produire des fissures qui se propagent rapidement et de façon imprévisible. [19]

H. Fatigue-corrosion

La corrosion accroît la vitesse de propagation des fissures de fatigue dans la plupart des métaux et alliages. La vitesse de croissance de la fissure est plus grande souvent beaucoup plus grande que la somme des vitesses de corrosion et de fatigue prises séparément. [19]

II.2.3.3. Morphologie de la corrosion [6]

De façon générale on distingue trois formes sous lesquelles la corrosion peut se développer.

A. Corrosion uniforme (généralisée)

Elle est spécifique des métaux exposés en milieu d'acides minéraux.

B. Corrosion par piqûres (localisée)

Elle se localise en certain point de la surface du métal. (Figure 2.16).

Cette forme de corrosion est d'autant plus grave que l'on observe :

- Une augmentation de la température
- Une augmentation de la teneur en ions Cl^- , Br^- , ClO^-
- Un mauvais état de surface (rayure...)
- Une présence d'oxydant dans le milieu

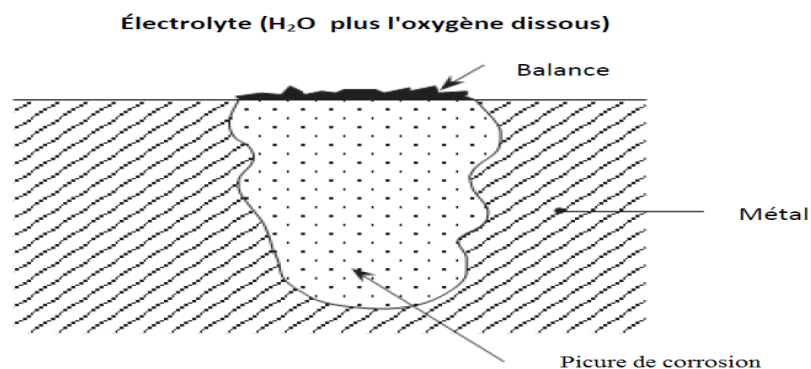


Figure 2.16. Corrosion par piqûres [9]

C. Corrosion inter granulaire

C'est également une attaque localisée, par contre plus sélective, causée généralement par les traitements thermiques subits par le métal, qui se développe aux points de jonctions des grains de métal (Figure 2.17). Elle est invisible à l'œil nu, par contre, affecte considérablement la résistance mécaniques du métal.



Figure 2.17. Corrosion intergranulaire d'un acier inoxydable [6]

II.2.4. Erosion

Le processus d'érosion est un phénomène surfacique associé à un enlèvement de matière causé par des impacts répétés des particules solides sur le matériau. Le problème d'érosion touche plusieurs secteurs industriels tels que les tuyaux, les réservoirs, les turbines, les composants hydrauliques, les pompes, les industries de procédés, ...etc.

En fait, l'élimination complète de l'érosion du matériau est impossible, mais l'étude des caractéristiques du matériau et le mécanisme de rupture est une manière de comprendre la cause de rupture qui permet de minimiser l'endommagement.

II.2.4.1. Théorie de l'érosion

Le phénomène d'érosion des matériaux par des particules solides est un processus assez complexe. Les chocs entre les particules solides et la surface d'un matériau entraînent l'enlèvement de matière caractérisé par la rupture fragile. Les types et les dimensions des fissures qui se forment sur la surface, durant l'impact, sont largement étudiés et dépendent de plusieurs facteurs : forme, masse, vitesse des particules, dureté et ténacité du matériau.

II.2.4.2. Mécanismes de l'érosion par des particules solides

Les actions mécaniques, chimiques et thermiques sont l'origine des séparations de la matière tel un débris d'érosion, mais les moyens pour atteindre ces actions sont différents. En général, on distingue quatre mécanismes principaux d'érosion par impact des particules solides : coupe, fatigue, rupture fragile et fusion.

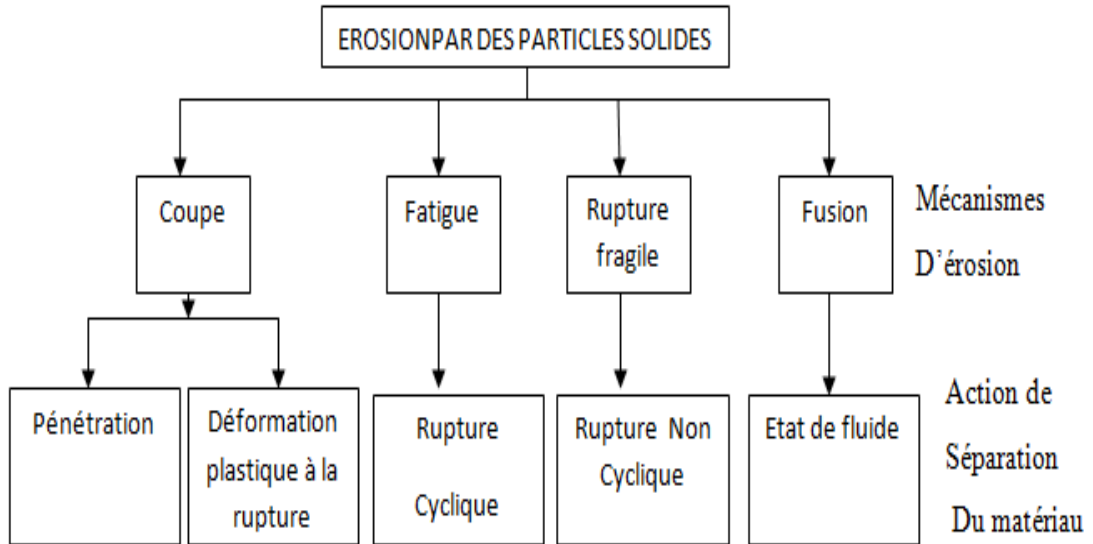


Figure 2.18. Mécanismes d'érosion par des particules [20]

Les actions de coupe peuvent être classées en découpage par pénétration de particules ou en déformation plastique à la rupture.

On suggère les mécanismes possibles de l'érosion par impact des particules solides : érosion abrasive, fatigue de surface, rupture fragile, déformation ductile, fusion de surface, érosion macroscopique et érosion atomique.

A. Erosion abrasive (Coupe)

Lorsque des particules frappent une surface à faible angle d'impact, le mécanisme est appelé érosion abrasive. Quand le sable abrasif frappe une surface, il roule ou glisse provoquant l'érosion par frottement ou par découpage. La matière est enlevée par griffures ou par démolition des bords aigus des particules, en formant de petites cicatrices.

B. Fatigue de surface

Ce mécanisme d'érosion ressemble à l'usure par fatigue des surfaces roulées. Lorsque les particules frappent une surface avec un grand angle d'impact et une basse vitesse, la surface ne subit aucune déformation plastique. Cette surface est affaiblie par fatigue, et des fissures apparaissent après des impacts répétés. Les particules se détachent de la surface après plusieurs impacts.

C. Déformation plastique

La déformation plastique de la surface a lieu en raison de la formation des écailles autour du point d'impact, lorsque les particules frappent la surface élastique avec une vitesse moyenne et un grand angle d'impact. En répétant l'impact sur les écailles, le matériau se détache tels des débris.

D. Rupture fragile

Lorsque les particules impactent une surface fragile avec un grand angle d'impact et une vitesse moyenne, l'érosion se fait par rupture fragile. Si les particules sont aigues, la fragmentation fragile s'effectue par détachement des particules de la matière

II.2.5. Rapport D'incidente Ligne 8" De Décharge Des PSV Vers Torche Ligne 325-326/SCN

A. Introduction

L'incident survenu le 17/03/2013 à la station de compression Nord, s'est produit sur la ligne de décharge des soupapes de sécurité (PSV-151A/B et 152A/B) vers le collecteur PPL de torche de diamètre 22".

Cet incident s'est produit, suite à une fatigue du métal provoquée par d'intenses vibrations des lignes lors des différentes opérations de décharge. Il est caractérisé par deux fissurations, dont l'une partielle ; située sur le cordon de soudure de liaison de la ligne 4" (décharge de la PSV - 152B) et une autre longitudinale débutante sur le même joint de soudure et progressant sur les deux sens avec un largueur d'environ 44 cm et ouverture d'environ 10 mm (voir photos correspondantes). (Tableau 2.4).

Suite à cet évènement, des dispositions d'urgence ont été prises par le service exploitation afin de préserver les équipements en cas de retour de gaz. Celles-ci consistent à l'isolement total du collecteur PPL 22"-V2002-F et l'arrêt des lignes reliées à lui.

Après, inspection de l'endroit sujet aux fissurations et la remise en service des lignes en toute sécurité, il a été décidé, d'un commun accord avec les structures concernées, d'installer, sur le collecteur de torche de dia.8" des machines 325 et 326, un jeu de brides [18].

B. Constat

Le contrôle visuel de la zone ayant subi la fissuration a révélé que les parois internes des tubes 4 et 8" demeurent sans corrosion et gardent un bon aspect. Les raisons retenues, ayant causées cet endommagement, sont la fatigue du matériau et les vibrations intenses et continues des lignes.

C. Caractéristiques des lignes

Ligne : PSV-15A/B et PSV-152A/B vers 22" –V2002-F

1) Lignes de décharge des PSV -151 A/B

Matériel : acier au carbone, Diamètre : 6" avec réduction 6x4", Epaisseur : 5.2 mm

2) Lignes de décharge des PSV-152 A/B

Matériel : acier au carbone, Diamètre : 4" avec réduction 4x3", Epaisseur : 6.39 mm

3) Collecteur vers lignes PPL 22

Matériel : acier au carbone, Diamètre : 8", Epaisseur : 6.39 mm –Schedule 20.

D. Paramètres opératoires

Température de calcul : 70 °C,

Température de service : 50 °C

Pression de calcul : 11.0 Kg/cm², Pression de service : 1.0 Kg/cm²,

Pression d'épreuve : 16.5 Kg/cm²

E. Réparation

Pour pouvoir procéder à la réparation de l'endroit ayant fait l'objet de fissuration, il a été nécessaire de sécuriser les autres installations en procédant à l'isolement du circuit de torche. Cela, s'est effectué par une coupe à froid sur la ligne de diamètre 8", à environ 90 cm du deuxième coude, et soudage d'une bride slip ou avec bride pleine.

La deuxième phase consiste à la fabrication dans l'atelier chaudronnerie d'une manchette de remplacement de diamètre 8" avec les quatre piquages de déversement des soupapes .pour minimiser les contraintes de vibrations au des joints de soudures, des plaques de renforcement ont été soudées .

F. Matériel des tubes utilisé

Tube 8 ": Matériel : A53 Gr B, Ep : 8.2mm.

Tube 6 ": Matériel : A53 Gr B, Ep : 8.7mm.

Tube 4 ": Matériel : A53 Gr B, Ep : 6.0mm.

G. Conclusion du rapport

Suite à des investigations, les contrôleurs conclu que la raison de la fissuration produite sur la ligne de décharge des soupapes de sécurité est, principalement, due à la fatigue du matériau d'usage et les vibrations intenses de la ligne. Cela est vérifié par l'absence totale de corrosion que ce soit les parois internes ou externes.

La réparation apportée consiste au changement partiel de la ligne menant des PSV 151-152 A/B au collecteur PPL 22 de torche. A cet effet, un jeu de bride a été soudé sur les deux bouts de la ligne 8 afin de permettre une réparation sécurisée. En outre, après soudage de la bride et fabrication de la manchette de remplacement, des contrôles non destructifs ont été effectué.

- Contrôle au liquide pénétrant du joint de soudure de la bride 8 et les quatre bossages des lignes des soupapes.
- Test hydrostatique de la manchette à une pression 17 kg/cm² correspondante à 1.5 fois la pression de calcul.

<p>Photo N 01 : Vue générale de la zone de l'incidente ligne 325/326.</p>	
<p>Photo N 02 : Photo rapproché de la zone.</p>	
<p>Photo N 03 : Fissuration longitudinale 44 cm sur le collecteur de dia. 8".</p>	
<p>Photo N 04 : Fissuration du cordon de soudure du piquage de dia.4". (Décharge de la PSV-152B).</p>	

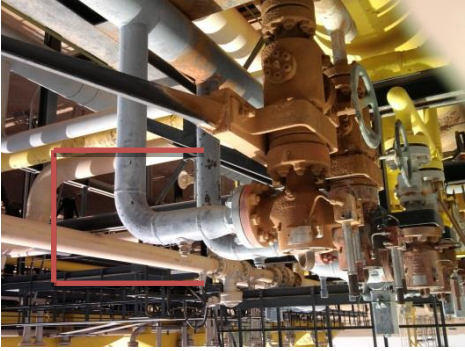



<p>Photo N 05 : positionnement de l'endroit de la découpe</p>	
<p>Photo N 06 : Installation de la bride d'isolement sur le collecteur 8".</p>	
<p>Photo N 07 : Nouvelle manchette en place sur le rack.</p>	
<p>Photo N 08 : Contrôle au liquide pénétrant des bossages.</p>	

Tableau 2.4. Record photographique du l'incident [18]

II.2.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté dans la première partie une définition et une vue générale sur la technologie des pipelines. Puis on a parlé sur les propriétés chimiques et mécaniques qui caractérisant les aciers les plus utilisés et on a cité les différents procédés de fabrication des tubes pour le transport des hydrocarbures.

Dans la deuxième partie on a effectué une recherche sur les principales causes de défaillance des pipelines tels que les fissures, la corrosion, l'érosion, l'usure puis on a clôturé ce chapitre par un rapport d'incident sur la station de compression nord de Hassi Rmel.

D'après cette recherche on a constaté les différentes étapes pour que l'acier sera en mise d'acheminement, et juste là, il sera sujette à des plusieurs endommagements par fatigue. Donc, que signifie la fatigue? Et que peut-on dire pour la propagation de fissure? Ça c'est qu'on verra au chapitre suivant.

CHAPITRE III

ETUDE

BIBLIOGRAPHIE

&

COMPORTEMENT EN

FATIGUE

III.1. Introduction

Toute pièce mécanique est soumise durant son fonctionnement normal à un certain nombre de sollicitations de causes variables mais qui se traduisent le plus souvent par des variations cycliques qui lui sont appliquées. Or, il est malheureusement souvent constaté, est ce depuis fort longtemps, la ruine, parfois catastrophique, d'un certain nombre de structures alors que celles-ci ne sont soumise qu'à des sollicitations dynamiques jugées modestes par rapport aux capacités statique des matériaux définies communément par leur résistance à la rupture et leur limite d'élasticité.

Le responsable de ces ruine est très souvent le phénomène de fatigue des matériaux, au caractère particulièrement caché puisque se développant lentement dans le temps, sans modifications macroscopiquement des pièces et des structures dans des zones souvent inaccessibles mais particulièrement sujettes à cet endommagement de par leur conception.[13] (Figure 3.1).

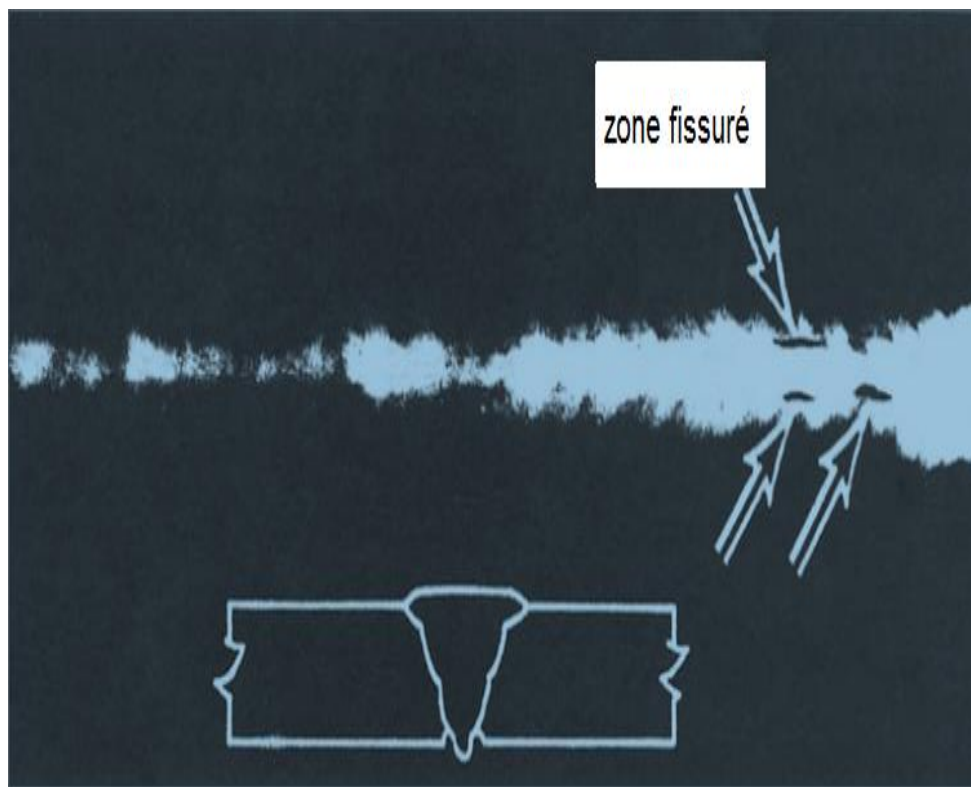


Figure 3.1. Exemple de fissure sur une plaque [7]

III.2. Approche Théorique Sur La Mécanique Linéaire De La Rupture

III.2.1. Introduction

La mécanique de la rupture a pour objet d'étudier et de prédire l'amorçage et la propagation de la fissure dans le solide. Le début de l'étude de la rupture des matériaux ductiles (grande déformation avant la rupture) n'a débuté qu'à la fin des années 1970 avec les travaux fondamentaux de RICE et al. [21], et l'étude de la rupture fragile (peu de déformation avant la rupture) remonte aux années 1920 avec les travaux de Griffith [12].

Selon le comportement physique du matériau, on utilise les concepts adaptés de la mécanique de la rupture. La classification habituellement utilisée pour ces concepts est la suivante :

- La mécanique linéaire de la rupture (MLR) pour les matériaux dont le comportement est essentiellement linéaire ;
- La mécanique non linéaire de la rupture (MNL) ou mécanique élasto-plastique de la rupture (MEPR), pour les matériaux ductiles, tels que les aciers à faible ou moyenne résistance, les INOX....

III.2.2. Définitions

On peut définir la ténacité d'un matériau avant d'exposer le concept de mécanique de rupture, comme étant l'aptitude du matériau à résister à la propagation des fissures. Dans la présente étude, on a intéressé principalement à la mécanique élasto-plastique de la rupture, qui demeure applicable aux matériaux ductiles.

III.2.3. Contraintes Mécaniques

Le terme contrainte, ou stress, est employé couramment aujourd'hui, mais il possède un sens technique bien précis, et il en est de même pour le terme déformation. La déformation est un effet qui résulte de la contrainte.

A. Contraintes mécaniques et déformation

Lorsqu'une charge ou une force est appliquée à un matériau, ce matériau est assujéti à une contrainte définie comme étant la force appliquée sur une unité de surface. (Cette notion nous permet d'ignorer la taille de l'unité tout en examinant les effets de la force sur l'état physique de la pièce.) Par exemple, une force externe due à la pesanteur est exercée sur tous les matériaux.

Il existe trois types de contraintes :

- Contrainte de traction qui tend à allonger un matériau.
Exemple : un ressort muni d'un poids attaché à l'une de ses extrémités.
- Contrainte de compression qui tend à comprimer un matériau.
Exemple : un cric d'automobile soumis à une charge.
- Contraintes de cisaillement qui résultent de l'application d'une charge transversale.
Exemple : contrainte exercée sur un arbre qui est mal aligné.

Les trois types de contraintes sont illustrés à la figure 3.2 :

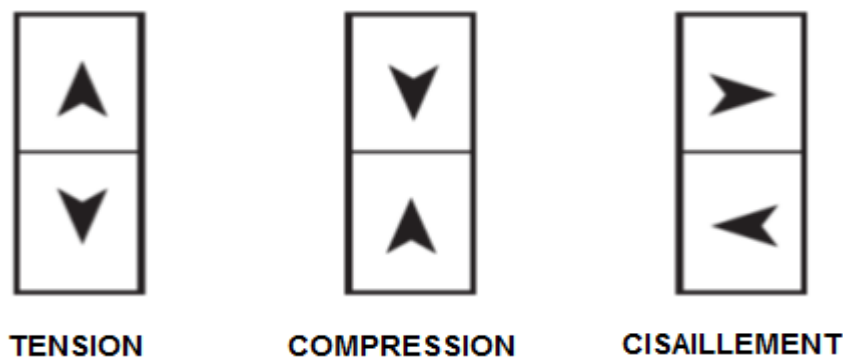


Figure 3.2. Types de contraintes [34]

La déformation est l'effet résultant de la contrainte. Par exemple, la déformation est souvent mesurée comme étant le % d'allongement ou le changement relatif de longueur d'une pièce sur laquelle une force de traction a été exercée. Dans de nombreux matériaux, les contraintes appliquées peuvent avoir un ou plusieurs des effets suivants, selon l'importance de la contrainte :

- Lorsqu'il est assujéti à une contrainte relativement faible, le matériau subit une déformation élastique, et retourne à son état initial après l'élimination de la contrainte.

- Lorsqu'il est assujéti à des niveaux de contrainte modérés, le matériau atteint sa limite d'élasticité, ou limite apparente d'élasticité et commence à subir une déformation plastique. Il ne retournera pas à son état initial, mais subira une déformation permanente.
- Lorsqu'il est assujéti à des niveaux de contrainte relativement élevés, le matériau connaît une défaillance ou une rupture parce que sa limite conventionnelle de proportionnalité a été dépassée.

B. Contraintes résiduelles

Au cours de la fabrication, de l'installation ou de l'entretien, le matériau peut être laissé dans un état tel que des contraintes agissent de manière permanente à l'intérieur du matériau. La contrainte résiduelle est appliquée de manière continue à l'intérieur du matériau durant toute la durée de vie de l'équipement. On peut pratiquer des ouvertures à la perceuse, souder ou plier les pièces pour appliquer des contraintes résiduelles dans un matériau. Une définition plus officielle suivra. La contrainte résiduelle est une tension ou une compression, qui existe dans le substrat du matériau en l'absence de l'application de charges externes (force appliquée, déplacement d'un gradient thermique).

C. Etat de contrainte

On peut distinguer deux états particuliers de contraintes : l'état plan de contrainte et l'état plan de déformation (figure 3.3). On est en état plan de contraintes lorsqu'on a :

$$\sigma_{zz} = \sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0 \quad (3.1)$$

On se trouve en état plan de contrainte, par exemple, dans le cas d'une tôle mince soumise à des efforts dans son plan. On est, par contre, en état plan de déformation lorsque :

$$\varepsilon_{zz} = 0 \quad (3.2)$$

$$\sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0 \quad (3.3)$$

L'état plan de déformation peut avoir lieu au centre d'une pièce épaisse, où le tri-axialité des contraintes est important.

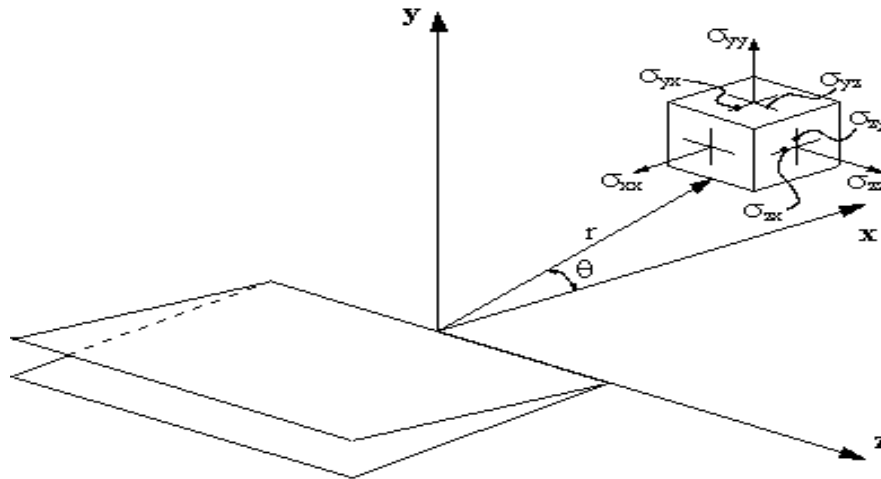


Figure 3.3. Etat de contrainte [35]

Pour décrire le champ de contrainte au voisinage du front d'une fissure, on peut utiliser la méthode d'IRWIN [13] pour une plaque sollicitée en mode I :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (3.4)$$

Avec : K facteur d'intensité de contrainte.

La cause principale de la rupture de la structure est la croissance des défauts type fissure, qui atteignent ou dépassent une taille critique. Ces défauts, qui sont pratiquement présents dans toutes les structures métalliques, apparaissent essentiellement, lors de la fabrication. A la solidification, les variations de volumes de température et de composition, induisent des séries de défauts. Parmi ces défauts structurels, il y a en particulier les inclusions, qui sont des particules généralement non métalliques et insolubles, emprisonnées dans le front de solidification.

Le mécanisme de formation de fissures, se produit par accroissement et étirement des cupules, ou tous juxtaposées en creux, s'initient aux niveaux des particules par décohésion de l'interface ou clivage de ces particules, qui sont très faiblement liées à la matrice.

Les paramètres importants qui contrôlent la déformation à la rupture sont la fraction volumique des particules, leur espacement, leur taille ainsi que le degré de cohésion.

III.2.4. Equations de la mécanique de la rupture

❖ Equations de l'élasticité plane [35]

Les équations de comportement d'un milieu élastique linéaire et isotrope au point (M) peuvent être exprimées en utilisant les 2 paramètres E, ν ou μ , λ

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{E}{2(1+\nu)} \quad ; \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)} \\ \lambda &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{et} \quad E = \mu \frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\nu}{E} = \frac{\lambda}{2\mu(3\lambda+2\mu)} \quad (3.5)$$

Avec : E module de YOUNG ; μ module cisaillement ;

λ coefficient de Lamé. ν coefficient de poisson ;

La loi de Hooke :

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma} &= 2\mu\bar{\varepsilon} + \lambda(\text{tr}\bar{\varepsilon})\bar{\mathbf{I}} ; \quad \sigma_{ij} = \lambda(\text{tr}\bar{\varepsilon})\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij} \\ \bar{\varepsilon} &= \frac{1+\nu}{E}\bar{\sigma} - \frac{\nu}{E}(\text{tr}\bar{\sigma})\bar{\mathbf{I}} ; \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{ij} - \frac{\nu}{E}\text{tr}\bar{\sigma}\delta_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

a) **Etat de contraintes planes** : $\sigma_{zz} = \sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0$

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1+\nu}{E}\sigma_{xx} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1+\nu}{E}\sigma_{xy} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1+\nu}{E}\sigma_{yy} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \end{aligned} \right. ; \left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{2\mu}[\sigma_{xx} - \frac{\lambda}{3\lambda+2\mu}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{2\mu}[\sigma_{yy} - \frac{\lambda}{3\lambda+2\mu}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2\mu}\sigma_{xy} \end{aligned} \right. \quad (3.7)$$

b) **Etat de déformations planes** : $\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zz} = 0$

En remplaçant λ par λ^* tel que : $\lambda^* = \frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu}$

D'où :

$$\frac{\lambda}{3\lambda+2\mu} = \frac{\lambda^*}{2(\lambda^*+\mu)} \quad (3.8)$$

On aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1+\nu}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \varepsilon_y = \frac{1+\nu}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \varepsilon_{xy} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{xy} \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{2\mu} [\sigma_x - \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)} (\sigma_x + \sigma_y)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{2\mu} [\sigma_y - \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)} (\sigma_x + \sigma_y)] \\ \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{xy} \end{array} \right. \quad (3.9)$$

On peut écrire pour les 2 états, dans une forme unique avec $\lambda^* = \lambda$

- en déformations planes :

$$\lambda^* = \frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu} \quad (3.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{xx} = \frac{1}{2\mu} [\sigma_{xx} - \frac{\lambda^*}{2(\lambda^*+\mu)} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \\ \varepsilon_{yy} = \frac{1}{2\mu} [\sigma_{yy} - \frac{\lambda^*}{2(\lambda^*+\mu)} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \\ \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{xy} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

III.2.5. Transition Ductile-Fragile

A. Ductilité

La ductilité est une mesure de la capacité d'un corps à se déformer ou à subir une déformation plastique sous l'effet d'une contrainte de cisaillement ou de traction sans se rompre. La déformation plastique est irréversible. Cela signifie que des changements sont survenus dans la structure fondamentale de la pièce au cours de la déformation. Pour la plupart des matériaux, la ductilité augmente avec la température.

La dureté, ou la résistance d'un matériau à la pénétration d'un objet tranchant est une propriété associée de près à la ductilité. Les matériaux ductiles sont habituellement relativement tendres, et les matériaux durs sont souvent fragiles (manquent de ductilité). Les diamants par exemple sont des matériaux très durs, et le talc est un exemple de matériau très tendre. [34]

B. Effets de la microstructure sur la rupture ductile

L'influence de la microstructure sur la rupture des métaux a été introduite suite aux travaux métallographiques de Masounave.J, Bathias.C, Dickson.I [15], qui ont montré que les ruptures ductiles (Figure 3.4), qui généralement se produisent dans les métaux et principalement les aciers, sont normalement causées par la nucléation, l'accroissement et la jonction de cupules (trous) dans les matériaux. Les cupules s'initient au niveau des particules, par décohésion de l'interface ou par clivage de ces particules et s'accroissent par mécanisme plastique. [35].

Les particules non métalliques, typique de l'acier sont des inclusions, qui sont très faiblement liées à la matrice et donc initient très facilement des cupules. La rupture par coalescence de cupules est caractérisée par des surfaces de rupture, consistant en des activités ductiles et l'état de contraintes en tête de fissure à une importante composante hydrostatique.



Figure 3.4. Rupture ductile d'un tuyau de Ø. moyen sous l'effet de la pression interne [2]

Le mécanisme de rupture ductile est donc essentiellement un phénomène de déformation plastique, qui survient quand la déformation atteint une valeur critique. Donc la formation des surfaces de rupture de faciès ductiles, peut être analysée en trois phases qui se succèdent au cours de la déformation du métal conduisant à la rupture :

- 1) Formation de fissures au niveau de précipités ou inclusion contenue dans le métal ;
- 2) A partir de ces fissures, formation de trous très allongés dans le sens de la déformation
- 3) Coalescence de ces trous conduisant à la rupture.

C. Fragilité

Les métaux fragiles ont une capacité de déformation plastique relativement faible avant la rupture. Cela signifie qu'une pièce fragile soumise à une charge excessive de contraintes peut connaître une défaillance soudaine et potentiellement catastrophique sans allongement initial ou déformation. Moins un métal est ductile, plus il sera fragile [34].

Le comportement lié au rapport entre la contrainte de traction et la déformation à ces deux types rupture est illustré dans la figure 3.5.

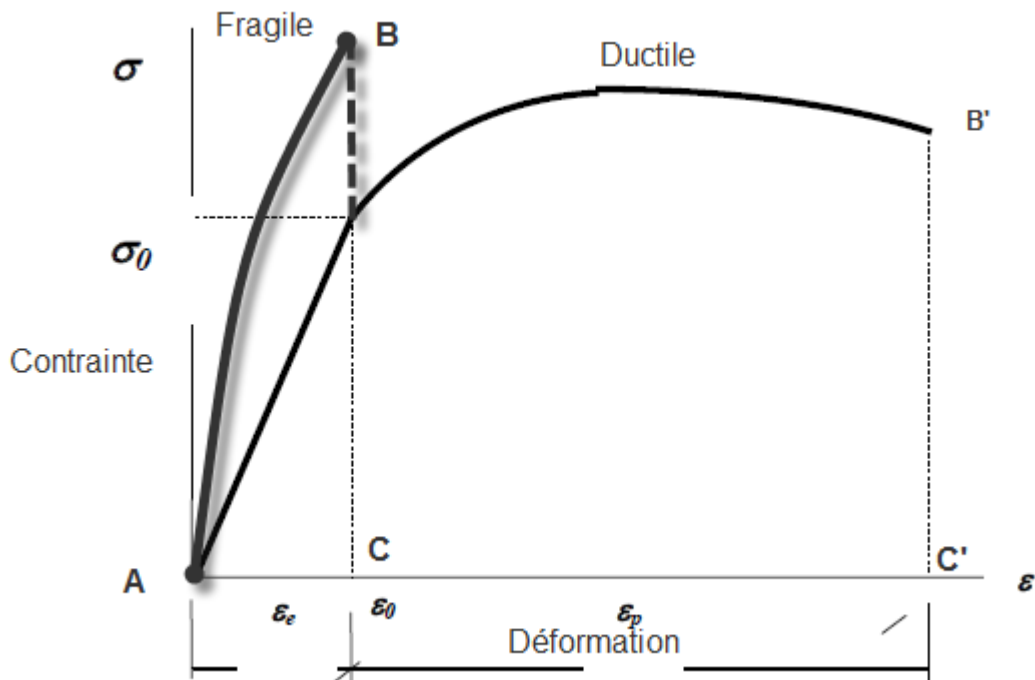


Figure 3.5. Courbes contrainte-déformation [39]

D. Différences entre le comportement ductile et la rupture fragile

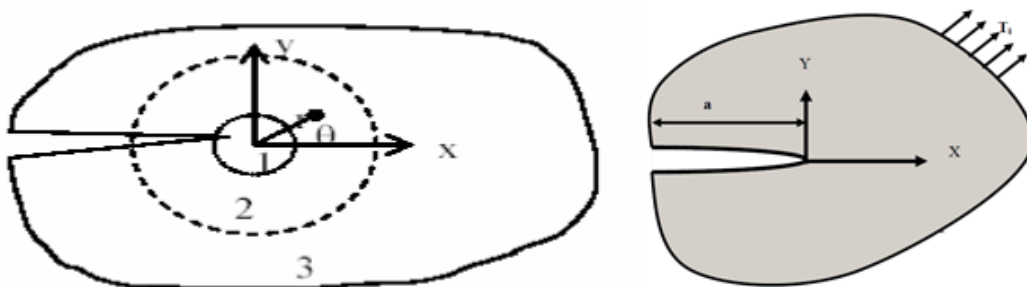
Le tableau (3.1) résume les différences entre la rupture fragile et la rupture ductile (précédée par une déformation plastique appréciable). De façon générale, la rupture ductile est le mode de défaillance le plus souhaitable parce qu'il est précédé d'une déformation plastique appréciable avant la rupture; cette déformation, si l'on en tient compte, constitue un avertissement précoce à l'effet qu'une rupture est imminente.

Tableau 3.1. Caractéristiques de la rupture ductile et de la rupture fragile [34]

Caractéristiques d'une rupture ductile	Caractéristiques d'une rupture fragile
D'abord, on observe un processus de déformation au cours duquel le matériau se déchire lentement avec une grande dépense d'énergie.	Comprend peu ou pas de déformation du matériau.
La propagation de fissures est un processus lent. On observe une déformation plastique importante avant et pendant la propagation des fissures.	La propagation de fissures est rapide (environ 2000 m/s). (La rupture fragile n'est possible que lorsque les fissures se propagent à des vitesses élevées.)
La fissure se propage à travers les grains (propagation transgranulaire) et l'aspect de la fissure est le suivant : elle est grise et fibreuse.	La fissure se propage le long des joints de grain (propagation intergranulaire) et confère à la surface de rupture un aspect cristallin brillant ou granulaire.

III.3. Etude D'un Milieu Fissuré

Dans un milieu élastique fissuré, la région proche de la pointe de fissure peut être décomposée en trois zones (figure 3.6) :

**Figure 3.6.** Les zones de champs mécaniques [14]

- a. La zone d'élaboration** : au voisinage direct de la pointe de fissure, l'étude de cette zone (considérée comme ponctuelle, d'un point de vue mécanique) est très

complexe dans la mesure où les contraintes tendent vers l'infini (d'un point de vue théorique) par rapport à la pointe de fissure ;

- b. La **zone singulière** : dans cette zone, le champ de contrainte présente une singularité en $r^{-1/2}$
- c. La **zone des champs lointains** : extérieure aux deux précédentes, elle raccorde la zone singulière aux conditions aux limites de chargement et déplacement.

C'est la singularité d'ordre $-1/2$ dans la zone singulière qui caractérise la solution obtenue en élasticité pure. Cette solution n'est physiquement pas réaliste. En fait, les contraintes en pointe de fissure (Figure 3.7) sont « écrêtées » par la plasticité Bouchard [14]. De plus, la signification énergétique de la rupture proposée par Griffith [12] devient plus ambiguë, dans la mesure où elle consiste à représenter la propagation de la fissure comme un déchargement. Or, en plasticité, une partie de l'énergie est dissipée (phénomène irréversible) et on ne peut donc pas toujours évaluer la fraction d'énergie « disponible » pour la propagation.

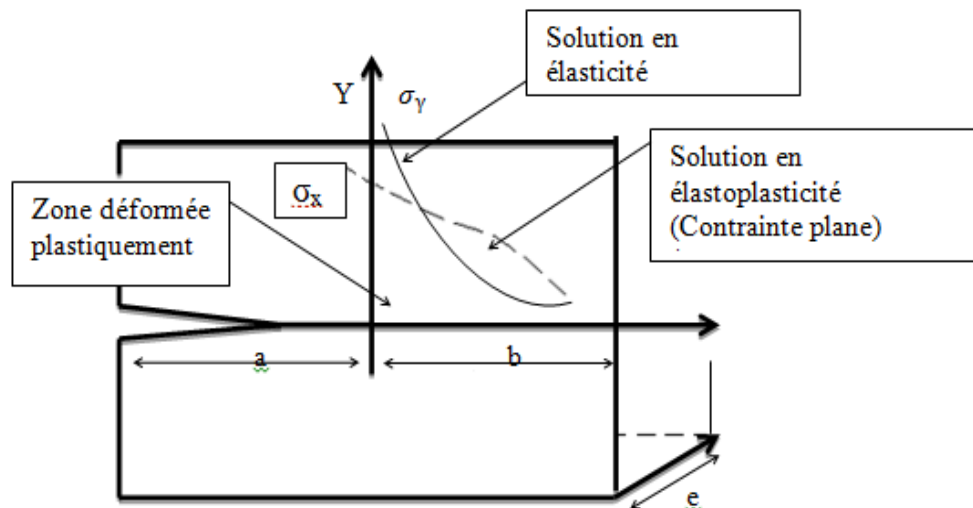


Figure 3.7. Plasticité en pointe de fissure [35]

III.3.1. Modes de rupture (Figure 3.8)

Pour décrire les déplacements ou les contraintes dans une fissure, il est nécessaire de distinguer trois modes, décrivant le mouvement relatif des deux surfaces de la fissure

- **Mode I** : « mode par ouverture » ; les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement l'une par rapport à l'autre.

- **Mode II** : « glissement droit » ; les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan, perpendiculairement au plan de la fissure.
- **Mode III** : « glissement vis » ou « déchirement » ; les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan, parallèlement au front de la fissure.

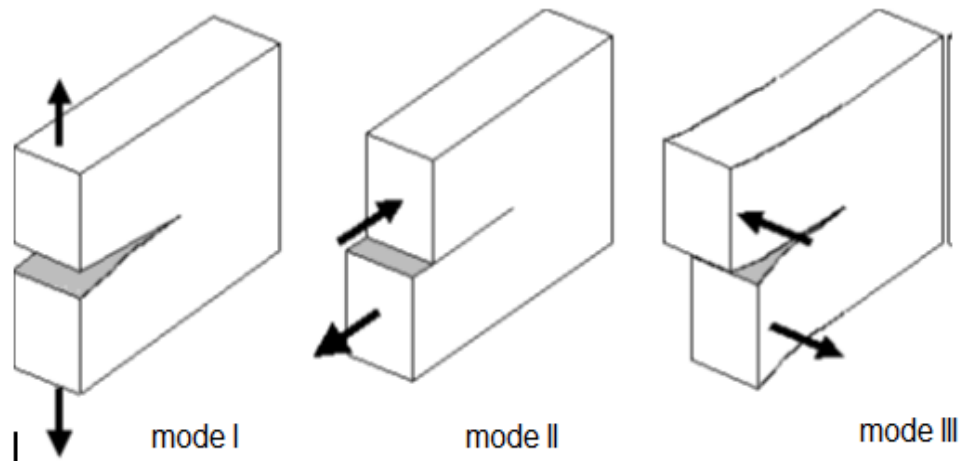


Figure 3.8. Modes principaux de chargement [35]

Le **mode I** est le mode principal de rupture. Il concerne les cas de chargement les plus importants et les plus dangereux.

La distribution des contraintes à la pointe de la fissure en **mode I** est donnée par les équations suivantes [20] :

$$\sigma_{xx} = \frac{KI}{2\pi r} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.12)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{KI}{2\pi r} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.13)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{KI}{2\pi r} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.14)$$

K_I représente le facteur d'intensité de contrainte en mode I.

Avec en fonction de la distribution des contraintes σ_{yy} : $K_I = \sqrt{2\pi} \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{yy}(r, \theta) r^{1/2}$ (3.15)

III.3.2. Dimensionnement d'un tube sous pression concept de fuite avant rupture

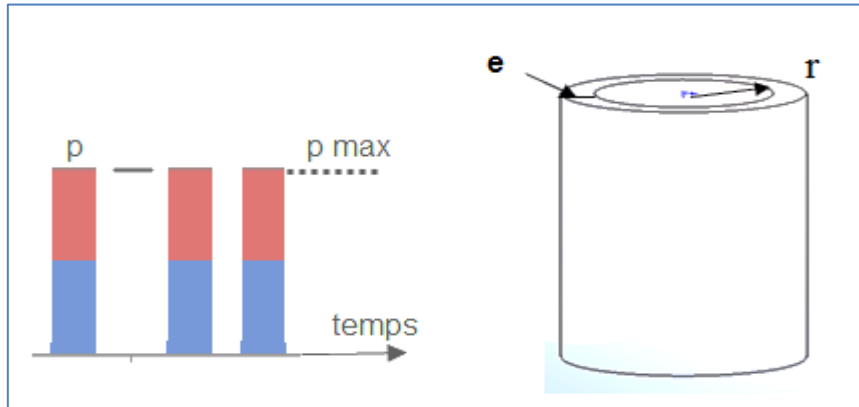


Figure 3.9. Schématisation du cycle de chargement et de la géométrie.

On cherche à dimensionner les cylindres, c'est-à-dire à déterminer l'épaisseur optimale du tube qui n'entraîne aucun risque de rupture possible pour une pression test de deux fois la pression de service. Pour cela on analysera les différents risques de rupture suivants :

1. rupture par charge limite.
2. rupture par fissuration critique.
3. propagation de fissure par fatigue.

Les différentes composantes du tenseur des contraintes en supposant que le tube est mince, la contrainte ortho radiale $\sigma_{\theta\theta}$ est largement plus grande que toutes les autres dès lors que (e/r) est petit. On considérera donc un état de contrainte uni axiale, avec pour seule composante non nulle.

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{Pr}{2e} \quad (3.16)$$

Avec : $\sigma_{\theta\theta}$ Contrainte de référence qui doit être définie pour chaque problème.

P : pression ; r : rayon ; e : épaisseur.

Soit σ_y la limite d'élasticité du matériau, supposée égale à la contrainte ultime à rupture (matériau élastique-parfaitement plastique). On établit le critère en « P » et « e » afin que le réservoir reste toujours en deçà de la charge limite.

Pour prévenir la rupture par charge limite, il faut que $\sigma_{\theta\theta}$ reste inférieur à σ_y , ce qui impose que l'épaisseur reste supérieure à une valeur limite : $e \geq e_l = \frac{Pr}{\sigma_y}$. (3.17)

Dans l'épaisseur du cylindre, les défauts sont modélisés par des disques de diamètre $2a$.

Les défauts qui débouchent en surface ont en général une section elliptique, le petit axe étant situé en direction radiale. On effectue donc une évaluation conservative en les assimilant à des demi-disques de diamètre $2a$. Dans les deux configurations de défaut le facteur d'intensité de contrainte K sera approché par la relation : $K = \sigma_{\theta\theta} \sqrt{\pi a}$. (3.18)

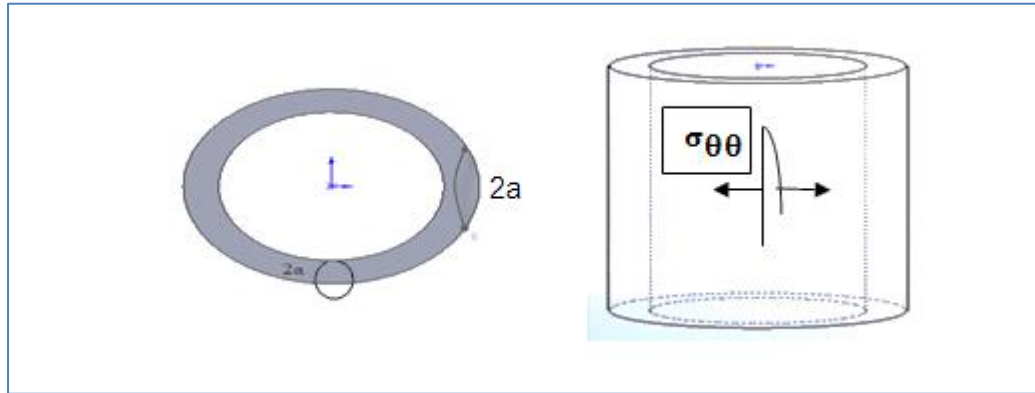


Figure 3.10. Schématisation des défauts dans le tube

La courbe suivante (Fig.3-11) dans le plan $\log(a)$ – $\log(s)$ est la réunion d'une droite horizontale $\sigma = \sigma_y$ correspondant à la charge limite, et la droite de pente -0.5 , représentant la relation $Kc = \sigma_y \sqrt{\pi a}$, qui modélise la rupture par fissuration critique. La valeur critique de a est donc a_c telle que $Kc = \sigma_y \sqrt{\pi a}$, soit : $a_c = \left(\frac{Kc}{\sigma_y}\right)^2$ (3.19)

- si on augmente P depuis A , le tube casse par charge limite. C'est un mode de rupture qui n'est pas considéré comme dangereux, car il est associé à des déformations élevées, qui peuvent être repérées avant rupture (par exemple par la pose de capteurs sur la surface extérieure du réservoir). Par ailleurs ces déformations conduisent à des chutes de pression qui stabilisent le système.
- si on augmente P depuis B , le tube casse par fissuration rapide. C'est un mode de ruine catastrophique qu'il faut absolument éviter. Pour ce là il suffit d'être sûr que tous les défauts présents dans le matériau sont de taille inférieure à la taille du défaut critique a_c . Cela est vérifié si $e \leq 2a_c$.

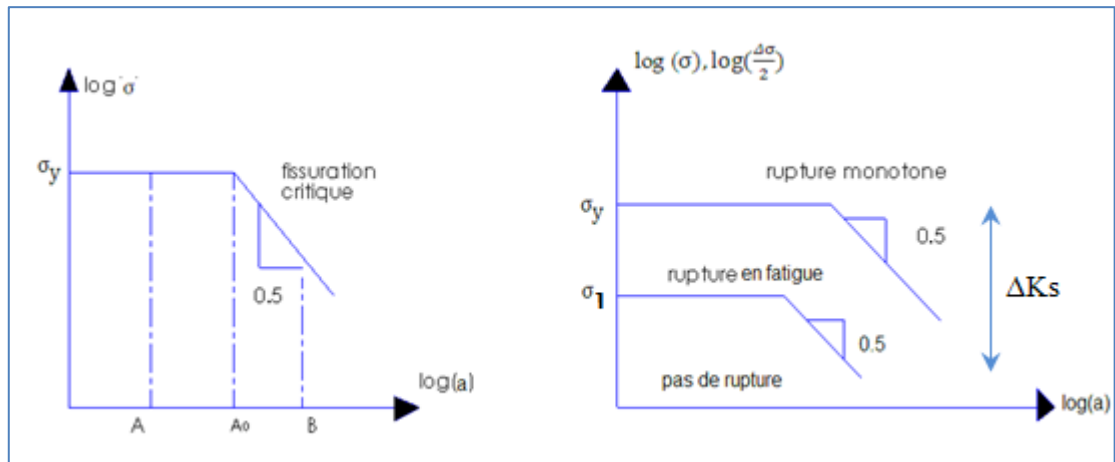


Figure 3.11. Courbe définissant le domaine sécurité dans le plan a - σ sous chargement monotone et en fatigue. [35]

Une structure peut se rompre pour des chargements inférieurs à la limite de rupture monotone si elle est soumise à des sollicitations cycliques. La figure (3.11) montre qu'il existe ainsi un seuil σ_1 inférieur à σ_y , et un seuil ΔK_s pour le phénomène de propagation.

III.4. Propagation De Fissures Par Fatigue

La mécanique de la rupture est un outil efficace qui permet aux concepteurs et aux ingénieurs de prendre en compte l'apparition des défauts dans les matériaux et d'éviter ainsi toute rupture brutale. Dans le cas de charges statiques ou monotones et en s'appuyant sur la ténacité du matériau considéré, les charges maximales que la structure contenant des défauts peut supporter peuvent être calculées. Inversement, lorsque l'on connaît la valeur de charge agissant sur la structure, on peut déduire la taille critique des défauts tolérables.

Or, il suffit de considérer les structures qui nous entourent pour constater qu'elles sont soumises, en service, à des charges d'amplitude variable dans le temps, qu'il s'agisse des ailes ou du train d'atterrissage d'un avion, des pièces de tous les tubes active. L'application et le retrait d'une charge, même si sa valeur est inférieure à la charge maximale admissible calculée par l'approche de mécanique de la rupture, répétés un grand nombre de fois, peuvent entraîner la rupture de la structure. Il s'agit du phénomène de fatigue.

En fonction du temps, la charge appliquée et donc la contrainte peuvent varier de façon sinusoïdale, périodique ou aléatoire. Cependant, par souci de simplicité on effectue les essais de fatigue, en laboratoire, on utilisant des chargements qui varient de façon simple

(sinusoïdale ou triangulaire). Dans ce cas, les variables caractéristiques de l'essai sont (Fig.3.12)

- Les contraintes maximale σ_{\max} et minimale σ_{\min}

- L'amplitude de contrainte $\sigma_a = 1/2(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ (3.17)

- La contrainte moyenne ou contrainte statique $\sigma_m = 1/2(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$ (3.18)

- Le rapport des contraintes min max $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ (3.19)

- La période T (ou la fréquence $f=1/T$)

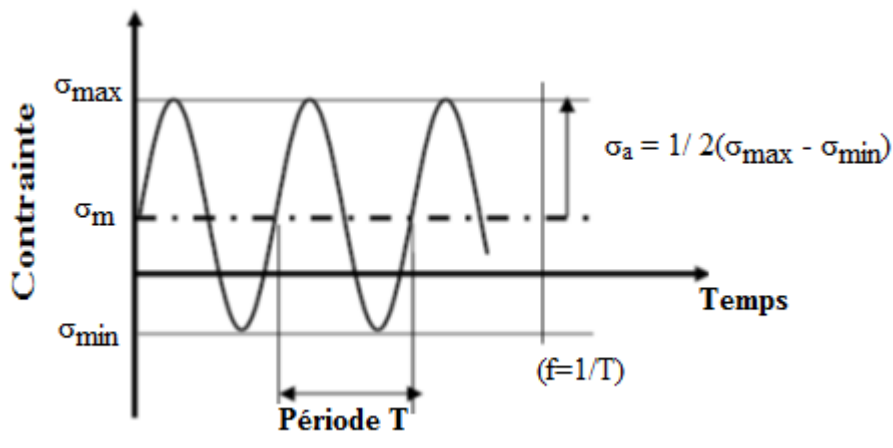


Figure 3.12. Représentation schématique d'un chargement de fatigue [24]

Selon l'amplitude de la contrainte, on peut définir deux grands domaines : la fatigue endurance et la fatigue oligocyclique:

- ✓ **Fatigue endurance** : l'amplitude de contrainte est faible. Macroscopiquement, la déformation reste pratiquement élastique. La durée de vie de la pièce (Nombre de cycles nécessaires pour entraîner la rupture) est en général supérieure à 10^4 ou 10^5 cycles. [37]
- ✓ **Fatigue oligocyclique** : l'amplitude de contrainte est importante. Elle provoque à chaque cycle une déformation plastique. La durée de vie de la pièce est beaucoup plus courte ($N < 10^4$ cycles). [37]

III.4.1. Mécanismes de fatigue

On s'intéresse ici aux mécanismes de fatigue, et notamment à la propagation de fissure par fatigue. La rupture de pièce ou de structure par fatigue peut être divisée en trois stades [25] : l'amorçage, la propagation d'une fissure principale (ou de quelques fissures) et la rupture finale brutale.

L'amorçage se produit préférentiellement dans les zones où il y a concentration de contraintes : changement brusque de section ou de géométrie, inclusions ou défauts de surface. Toutefois, l'amorçage peut se produire dans les endroits parfaitement polis et ne présentant aucune zone de concentration de contrainte. Pour les matériaux cristallins ductiles, on constate que, à partir d'un certain nombre de cycles, des bandes de glissement persistantes apparaissent à l'endroit de localisation des déformations. L'observation de ces bandes révèle la formation d'extrusions et intrusions qui constituent des amorces de microfissures (Fig.3.13). Le stade d'amorçage se termine avec la formation d'une fissure principale, qui se propage selon le plan perpendiculaire à l'axe de la contrainte principale.

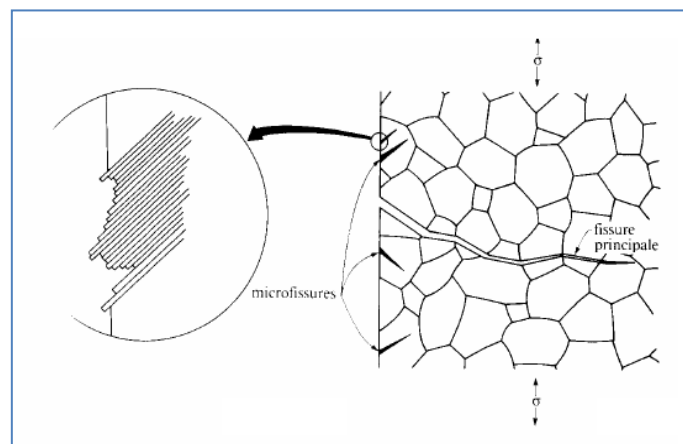


Figure 3.13. Amorçage de microfissures dû à la formation d'intrusions et extrusions [24.25]

Une fois qu'elle est formée, la fissure principale se propage à l'intérieur du matériau. Le stade de propagation commence. Notons que sous de fortes amplitudes de contraintes, la durée de propagation peut représenter jusqu'à 90% de la durée de vie totale. Notre attention sera fixée, en particulier, sur le stade de fissuration.

Lorsque le facteur d'intensité de contraintes atteint la valeur critique K_C de ténacité, on observe la rupture finale brutale du composant.

D'une façon générale nous pouvons expliciter une loi semi – théorique « loi de propagation de fissure » Si nous considère une structure contenant une fissure de longueur "a", et on suit le

comportement de cette fissure (la longueur en fonction du nombre de cycle appliqué N) pendant un essai de fissuration, sous un chargement à amplitude constant, on constate que cette croissance continue jusqu'à la rupture (figure 3.14).

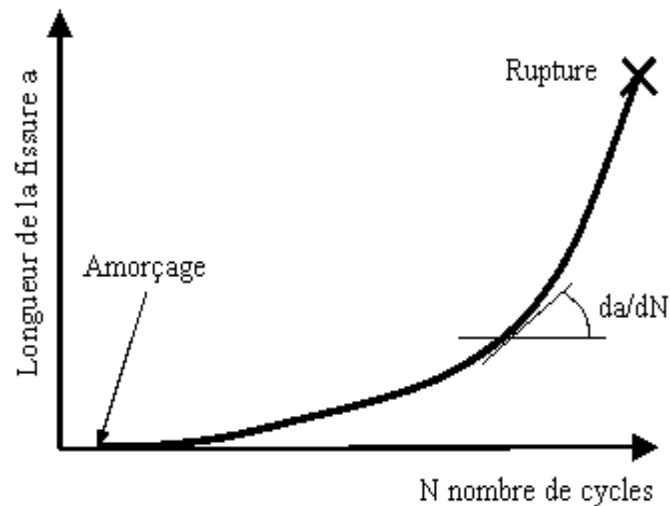


Figure 3.14. Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycle [46]

III.4.2. Caractérisation de la propagation de fissure

Les mécanismes de fatigue montrent qu'il faut bien souvent tenir compte non seulement de la possibilité d'amorçage de fissures, mais également évaluer leur propagation éventuelle, afin de s'assurer que les fissures n'atteignent pas la longueur critique qui entraînera inévitablement une rupture brutale de la pièce. Pour cela, il est nécessaire de disposer de données quantitatives caractérisant la vitesse de propagation d'une fissure de fatigue.

Dans les années 1960, Paris et al. [23]. Ont montré qu'il existe une relation entre la vitesse de fissuration (da/dN) et le facteur d'intensité de contraintes K . Puisque la valeur de la contrainte varie, on définit l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (3.20)$$

Où K_{\max} et K_{\min} sont les valeurs extrêmes de K pendant le cycle. En échelle bi-logarithmique, la vitesse de propagation (da/dN) en fonction de ΔK a l'allure donnée dans la Figure (3.15), sur laquelle on distingue trois régimes.

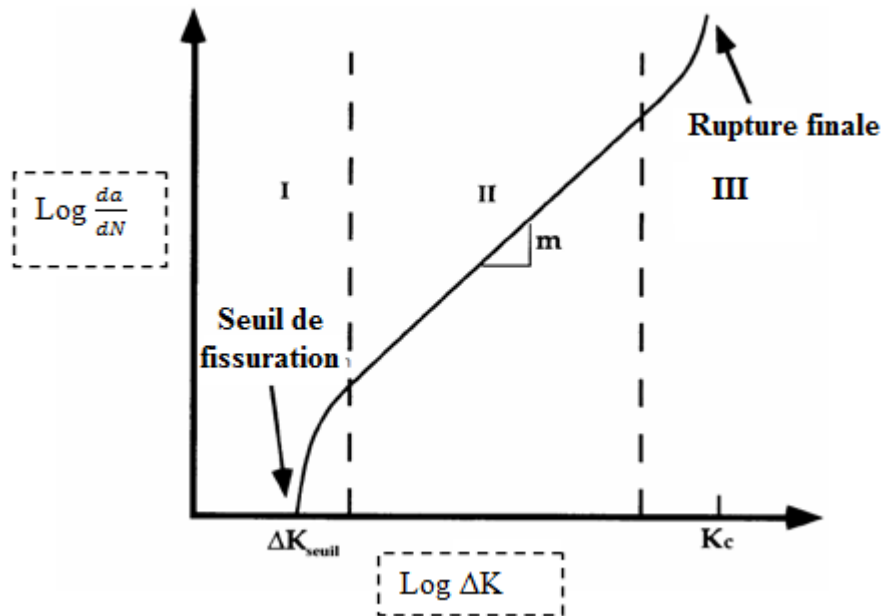


Figure 3.15. Régimes de propagation des fissures de fatigue [37]

- ✓ Le régime **I** est caractéristique du seuil de propagation. La vitesse de propagation tend vers zéro pour une valeur ΔK_{seuil} appelée seuil de propagation.
- ✓ Le régime **II**, appelé régime de Paris. Ce régime est caractérisé par l'accélération progressive de la vitesse de propagation lorsque ΔK augmente. Paris et al [23]. Ont relié la vitesse de propagation et l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes ΔK par une relation de type puissance, appelée lois de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3.21)$$

$$\text{Avec : } \Delta K = K_{max} - K_{min} = K_{max}(1 - R) \quad (3.22)$$

Où C et m sont des paramètres expérimentaux dépendant du matériau et des conditions d'essai (rapport de charge, environnement ...).

- ✓ Le régime **III** correspond à une accélération très rapide de la vitesse de fissuration. Le facteur d'intensité de contraintes est proche de la valeur critique $C K$ correspondant à la rupture finale.

Cependant, la loi de Paris n'est pas universellement applicable. Les travaux d'Elber [26] ont montré que le rôle de la fermeture doit être pris en compte pour décrire le comportement d'une fissure de fatigue. Ce phénomène consiste en la remise en contact des lèvres de la fissure lorsque la charge cyclique devient faible. La partie du cycle de chargement au cours de laquelle la fissure est fermée est considérée comme inopérante pour le mécanisme de propagation (Figure 3.16).

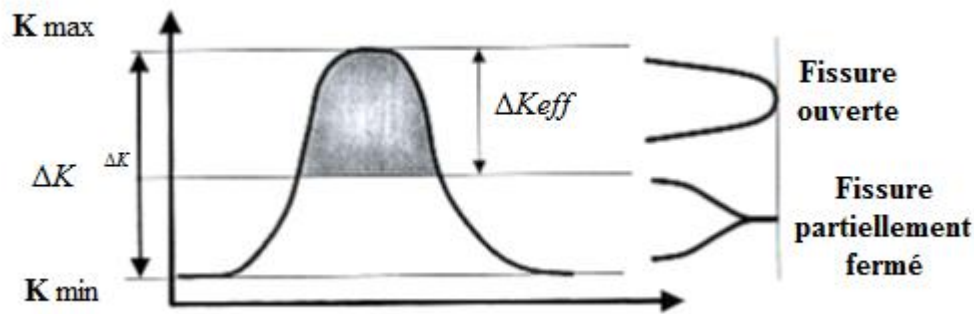


Figure 3.16. Phénomène de fermeture de la fissure [29]

L'effet de fermeture est attribué à trois effets distincts :

- ❖ La déformation résiduelle dans le sillage plastique de la fissure
- ❖ La rugosité des faciès de rupture
- ❖ L'oxydation des surfaces de rupture

Elber a donc proposé de définir une valeur effective du chargement avec une amplitude effective du facteur d'intensité de contrainte $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{ouv}$. Une correction de l'équation de Paris est alors introduite

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^m \quad (3.23)$$

III.4.3. Paramètres influant sur le comportement en fatigue

A. Paramètres d'ordre métallurgique

- ✓ Taille des grains

Les structures à grains fins présentent une meilleure tenue en fatigue que les structures à gros grains.

- ✓ Taux d'érouissage

L'érouissage résultant des opérations de formage a pour effet de consolider le matériau (augmentation de la limite d'élasticité), et par suite, améliore la tenue en fatigue.

- ✓ Traitement thermique

Suivant que le traitement thermique provoque un adoucissement ou un durcissement du matériau, la tenue en fatigue sera diminuée ou augmentée. De plus, le traitement thermique peut modifier la taille des grains.

✓ Défauts métallurgiques de l'alliage

Les défauts métallurgiques (lacunes, défauts interstitiels, précipités, inclusions) peuvent être à l'origine de l'endommagement par fatigue. Par incompatibilité des déformations, ils provoquent des concentrations de contrainte locales.

B. Paramètres d'ordre mécanique et géométrique

✓ Nature du chargement

Le chargement peut être monotone ou variable (spectre). Dans le cas des chargements monotones, les paramètres prépondérants sont :

- Rapport R (rapport entre la valeur minimale et la valeur maximale du chargement) : à contrainte maximale constante, si R augmente, la durée de vie augmente;
- Contrainte moyenne : à amplitude de chargement constante, si σ_{moy} augmente, la durée de vie diminue.
- La période du signal a peu d'influence sur la durée de vie. Cette règle est infirmée quand le phénomène de fatigue est associé à d'autres modes d'endommagement fonction du temps : fatigue-corrosion, fatigue-fluage...etc.
- Dans le cas des chargements variables, les paramètres prépondérants sont :
 - Présence de surcharges : la répétition périodique d'une surcharge peut retarder considérablement la propagation de fissures ;
 - Ordre d'apparition des cycles.
- Discontinuités géométriques (entailles, trous, etc.) : Un accident de forme augmente localement le niveau de contrainte. Cette augmentation peut être traduite par un coefficient de sur contrainte élastique K_t : rapport entre la contrainte locale maximale et la contrainte nominale. Dans le domaine

d'endurance limité (domaine visé par l'industrie aéronautique), si la valeur de K_t augmente, la durée de vie diminue

III.4.4. Modèles de prédiction de la durée de vie

L'évaluation de la vitesse de propagation des fissures et la prédiction de la durée de vie résiduelle en fatigue sont importantes pour la conception des structures et leur maintenance sous l'effet d'un chargement cyclique (phénomène de fatigue). Plusieurs contributions ont été menées dans le but de développer des modèles de propagations pour des chargements cycliques à amplitude constantes ou à amplitudes variables (phénomène de surcharge ou sous charge). La majorité des modèles proposés ne tient pas compte de tous les paramètres et conditions, et de la totalité de la courbe de propagation da/dN (figure 3.15). Les différents modèles proposés sont basés sur l'intégration de l'équation de la vitesse de propagation afin de prédire de la durée de vie en fatigue.

$$\text{Modèle de Paris} \quad \frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (3.24)$$

$$\text{Modèle de Walker} \quad \frac{da}{dN} = C_w \left[\frac{\Delta K}{(1-R)^{1-\gamma}} \right]^{m_w} \quad (3.25)$$

$$\text{Modèle de Forman} \quad \frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R) \cdot (K_C - K_{\max})} \quad (3.26)$$

$$\text{Modèle de NASGRO} \quad \frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{\max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (3.27)$$

Avec :

- Δk seuil de propagation
- C et m sont des constantes dépendant du matériau, des conditions de chargement et de l'environnement.
- K_C est la ténacité du matériau fonction de l'épaisseur considérée
- C, n, p, q sont des paramètres empiriques

- K_{max} et K_{crit} sont respectivement le facteur d'intensité de contrainte maximale et le facteur d'intensité de contrainte critique.
- f représente la contribution de la fermeture de la fissure

III.5. Comportement En Fatigue Des Aciers Pipelines

La prédiction du comportement en fatigue dépend de plusieurs paramètres d'effets. Les paramètres liés au chargement appliqués (rapport de charge, amplitude de chargement). Pour les pipelines, la variation du rapport de charge est liée à la variation de la pression de service. L'environnement caractérisé par la présence d'hydrogène ou l'azote ainsi que la température affecte fortement les vitesses de fissuration de tels aciers utilisés pour pipelines. Vu le développement des aciers pour pipelines, plusieurs études ont été axées sur le comportement en fatigue tenant compte des conditions de services amenés à l'échelle laboratoire

L'état de l'art mené par sur le comportement de fissuration par fatigue des aciers pipelines X42 et X70 à un rapport de charge fixe ($R=0.1$) sous environnement hydrogène et azote a montré que la vitesse de fissuration pour l'acier API 5L X42 est supérieur à celle de l'acier API 5L X70. La présence de l'hydrogène présente un endommagement important comparativement par rapport à l'azote. La fissuration examinée sous le même type d'environnement (H_2 ou N_2) (Figure 3.18) est plus élevée que l'acier API 5L X70 à cause de la composition chimique, la taille des grains. [44].

L'effet d'un environnement acide sur la fissuration de l'acier API 5L X52 a été investigué par la société NIST [41]. Sous un environnement acide (APB : Acide producing bacteria). Les mêmes essais menés sur l'acier API 5L X70 montre une diminution de la vitesse de fissuration. A l'air libre, la vitesse finale de fissuration est de l'ordre de 1.10^{-6} m/cycles ; par contre pour l'acier X52, la vitesse est de l'ordre de 3.10^{-6} m/cycle équivalent à une amplitude du facteur d'intensité de contrainte de 70 MPa ($m^{1/2}$).

L'investigation menée par Neves [42] [44] a montré que la vitesse de fissuration de l'acier API 5L X65 est affectée par le sens d'orientation de la fissure (figure 3.19). Les paramètres du modèle de propagation ont été déterminés selon la loi de Paris et montre que le sens T-S présente une bonne résistance à la fissuration par fatigue par rapport au sens T-L.

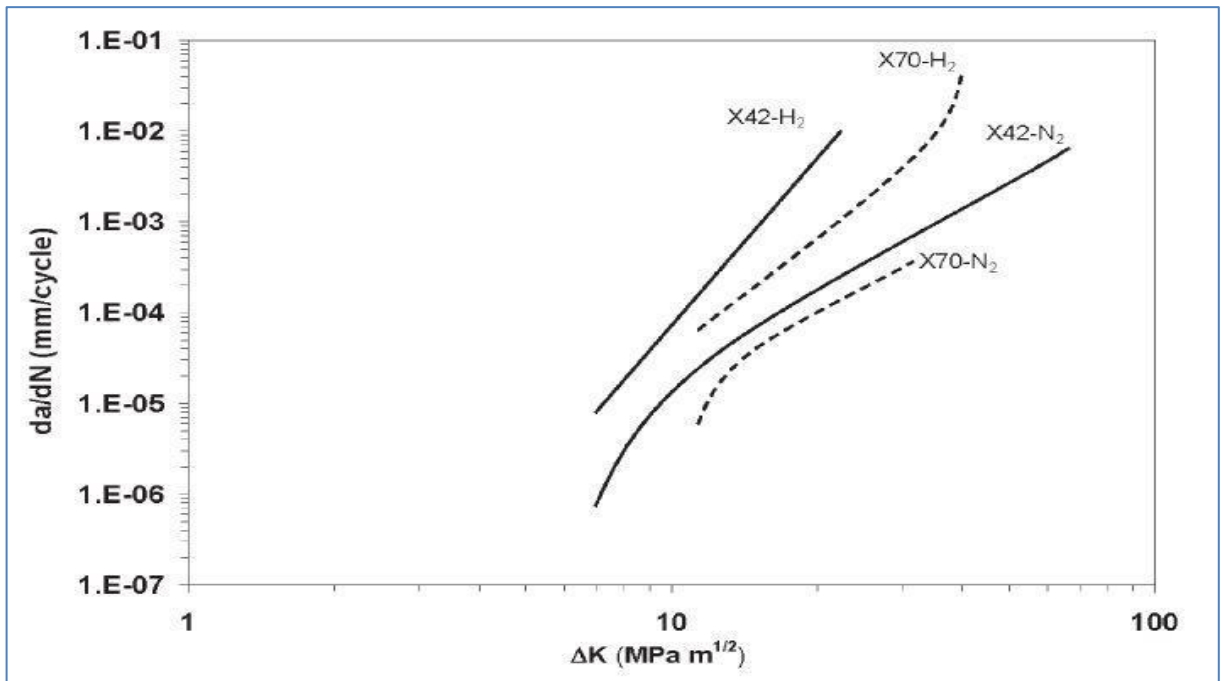


Figure 3.17. Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour l'acier X42, et X70 [41]

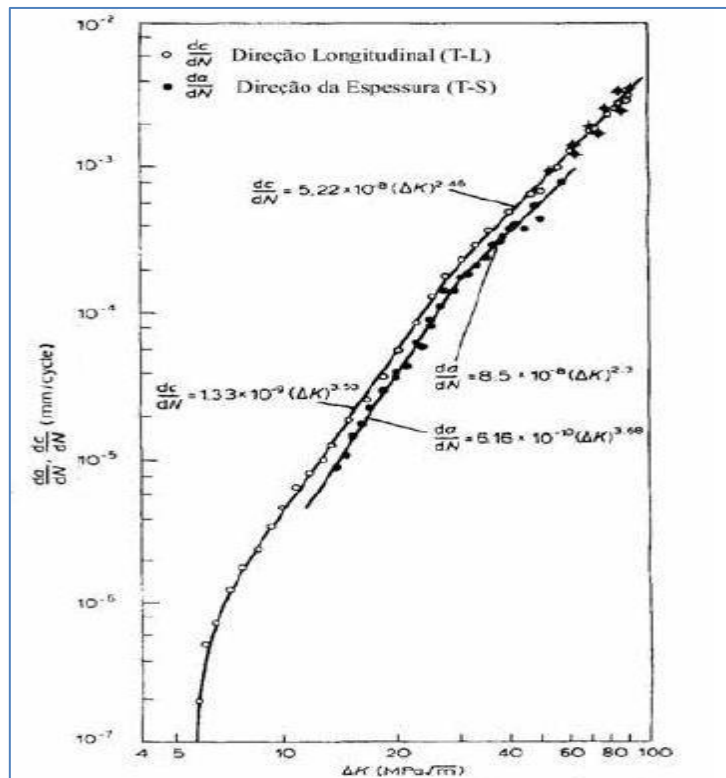


Figure 3.18. Effet de l'orientation des fissures sur la vitesse de fissuration de l'acier API 5L X65 (Sens T-L et T-S) [42]

La caractérisation de fissuration par fatigue de l'acier X65 dans le métal de base (BM), la zone affectée thermiquement (ZAT) et la zone soudée a été étudiée par Kim [43] [44]. Les

propriétés mécaniques du métal de la zone soudé sont supérieures à celles du métal de base. La vitesse de fissuration et le facteur d'intensité de contrainte seuil de l'acier X65 (métal de base) dans la direction TL ne sont pas sensible aux effets du rapport de charge par contre pour la vitesse de fissuration dans le métal soudé, elle augmente avec l'augmentation du rapport de charge aux faible valeurs de ΔK (figure 3.20). Cet effet diminue avec l'augmentation de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte ΔK .

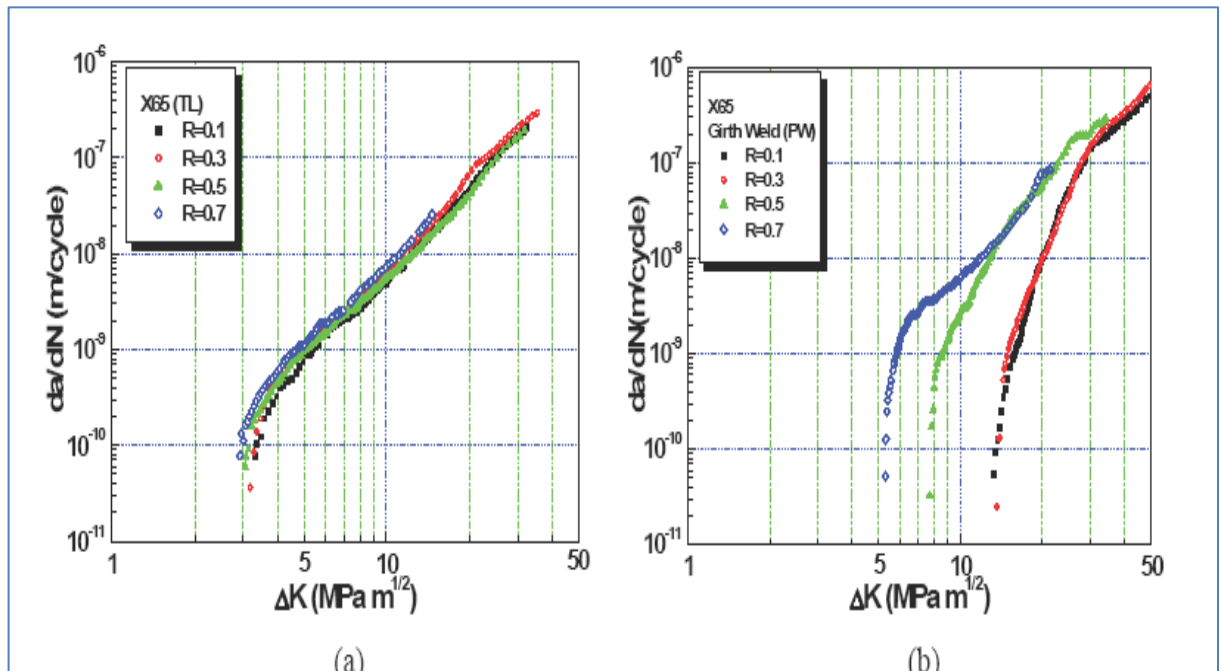


Figure 3.19. Vitesse de fissuration (a) l'acier pour pipeline dans le sens TL (b) zone de fusion sous l'effet du rapport de charge [43] [44].

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une recherche bibliographie sur la mécanique de la rupture et les différentes équations de déformation et contrainte ainsi les milieux fissuré puis on a étudié la propagation d'une fissure et le comportement en fatigue des aciers pour pipeline.

Vu la variabilité des paramètres affectant la fissuration par fatigue (chargement, contraintes résiduelles, environnement nocive...) et les nuances des matériaux utilisés pour pipelines mises en service, ce qui nous a amené à prédire le comportement en fissuration par fatigue supposant la présence de défauts et environnement spécifiques.

Dans le chapitre suivant on va présenter une méthodologie pour calculer la vitesse de la fissuration par fatigue et la durée de vie des aciers pour pipelines par un code de calcul sur internet qui nommé **eFatigue**.

CHAPITRE VI

SIMULATION DE LA

FISSURATION

&

RESULTATS ET

DISCUSSION

Ce chapitre est divisé en deux parties. Une première partie a été réservée à la présentation du code numérique qui on a choisi pour les calculs de la durée de vie en fatigue des différents grades API 5L (X65, X70) des aciers pour pipelines. La deuxième partie a été axée sur les résultats obtenus et la discussion de la fissuration par fatigue.

IV.1. Simulation De La Propagation Des Fissures Par Fatigue

IV.1.1. Introduction

La complexité des problèmes de mécanique a poussé les ingénieurs à penser à concevoir des programmes informatiques de plus en plus puissants et rapide, pour répondre à leurs besoins, qui ne cessent de se développer et aux problèmes qui s'impose de jour en jour. Pour mener notre étude par simulation numérique, on a utilisé le code numérique «eFatigue», qui est l'un des nouveaux codes de calcul du comportement en fatigue des aciers API où les effets des paramètres de chargement sont étudiés.

IV.1.2. Présentation Du Code

Le code qui on a utilisé pour la simulation de la propagation des fissures par fatigue nommé **eFatigue**, est un logiciel anglais expérimenté permet à résoudre les problèmes liés à la fatigue et de la durabilité, donne un accès facile et gratuit à la technologie moderne à travers l'utilisation de la modèle de **PARIS** afin de prédire la durée de vie résiduelle en fatigue

Ce logiciel basé sur le Web permettant faire une évaluation de la fatigue d'une structure ou d'un composant et d'étudier la propagation des fissures de fatigue et la prévision de la durée de vie ainsi peuvent aider à la résolution de tous les systèmes basé sur modèles éléments finis, histoires de chargement d'amplitude variable, haute température, structures soudées, multiaxial, fonte.

Pour entrer à la fenêtre du code **eFatigue** il faut passer par l'outil Internet Explorer ou Mozilla, et sur la barre des liens tapez **www.eFatigue.com**. (Figure 4.1)

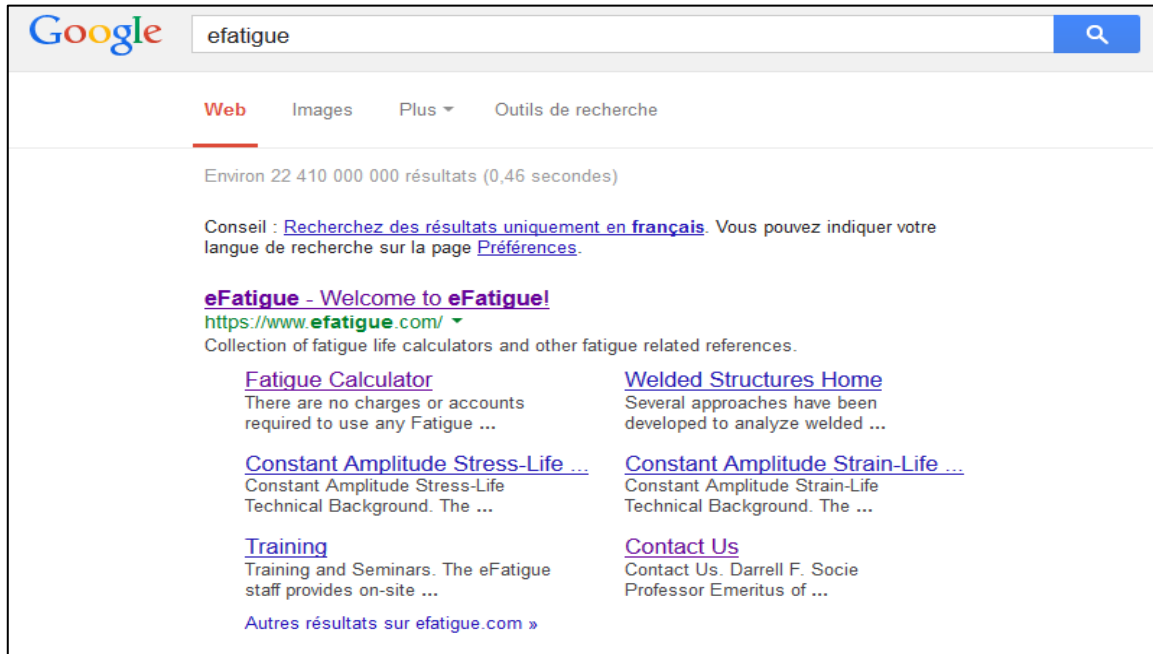


Figure 4.1. Le site eFatigue

Après de choisir l'entrée du code, on passe à la fenêtre principale (Figure 4.2)

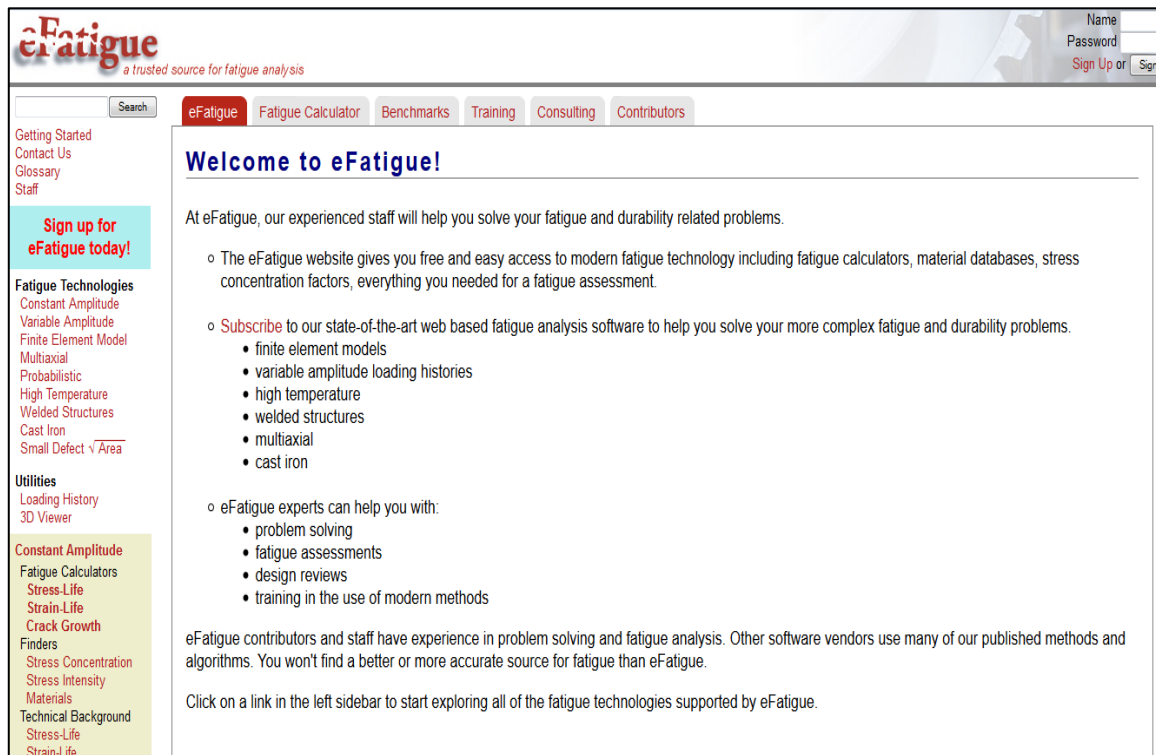


Figure 4.2. La fenêtre du code eFatigue

Le site est divisé en un certain nombre de technologies de fatigue figurant dans la barre latérale gauche. Celles-ci sont regroupées par types de problèmes en cours d'analyse.

Commencez par sélectionner une technologie de fatigue dans la barre latérale gauche. Amplitude constante est un bon endroit pour commencer. (Figure 4.3)

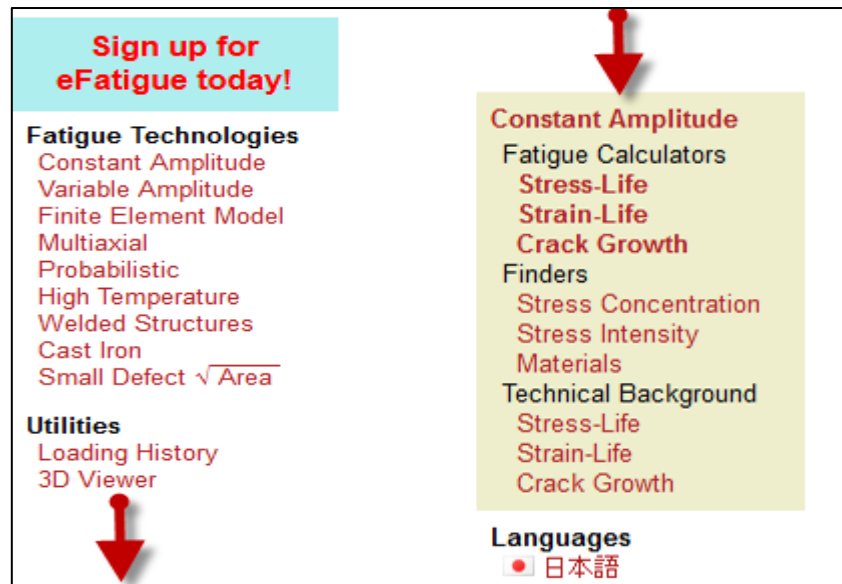


Figure 4.3. Barre latérale gauche pour choisir les types d'analyses

Chaque technologie est organisée en grandes sections:

- Calculatrices de la fatigue et l'analyse des calculs de la fatigue.
- Finder vous aider à obtenir les données d'entrée nécessaires, y compris les facteurs de concentration des contraintes et une base de données des propriétés des matériaux standards.
- Contexte technique décrit toutes les étapes et les équations utilisées dans les calculs.

Ce que nous intéressent, c'est la barre **Fatigue Calculators** (calculatrices de la fatigue), elle est comprendre également un certain nombre de problèmes de référence documentés contenant toutes les informations nécessaires à l'analyse de fatigue. Là, on le peut utiliser pour calculer les vies fatigue et comparer ensuite les résultats de nos analyses avec les expériences. On choisit sur cette fenêtre la barre **Crack Growth** (propagation de fissure) (figure 4.4)

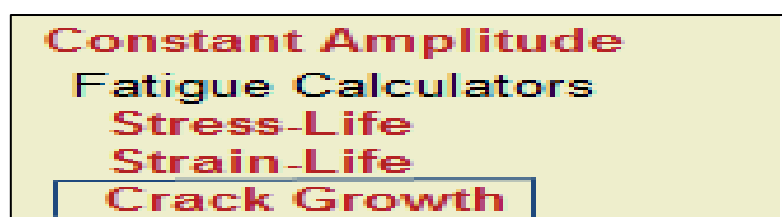


Figure 4.4. Calculatrice de la fatigue

On obtient une autre fenêtre qui nous permettent de choisir automatiquement les conditions des matériaux tels que : le choix de type, les contraintes, la longueur de fissure. (Figure 4.5)

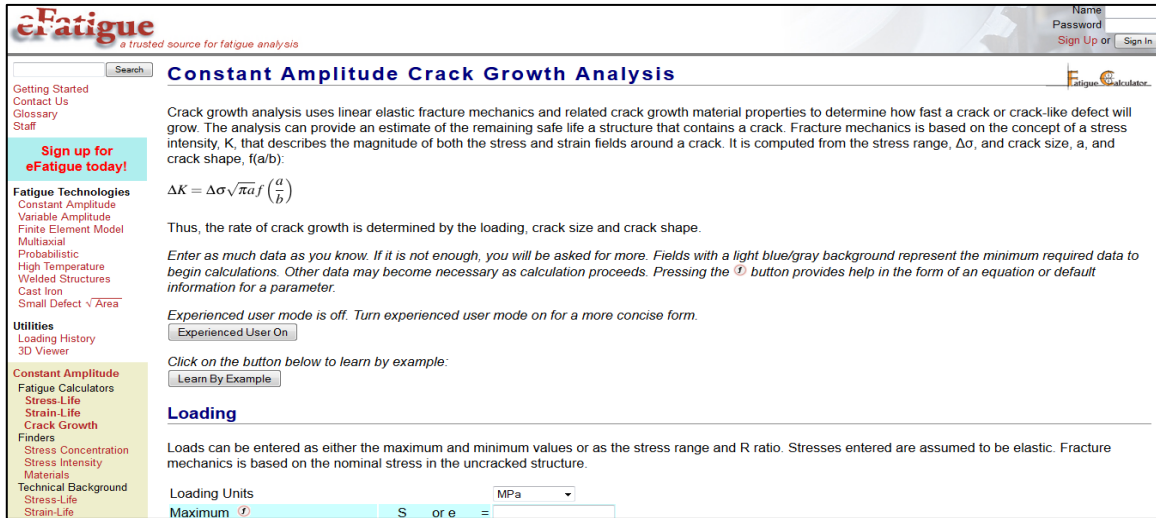


Figure 4.5. L'analyse de propagation de fissure à amplitude constante

Entrer les valeurs des contraintes S_{max} et S_{min} (σ maximal et minimal) et le rapport de charge R (Figure 4.6)

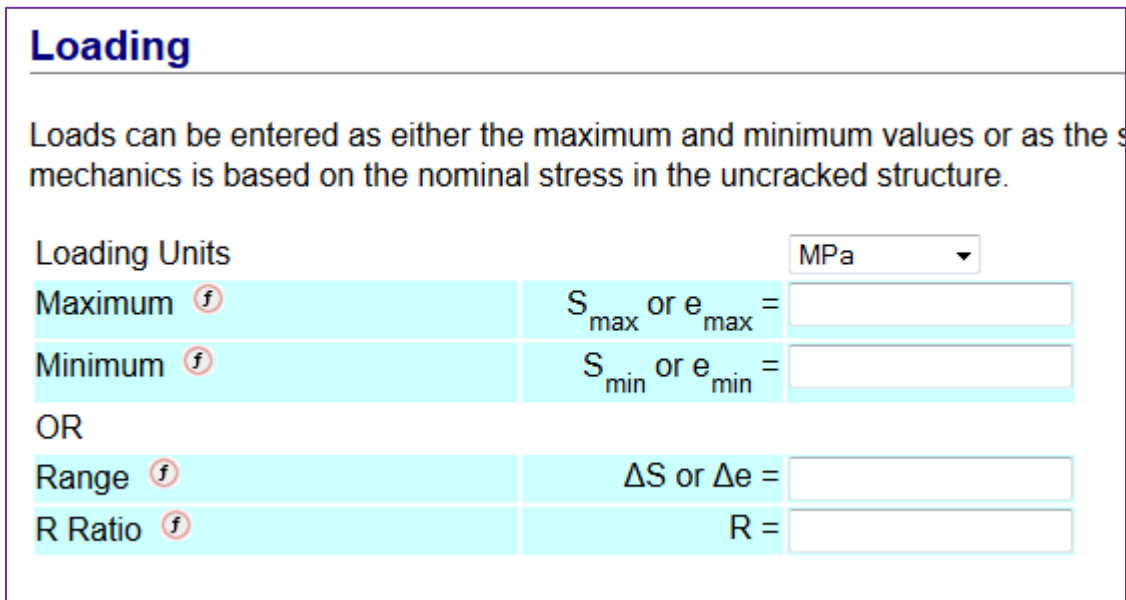


Figure 4.6. Les paramètres du chargement

Choisir le type du matériau et les valeurs des constantes C et m puis module du Young E (Figure 4.7)

MATERIAL

Name

Type

Crack Growth Intercept	C =	<input type="text"/>	m/cycle
Crack Growth Exponent	m =	<input type="text"/>	
Crack Growth R Ratio	R_{mat} =	<input type="text"/>	
Threshold Stress Intensity	ΔK_{TH} =	<input type="text"/>	MPa sqrt(m)
Elastic Modulus	E =	<input type="text"/>	MPa

Figure 4.7. Caractéristiques des matériaux

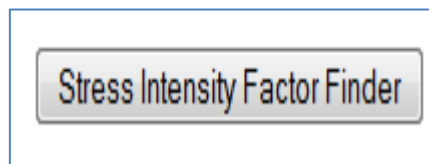
Choisir la longueur de la fissure initiale et finale (Figure 4.8)

Crack Type

Crack Size	Initial =	<input type="text"/>	m
	Final =	<input type="text"/>	m
Stress Intensity Factor	F(a) =	<input type="text"/>	remove
		<input type="text"/>	remove
		<input type="text"/>	remove

Figure 4.8. Facteur d'intensité de contrainte

Sur la barre « **Stress Intensity Factor Finder** » on va choisir la géométrie du matériau (Figure 4.9).



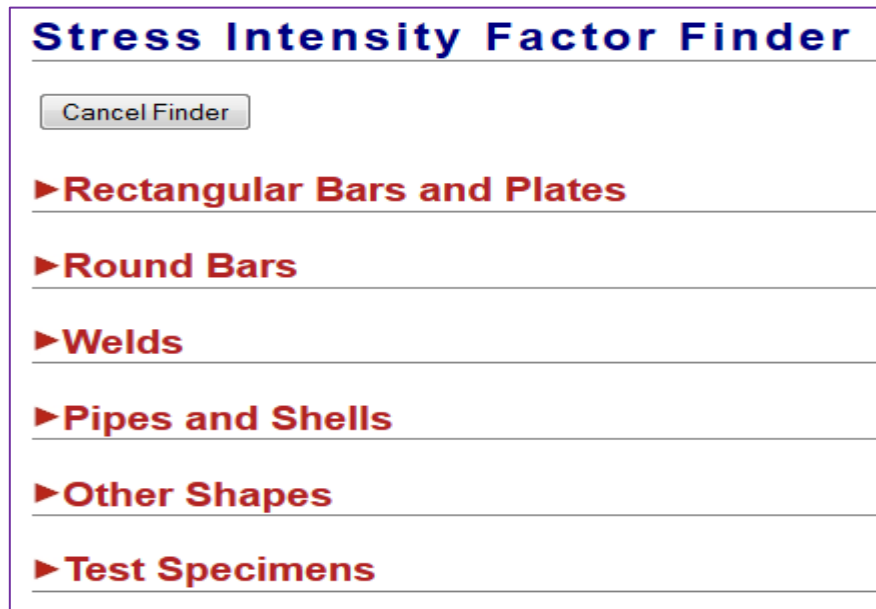


Figure 4.9. La géométrie du matériau

Cliquer sur :



On aura :

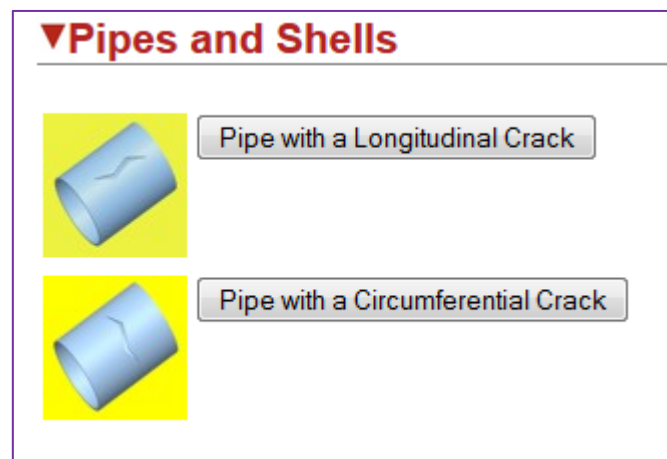


Figure 4.10. Le choix de pipeline

On choisit “**Pipe with a longitudinal Crack**” pour une fissure longitudinale, on aura (Figure 4.11) :

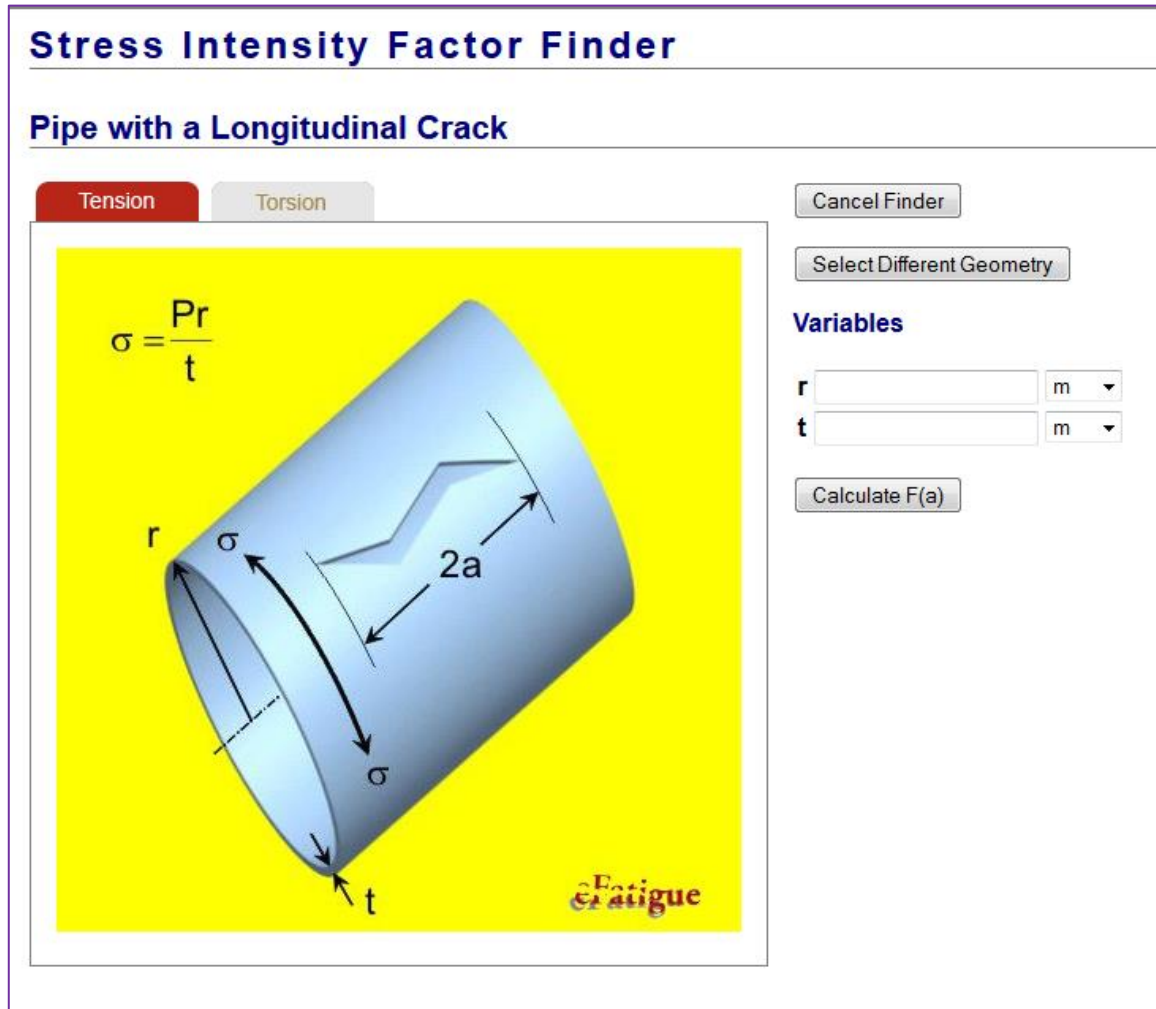


Figure 4.11. Pipeline à une fissure longitudinale

Sur la barre droite de la figure (4.10) choisir la valeur du rayon et l'épaisseur du pipeline puis cliquer sur **calculate F(a)** (calculer F(a)) (Figure 4.11)

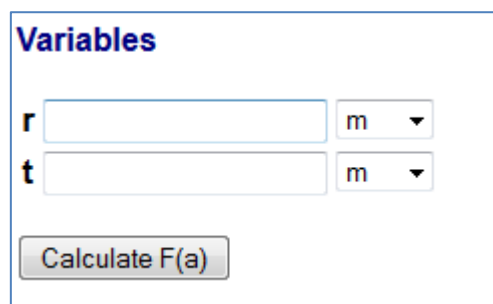


Figure 4.12. Les variables géométriques du composant

Automatiquement on obtient les résultats du F(a) (fonction d'intensité de contrainte) (Figure 4.12).

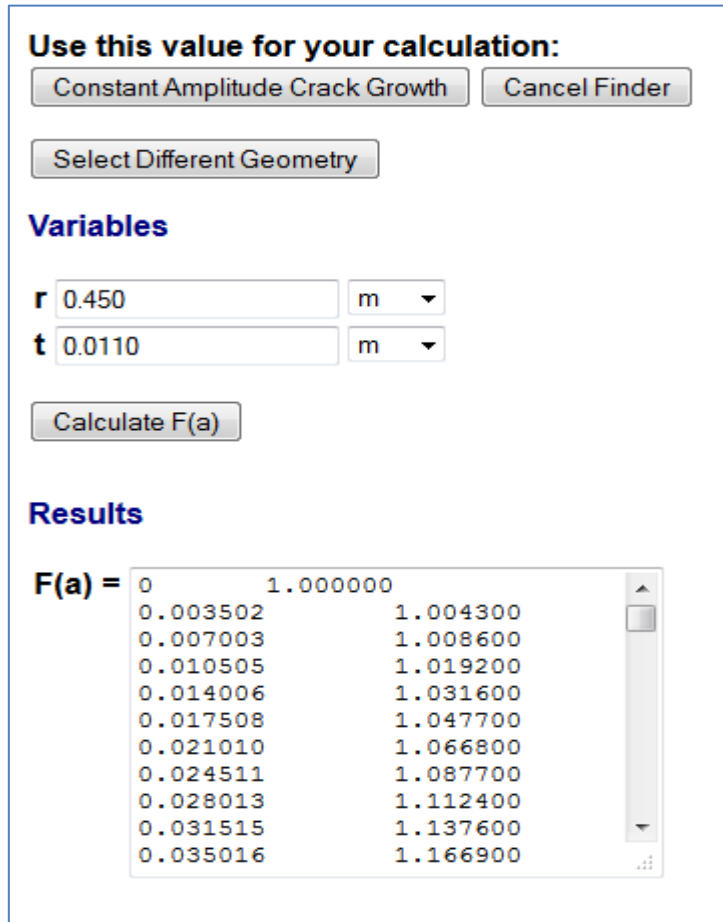


Figure 4.13. Les résultats de la fonction d'intensité de contrainte

Les résultats du F(a) illustré graphiquement sur la figure (4.13) aussi automatiquement

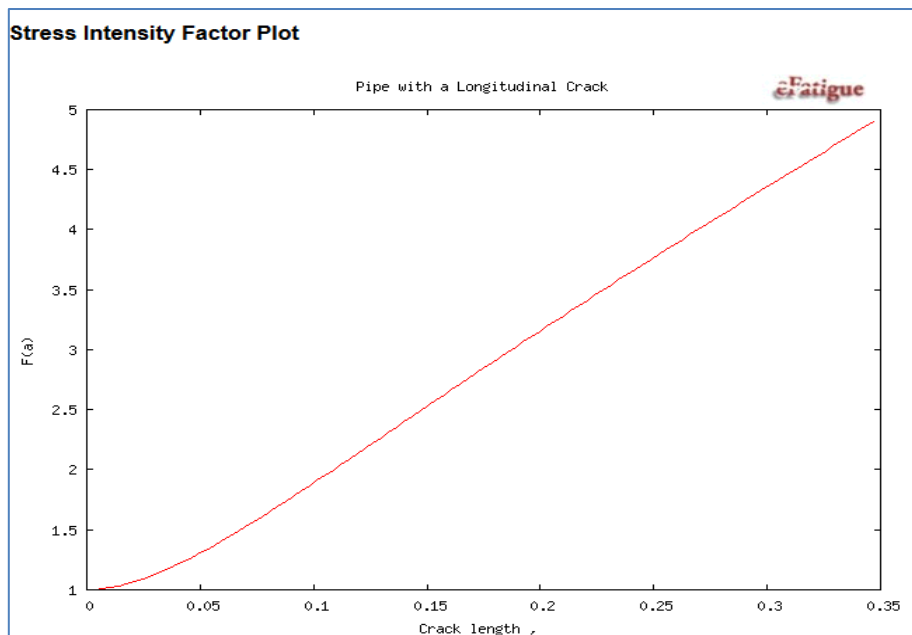


Figure 4.14. Résultat graphiquement

Puis on clique sur la barre **Constant Amplitude Crack Growth** pour valider le choix des variables (Figure 4.14).

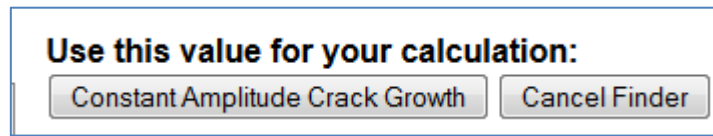


Figure 4.15. La validation des variables de la géométrie

Juste après la cliquer sur la barre précédente (Figure 4.14), le code revient sur la fenêtre du calcul de fatigue (Figure 4.5) automatiquement. Dans cela on voit une barre de calcul en bas, on clique sur (**Calculate Life**) pour calculer la durée de vie en fatigue des aciers (Fig. 4.15).

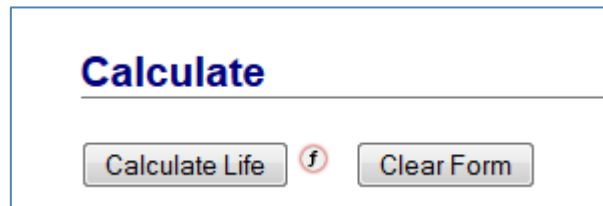


Figure 4.16. La barre du calcul finale

On obtient des résultats graphiquement et analytiquement (Figure 4.16).

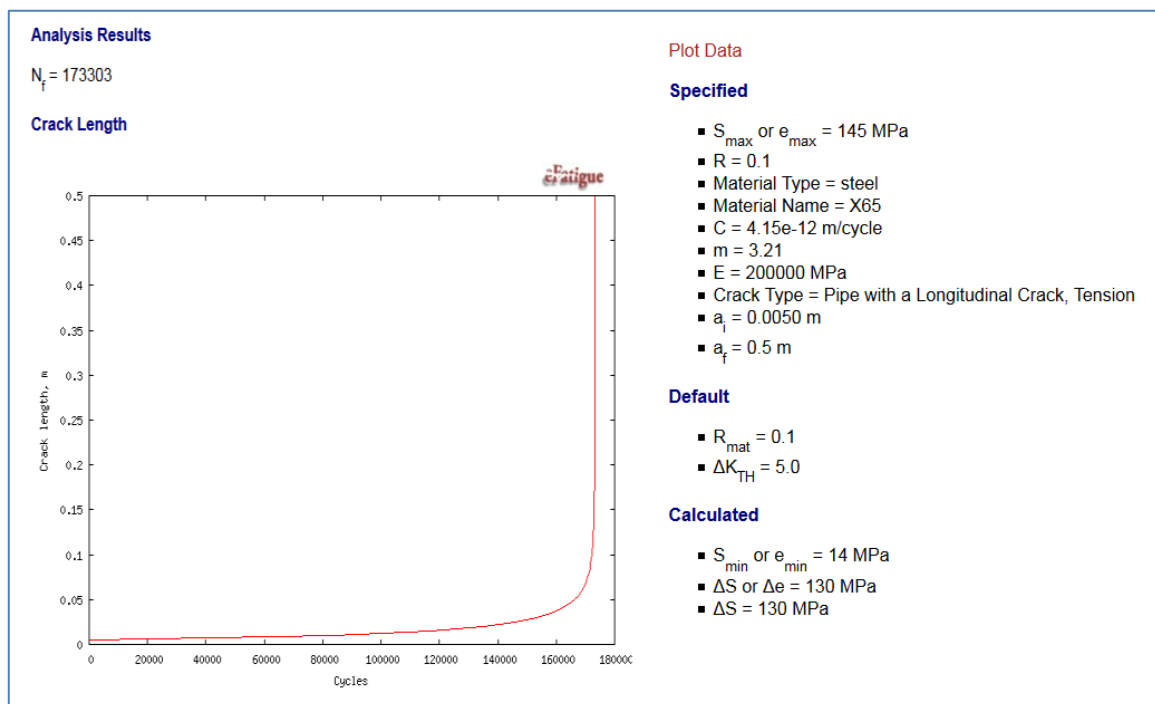


Figure 4.17. Résultats finale de l'étude

Et pour importer les résultats analytiquement à **EXCEL** pour tracer les courbes de la durée de vie en même graphe il y a la barre **Plot Data** en rouge (Figure 4.17), on le clique et on aura les résultats

Plot Data

Length	Cycles
0.00500	0.00000e+00
0.00995	8.35566e+04
0.01490	1.16967e+05
0.01985	1.34966e+05
0.02480	1.45989e+05
0.02975	1.53232e+05
0.03470	1.58215e+05
0.03965	1.61748e+05
0.04460	1.64314e+05
0.04955	1.66215e+05
0.05450	1.67645e+05
0.05945	1.68736e+05
0.06440	1.69579e+05
0.06935	1.70238e+05
0.07430	1.70758e+05
0.07925	1.71173e+05
0.08420	1.71507e+05
0.08915	1.71777e+05
0.09410	1.71999e+05
0.09905	1.72181e+05
0.10400	1.72333e+05
0.10895	1.72459e+05
0.11390	1.72565e+05
0.11885	1.72655e+05
0.12380	1.72732e+05
0.12875	1.72797e+05
0.13370	1.72853e+05
0.13865	1.72902e+05
0.14360	1.72944e+05
0.14855	1.72980e+05
0.15350	1.73012e+05
0.15845	1.73040e+05
0.16340	1.73065e+05
0.16835	1.73087e+05
0.17330	1.73106e+05
0.17825	1.73124e+05
0.18320	1.73139e+05
0.18815	1.73153e+05
0.19310	1.73165e+05
0.19805	1.73176e+05
0.20300	1.73186e+05
0.20795	1.73195e+05

Figure 4.18. Les résultats détaillés

Les résultats sont sous forme graphique de l'évolution de la longueur de la fissure $a=f(N)$.

Et ici le travail avec le code **eFatigue** est terminé.

IV.1.3. Modèle de paris

La plupart des applications actuelles des concepts de la mécanique linéaire de la rupture élastique pour décrire le comportement de fissure sont associées à la région II (figure 2.8). Le modèle de Paris [12] décrit par l'équation (4.1), représente la première application de la mécanique de la rupture à la fatigue. L'utilisation de la loi de Paris est limitée par son utilisation que dans la région II (propagation stable) et ne peut décrire les régions (I) et (III).

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (4.1)$$

L'analyse de la croissance des fissures requiert une courbe de croissance de la fissure pour le matériau (Figure 4.18). La partie linéaire de la courbe représente la croissance de la fissure stable et se caractérise par une interception C, et de la pente m. L'intensité de la contrainte

seuil ΔK_{TH} , représente une intensité de contrainte en dessous duquel les fissures ne se développeront pas. Ceci est analogue à la limite de fatigue dans l'analyse de fatigue traditionnelle.

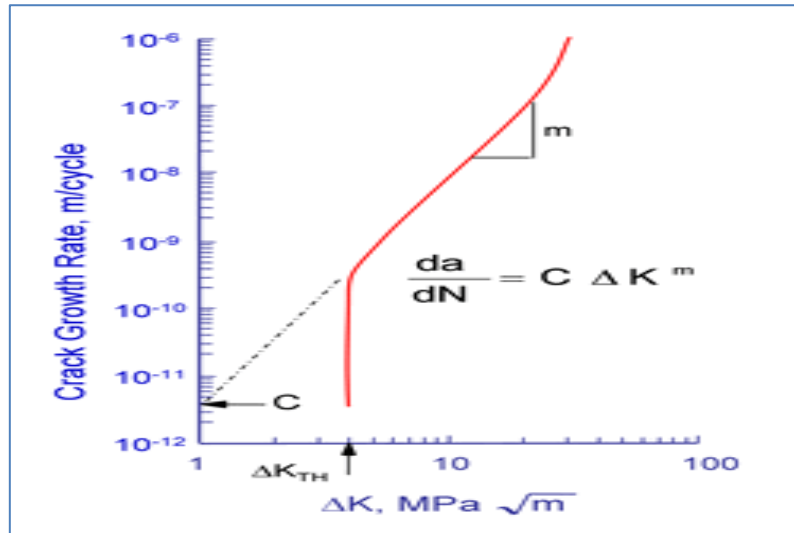


Figure 4.19. Modèle de Paris [45]

IV.1.4. Matériaux D'étude

La présente étude est menée sur des aciers API 5L utilisés pour pipelines. Les propriétés mécaniques de ces matériaux étudiées sont reportées sur le tableau 4.1.

Tableau 4.1. Caractéristiques mécaniques des aciers API 5L [44]

Acier API 5L	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_R (MPa)
X65	200	500	600
X70	206	527.7	672

On prend un exemple de l'acier API 5L X 65 et on fait la simulation sur le code **eFatigue**

On calcul les contraintes maximale et minimales par l'équation suivant

$$\sigma_{\theta} = \frac{Pr}{2e} \quad (4.2)$$

Avec : **P** : pression, **r** : rayon du tube, **e** : épaisseur

La pression maximale de l'acier X65 c'est 7 MPa et **P** minimale c'est 4 MPa

On prend **r** égales à 0.450 m et **e** égale à 0.011 m

On obtient
$$\sigma_{max} = \frac{7 \cdot 0.450}{2 \cdot 0.011} \tag{4.3}$$

$$\sigma_{max} = 145 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = \frac{4 \cdot 0.450}{2 \cdot 0.011} \tag{4.4}$$

$$\sigma_{min} = 80 \text{ MPa}$$

Les étapes d'entrée des valeurs caractéristiques de l'acier API 5L X65 sont illustrées sur les figures (4.18 et 4.19) :

Loading Units		MPa
Maximum f	S_{max} or e_{max} =	145
Minimum f	S_{min} or e_{min} =	
OR		
Range f	ΔS or Δe =	
R Ratio f	R =	0.1

Figure 4.20. Les paramètres du chargement de l'acier API 5L X65

Tension | Torsion

Cancel Finder

Select Different Geometry

Variables

r 0.45 m

t 0.011 m

Calculate F(a)

Results

F(a) = 0 1.000000

0.003502	1.004300
0.007003	1.008600
0.010505	1.012900
0.014006	1.017200
0.017508	1.021500
0.021010	1.025800
0.024511	1.030100
0.028013	1.034400
0.031515	1.038700
0.035016	1.043000

Figure 4.21. Les variables géométriques de l'acier API 5L X65

On prend les valeurs des constantes C et m et module de Young E tel que (figure 4.20) :

$$C=4.15^E-12 \text{ m/cycle}$$

$$m=3.21 \text{ m/cycle}$$

$$E=200000 \text{ MPa}$$

Name	X65	
Type	steel	
Crack Growth Intercept f	C =	4.15e-12 m/cycle
Crack Growth Exponent	m =	3.21
Crack Growth R Ratio	R_{mat} =	
Threshold Stress Intensity	ΔK_{TH} =	MPa sqrt(m)
Elastic Modulus f	E =	200000 MPa

Figure 4.22. Caractéristiques de l'acier API 5L X65

On choisit la géométrie du matériau (pipeline avec une fissure longitudinale, tension) et la valeur initiale et final de la fissure (Figure 4.21)

Stress Intensity Factor Finder

Crack Type: Pipe with a Longitudinal Crack, Tension

Crack Size: Initial = 0.0050 m, Final = 0.5 m

Stress Intensity Factor F(a) =

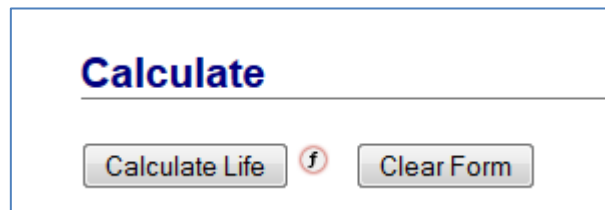
0	1.000000
0.003502	1.004300
0.007003	1.008600
0.010505	1.019200
0.014006	1.031600
0.017508	1.047700
0.021010	1.066800
0.024511	1.087700
0.028013	1.112400
0.031515	1.137600
0.035016	1.166900

Paste tab or comma delimited text data

Use Multiple Boxes Input Method

Figure 4.23. Le choix de la longueur initial et finale de la fissure pour l'acier API 5L X65

Puis on calcule la durée de vie en fatigue du l'acier API 5L X65



On faire la même procédure pour l'acier de grade API5L X70.

IV.2. Résultats Et Discussion

IV.2.1. Introduction

Dans cette partie on va présenter les différents résultats relatifs pour la fissuration par fatigue de deux aciers de grades API 5 L (X65, X70). Le comportement en fissuration par fatigue dépend d'un certains nombres de paramètres ; les paramètres de chargement, paramètres d'environnement et paramètres métallurgiques. La pression maximale d'acheminement des produits est fonction de la nature du grade d'acier API utilisé s'étalent de 40 à 100 bars. Deux effets de chargement sont considérer à cette étude :

- L'effet de chargement caractérisé par la variation du rapport de charge.
- L'effet de chargement caractérisé par la variation l'amplitude de chargement.

IV.2.2. Effet Du Rapport De Charge R

La figure (4.23) montre L'effet du rapport de charge « R » sur la durée de vie en fatigue. Sous un chargement maximal constant ($\sigma_{\max}=145 \text{ MPa}$), et pour des rapports de charges varié de 0.1 à 0.5, on remarque que l'augmentation du rapport de charge a fait augmenter la durée de vie.

On dit que la variation de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles pour différents rapports de charges de l'acier pour pipeline **API 5L X65** est une relation proportionnelle.

Pour une même longueur de fissure ($a=0.3$ m), la durée de vie est passé de 1.33×10^5 cycles à $R=0.1$ et 3.1×10^5 à $R=0.3$ ce qui montre que la durée de vie augmente d'environ 2 fois.

Et lorsqu'on passe à $R=0.5$ la durée de vie est passée 9.05×10^5 cycle donc le taux d'augmentation en durée de vie est d'environ 8 fois du $R=0.1$ à $R=0.5$.

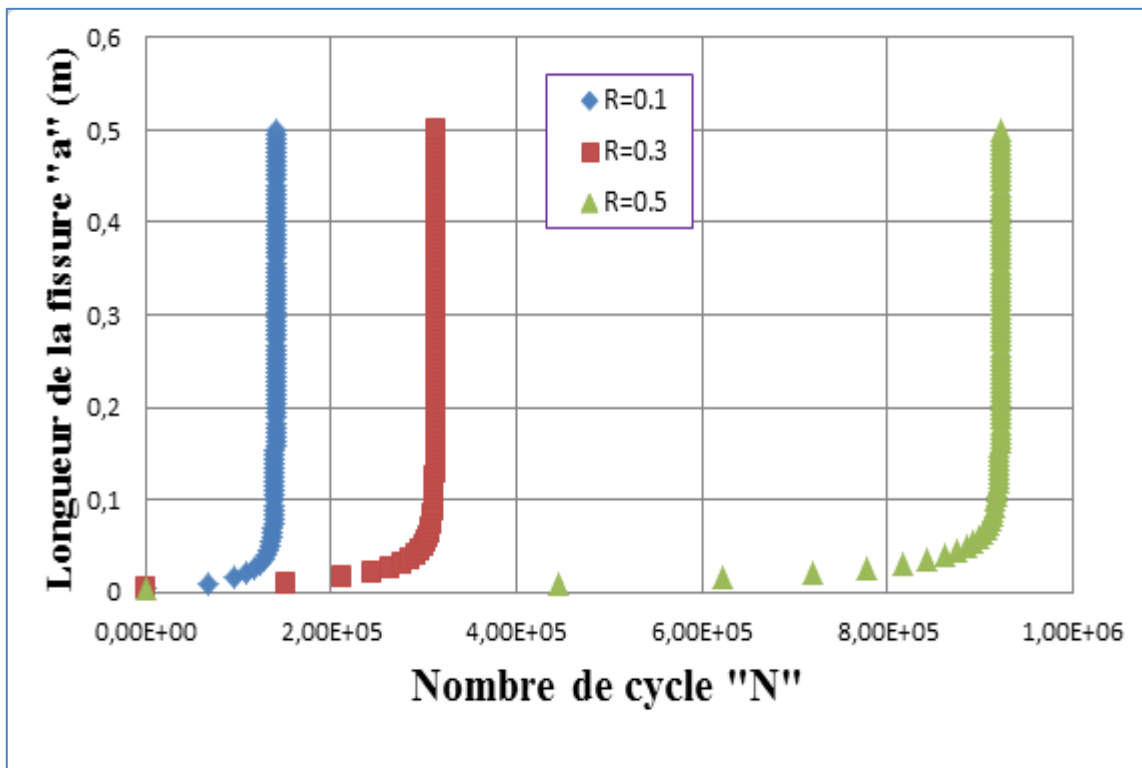


Figure 4.24. Effet du rapport de charge sur la durée de vie de l'acier pour pipeline en API 5L X65

Sur le deuxième pipeline d'acier API 5L X70 on voit une énormément de durée de vie entre rapport de charge varie de 0.1 à 0.5.

Par exemple à la même longueur de fissuration ($a=0.3$ m), à $R=0.1$ la durée de vie est de l'ordre de 1.9×10^5 cycles, et à $R=0.5$ la durée de vie est de 11.2×10^5 cycles ce qui engendre un taux d'augmentation qu'en durée de vie de 10 fois.

On voit aussi à $R=0.2$ que la durée de vie approche à 2.7×10^5 ce qui produit un taux d'augmentation en durée de vie d'une fois par rapport à $R=0.1$. (Figure 4.24).

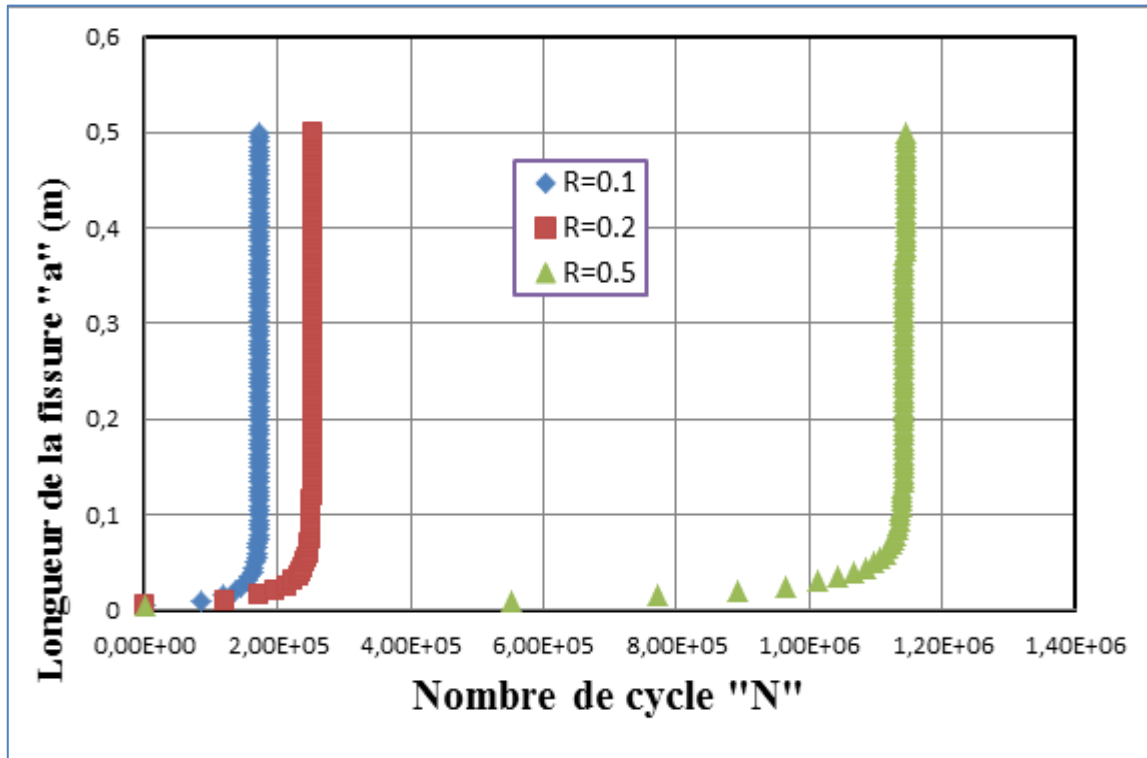


Figure 4.25. Effet du rapport de charge sur la durée de vie de l'acier pour pipeline en API 5L X70

L'analyse des courbes des durées de vie pour des deux aciers (X65 et X70) à même rapport de charge, montrent que la durée de vie résiduelle pour l'acier X70 est supérieure à celui de l'acier X65. A un rapport de charge $R=0.1$, la durée de vie résiduelle pour l'acier X65 est de 13.3×10^4 cycles par contre celle de l'acier X70 est de 19×10^4 cycles.

À un même rapport de charge ($R=0.5$), l'acier API 5L X70 présente une meilleure résistance à la fissuration par fatigue comparativement par rapport à l'acier X65.

Donc on dit que lorsque le rapport de charge augmente, la durée de vie de l'acier pour pipeline aussi augmente

IV.2.3. Effet De L'amplitude De Chargement

La fissuration à amplitude constante pour différents niveaux de chargement à rapport de charge R constant est étudiée où l'amplitude de chargement maximale est variable pour les aciers API 5L (X65 et X70). L'amplitude de chargement cyclique maximale (σ_{max}) varie de 80 MPa à 145MPa.

L'effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue est montré par les figures (4.26, 4.27) respectivement pour les aciers API 5L de grades X65 et X70 pour un rapport de charge constant $R=0.1$.

L'augmentation de l'amplitude du chargement a fait diminuer le nombre de cycle à la rupture. On remarque qu'à une même longueur de fissure ($a=0.3\text{m}$), la durée de vie pour l'acier X65 est passé de 1.4×10^5 cycles à 8×10^5 cycles respectivement pour des chargements maximaux σ_{max} variant de 80 MPa à 145 MPa. (Figure 4.26).

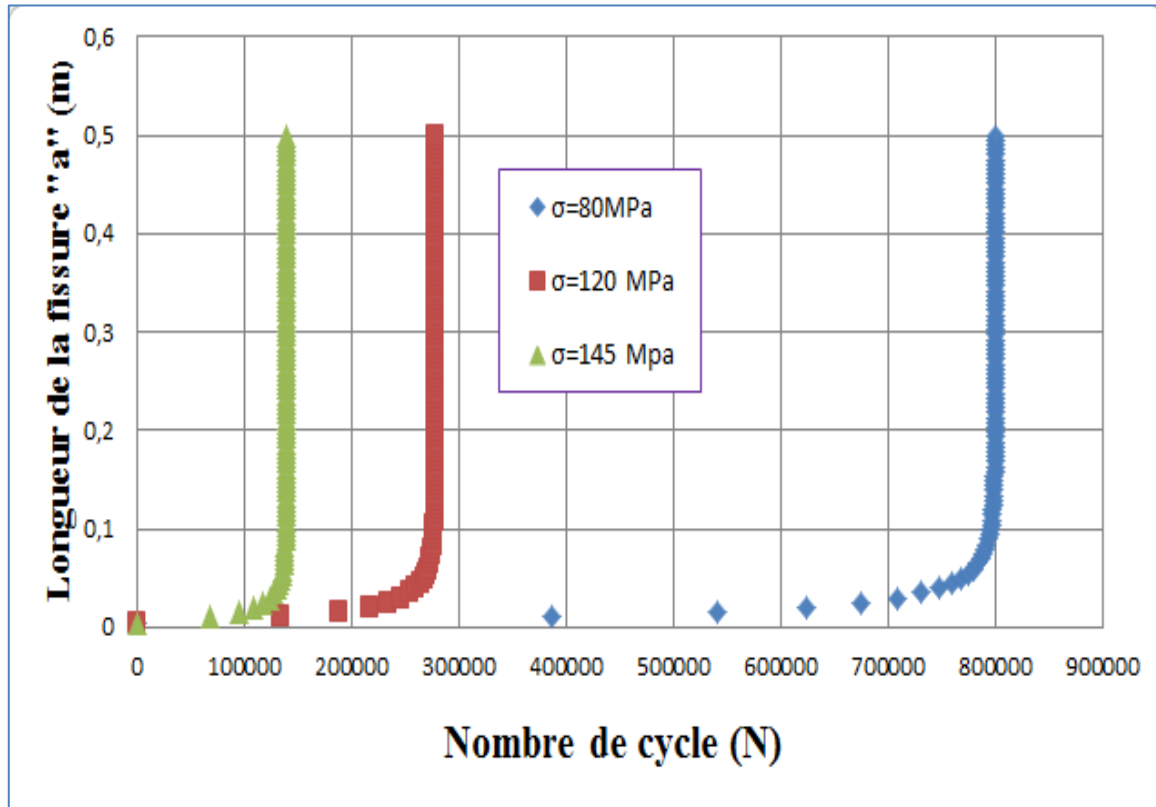


Figure 4.26. Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue de l'acier API 5L X65 à $R=0.1$

La variation de la durée de vie résiduelle en fatigue en fonction de l'amplitude de chargement pour l'acier API 5L X70 est montrée par la figure (4.27) pour un rapport de charge $R=0.1$. Une diminution importante de la durée de vie en fatigue est constatée pour $\sigma_{\text{max}}=120$ MPa et 145 MPa. A une longueur de fissure de 0.3 m, la durée de vie a augmenté de 5.10×10^5 cycles pour une diminution du chargement appliqué de 145 MPa à 80 MPa ce qui présente un taux d'augmentation en durée de vie de 5 fois.

On dit que l'augmentation de l'amplitude de chargement a diminué le nombre de cycle à la rupture.

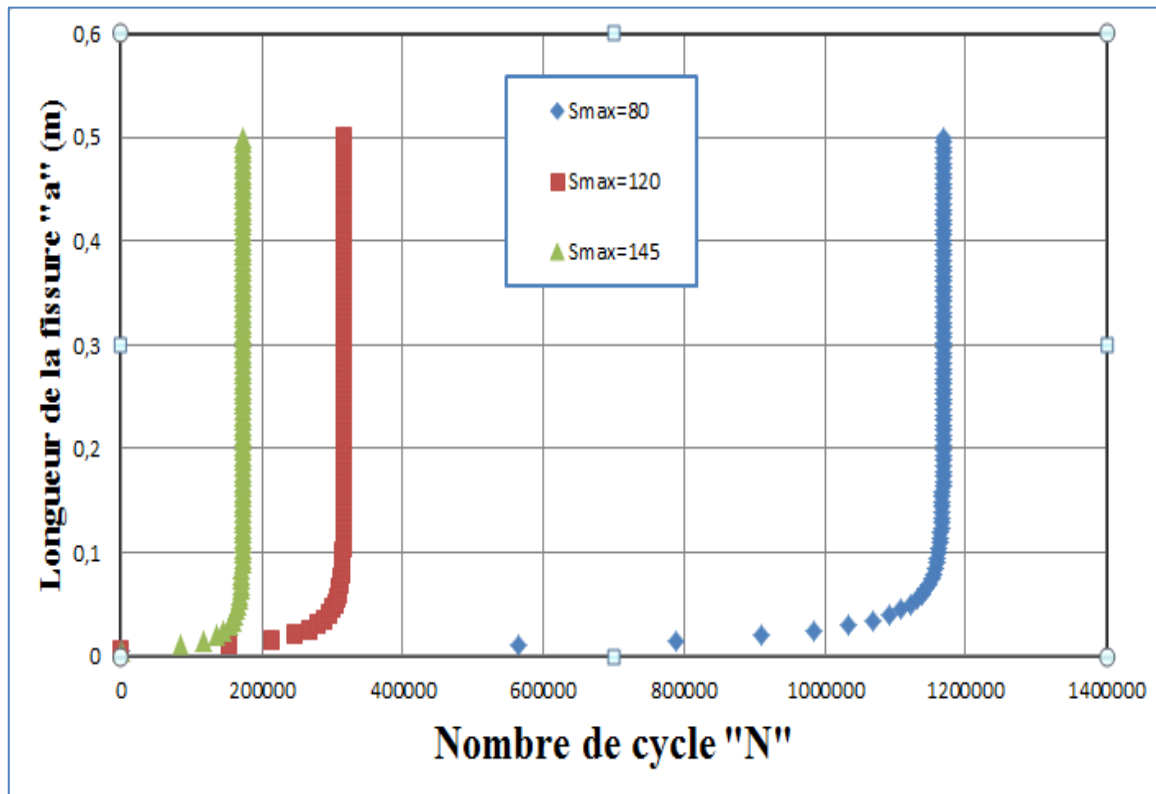


Figure 4.27. Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue de l'acier API 5L X70 à R=0.1

IV.2.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté dans la première partie la simulation de la propagation de fissure en fatigue à partir du code **eFatigue** qui est basé sur le Web et définit les démarches pour son utilisation.

Pour la deuxième partie on a exposé les différents résultats obtenus pour le cas des aciers du grade API 5L X65 et X70 suivi par des discussions sur les différents graphes.

On conclut qu'il y a une relation proportionnelle entre la variation de la longueur de fissuration en fonction de durée de vie en fatigue.

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

A l'heure actuelle, le transport par pipeline présente un grand intérêt et constitue une partie fondamentale pour l'acheminement des hydrocarbures entre les raffineries et les centres de stockage.

Après quelques années d'exploitation, les pipelines subissent des différents types d'altérations comme l'encrassement, les dépôts et plus particulièrement la fatigue qui affecte au cours du temps sur l'exploitation normale de ces ouvrages par conséquent influx sur la quantité des produits transportés.

Ce travail avait pour but initial de concevoir le comportement en fatigue des aciers utilisés pour pipelines. L'effet de chargement caractérisé par la variation du rapport de charge et de l'amplitude de chargement, a été mis en évidence. L'étude a été menée sur un tube d'une fissure longitudinale et un chargement de tension.

Premièrement, une description générale sur le site de Hassi R'mel et le travail d'acheminement par pipeline sur un train de traitement de gaz.

Ensuite on a donné des définitions pour les canalisations et les caractéristiques mécaniques et chimiques pour les aciers des pipelines ainsi les procédés de fabrications puis on a présenté les défaillances les plus célèbres pour les pipelines tel que les fissures, corrosion, érosion et on a prouvé ça par une fissure réelle sur le champ de Hassi R'mel.

Après, une revue de l'état de l'art sur la mécanique de la rupture et les différentes équations de déformation et contrainte ainsi les milieux fissuré puis on a étudié la propagation d'une fissure et le comportement en fatigue des aciers pour pipeline et les différents paramètres influents sur eux.

Enfin on a fait la simulation numérique de la propagation des fissures de fatigue par le code qui basé sur le Web **eFatigue** puis une discussion générale sur les différents résultats obtenus.

On dit que : La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure. Il est notamment caractérisé par une étendue de variation de contrainte bien inférieure à la résistance à la traction du matériau.

Les étapes principales de la fatigue sont :

- L'amorçage de fissures (si des défauts ne sont pas déjà présents dans le matériau).
- La propagation de fissures et la rupture finale.

Les résultats ont montré que la durée de vie et la vitesse de fissuration dépendent en premier lieu d'un certain nombre de paramètres. Le modèle de Paris a été utilisé afin de prédire la durée de vie en fatigue pour différents rapport de charge et amplitude de chargement.

Dans le premier cas, lorsqu'on pose une amplitude de chargement maximale constante et rapport de charge varié, on remarque que la durée de vie augmente avec l'augmentation du rapport de charge. Pour une même longueur de fissure ($a=0.3m$), la durée de vie a augmentée considérablement. L'analyse des courbes des durées de vie pour différents grades d'aciers à même rapport de charge, montrent que la durée de vie résiduelle pour l'acier à haut grade est supérieure à celui de l'acier de grade inférieur.

Le deuxième cas c'est l'effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie résiduelle en fatigue pour un rapport de charge constant montre qu'il y a diminution du nombre de cycle à la rupture lorsque l'amplitude du chargement augmente.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ELGUEDJ Thomas. Simulation numérique de la propagation de fissure en fatigue par la méthode des éléments finis étendus : prise en compte de la plasticité et du contact-frottement. Thèse de doctorat de génie mécanique école doctorale : mécanique, énergétique. France 2006
- [2] BELLAHCENE Tassadit. Etude de la nocivité des défauts dans les canalisations sous environnement hydrogène. Thèse de doctorat de génie mécanique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2008.
- [3] DIGARD Jean-Baptiste. « Mise en place d'un SIG Pipeline : état des lieux et maquettage ». Thèse d'ingénieur en école supérieure des géomètres et topographes paris 2004
- [4] ALI OTMANE.A, MAZOUZ M. « Analyse de la probabilité de rupture sur un pipeline corrodé par fiabilité structurale » Thème d'ingénieur en Transport et équipements des hydrocarbures Option : Transport et Distribution des Hydrocarbures Université « M'HAMED BOUGARA » Boumerdes 2007/2008.
- [5] RAMDANI Mohammed. Etude mécano fiabiliste sur le comportement en corrosion localisée des aciers API -5L- X60 pour pipeline : modèle basé sur la ténacité. Thèse de magister en génie mécanique option : science des matériaux. Université ABOU BEKR BELKAID Tlemcen 2008.
- [6] BROUN'Guéssan Bahët Stanislas. Etude du dimensionnement optimal d'un système de protection cathodique, alimenté par énergie solaire. Thèse diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique, option Transport et Distribution des Hydrocarbures Université M'Hamed BOUGARA de Boumerdes 2009.
- [7] A.BOUZIANE. 'Contribution à la détermination des critères des qualités des tubes soudés soumis à une pression intérieure. Thèse de Magistère en génie mécanique Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES. Année universitaire 2007/2008.
- [8] J.VINCENT-GENOD. (1989). Le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation. Institut français de pétrole. Société des éditions technique paris.
- [9] Fateh AGGOUNE. Thèse de Magister en Génie Mécanique option: « Mécanique Appliquée en Engineering » : évaluation de l'endommagement des

tubes dans leurs conditions d'exploitation 2010.

- [10] Enregistrées par les membres de L'ACPRE dans les années entre 1985 à 1995 (Association des Pipelines de Ressources Energétiques).
- [11] Ahmed BENHAMOUDA, étude du comportement des fissures dans les tubes sous pression interne. Thèse de magistère en génie mécanique option : Mécanique des Surfaces et Matériaux université MENTOURI Constantine 2010.
- [12] Griffith, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions 1920; 221: pp. 163-198.
- [13] G.R. Irwin, "Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate", J. of Appl. Mech. Transactions, pp.361-364, 1957.
- [14] Bouchard. ANALYSE MECANIQUE DUNE PIECE FISSUREE http://pastel.paristech.org/archive/00001395/01/Chapitre_2.pdf.2004
- [15] Masounave.J, Bathias.C, Dickson.I .RUPTURE CONTROLE SURETE. S; Livre Editeurs scientifiques Canada. NR16-12/1985
- [16] Saïd Hariri, Mansour Afzali & Haïdar Jaffal « NOCIVITE DES DEFAUTS ET PROPAGATION DE FISSURES DANS LES EQUIPEMENTS SOUS PRESSION ». Ecole des Mines de Douai 2007
- [17] Ouahabi, Thomas et Lakis « DÉTECTION DE FISSURES DE RESPIRATION DE FATIGUE PAR EXCITATION HARMONIQUE ET ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE ». Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure .Montréal, Québec, H3C 3A7, Canada, 2008.
- [18] LE RAPPORT de H.BESSAHA. ACTIVITE AMONT. Division production. Direction technique. Département inspection/corrosion, SONATRACH HASSI R'MEL. LES PHOTOS de mon appareil photo MARS 2013.
- [19] J.C.SCULLY, "The Fundamentals of corrosion Engineering (McGraw Hill), 1967, chapitre". 2 et 3
- [20] A. Alhussein. Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux « Transport et stockage des dérives pétroliers, Problématique d'endommagement des pipes par érosion de sable et par hydrogène » Université de Metz, 2010
- [21] Rice, J. R. Some remarks on elastic crack tip stress fields. International Journal of Solids and Structures 1972; 8: pp. 751-758.
- [22] CLAUDE BATHIAR – ANDRES PINEAU. Fatigue des matériaux et des structures, -. Lavoisier printed and bound in England by AUTONY ROWE

LTD, CHIPPENHAM, April 2008 (tome 1et 2).

- [23] Shih, C. F. & Moran, B. Energy release rate along a three dimensional crack front in a thermally stressed body. *International Journal of Fracture* 1986; 30: pp. 79-102.
- [24] Dorlot, J. M., Bâillon, J. P. & Masounave, J., *Des matériaux*, Ecole polytechnique de Montréal, Montréal, Canada, 1986
- [25] Hénaff, G., *Fatigue des matériaux et des structures*, Cours ENSMA, Poitiers, France, 2005.
- [26] Elber, W. Fatigue crack closure under cyclic tension. *Engineering Fracture Mechanics* 1970; 2: pp. 445-476.
- [27] Brennan, F. P., Ngiam, S. S. & Lee, C. W. An experimental and analytical study of fatigue crack shape control by cold working. *Engineering Fracture Mechanics* 2008; 75 (3-4): pp. 355-363.
- [28] Toribio, J., Matos, J. C., González, B. & Escuadra, J. Numerical modelling of crack shape evolution for surface flaws in round bars under tensile loading. *Engineering Failure Analysis* 2008;
- [29] Courtin, S., *Propagation de fissures de fatigue dans une géométrie de gorge de vilebrequin en présence de contraintes résiduelles de galetage*, mémoire de thèse, 2004. Université de Poitiers, Poitiers, France
- [30] Lin, X. B. & Smith, R. A. Shape evolution of surface cracks in fatigued round bars with a semicircular circumferential notch. *International Journal of Fatigue* 1999; 21 (9): pp. 965-973.
- [31] Karlsson, H., *ABAQUS Analysis User's Manual - Version 6.7* Abaqus, Inc., 2007.
- [32] Bouchard, P. O., Bay, F., Chastel, Y. & Tovenà, I. Crack propagation modelling using an advanced remeshing technique. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 2000; 189 (3): pp. 723-742.
- [33] Colombo, D. A methodology for automatic crack propagation modelling in planar and shell FE models. *Engineering Fracture Mechanics* 2006; 73: pp. 490–504.
- [34] *LES MATERIAUX Théorie du réacteur et notions scientifiques fondamentales -Matériaux Groupe de formation technique* 2008
- [35] MOUSSAOUI Mustapha .Thème de Magister Spécialité : Génie Mécanique

- [36] Seyed Mohammad SEYEDI « FORMATION, PROPAGATION ET COALESCENCE DANS UN RESEAU DE FISSURES EN FATIGUE THERMIQUE». Thèse Doctorat, 16 février 2004.
- [37] Hoai Nam LE. Etude de la propagation d'une fissure sous chargement thermique cyclique induisant un gradient de température dans l'épaisseur. Thèse de Doctorat de l'école nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique option Mécanique des Solides et des Matériaux MAI 2009
- [38] F. R. Stonesifer. Effect of grain size and temperature on fatigue crack propagation in A533 B steel. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 10, pp 305-314 (1978).
- [39] DAHAOUI Mourad. Effet des préformations sur le comportement en fatigue des alliages d'aluminium a durcissement structural. Thème de magistère option endommagement et fiabilité des matériaux. Université ABBT. 2012/2013
- [40] NIST: Materials Reliability Division-USA "Effect of ethanol fuel and microbiologically influenced corrosion on the fatigue crack growth behavior of pipeline steels.
- [41] A review of fatigue crack growth for pipeline steels exposed to hydrogen. *Journal of research of the national institute of standards and technology*, 115 (2010)
- [42] M. Augusto Neves, (2005). Propagation de fissures par fatigue des tubes d'acier soudés longitudinales, grade API 5L X-70". Université Fédérale de Rio de Janeiro, 2005.
- [43] Young Pyo Kim, Cheol Man Kim, Woo Sik Kim, Kwang Seon Shin (2007). Fatigue crack growth behavior in girth weld of natural gas transmission Pipelines. *Key Engineering Materials*, Vols. 345-346, pp 303-306
- [44] F.HADJOU. Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines à différent grades. THESE DOCTORAT en génie mécanique Option Sciences des Matériaux université ABBT.2013
- [45] A. FATEMI -Université of Toledo Chapitre 10 –Multiaxial Fatigue eFatigue LLC. www.eFatigue.com. 2008-2013

- [46] GHOMRI.A, HASSAINE.A, Etude des effets de surcharge sur la propagation de fissure de fatigue. Thèse d'ingénieur en G.M, université ABBT 2010/2011.
- [47] WWW.GOOGLE.COM/IMAGES - European Student Think Tank –2002.

RESUME

Les causes des ruptures des pièces ou des structure en service sont multiples mais d'importance très diverse. Parmi celles-ci, l'endommagement par fatigue qui peut se produire dans toutes pièce soumises à des vibrations périodiques d'effort. Le comportement en fatigue des pipelines dépend de plusieurs paramètres de nature métallurgiques, des propriétés mécaniques et des conditions de service caractérisé par la pression mise en œuvre. Du point de vue numérique, la propagation de fissure est un problème complexe puisqu'il nécessite de suivre la géométrie de la fissure au cours du temps. De plus, l'augmentation des contraintes de travail, et l'allègement des canalisations qui à partir d'une conception plus efficace et des taux de travaille plus élevés produit des amplitudes de contraintes variables plus importantes qui conduisent à s'intéresser sérieusement au phénomène de fatigue. En effet, on considère aujourd'hui que la fatigue est responsable d'au moins 90% de toutes les ruptures en service dues à des causes mécanique. En fin, Le transport du gaz dans des conditions économiques nécessite l'utilisation de pressions élevées, et donc l'utilisation d'aciers à haute limite d'élasticité ainsi la sécurité des installations demande une bonne ténacité pour éviter la ruine des pipelines par propagation rapide de fissures. Les chargements cycliques à amplitudes constantes caractérisés par le rapport de charge et l'amplitude de chargement cyclique ont été mis en évidence sur différents grades d'aciers API 5L à travers l'utilisation de la méthode de **Paris** afin de prédire la durée de vie résiduelle en fatigue.

MOTS CLES: l'endommagement par fatigue, mécanique de la rupture, pipeline, acier, propagation de fissure, rapport de charge, amplitude, modèle de PARIS, contrainte.

ABSTRACT

The causes of breakage of parts or structure in use are multiple but very varying importance. Among them, the fatigue damage that may occur in any part subject to periodic vibrations effort. The fatigue behavior of pipelines depends on several parameters of metallurgical nature, mechanical properties and operating conditions characterized by pressure service. From the numerical point of view, the crack propagation is a complex problem since it requires following the geometry of the crack over time. In addition, the increased stresses of work and the relief pipelines from more efficient and higher levels of work product design amplitudes most important variables constraints that lead to serious interest in the phenomenon fatigue. Indeed, today it is considered that fatigue is responsible for at least 90% of all service failures due to mechanical causes. In the end, the gas transport in economic conditions requires the use of high pressures, and thus the use of steels with high yield. In addition, the safety of installations demands toughness to prevent collapse of the structure by rapid crack propagation. The cyclic loading at constant amplitude characterized by the stress ratio and the amplitude of cyclic loading have been highlighted on various grades of steel API 5L through the use of the method of **Paris** in order to predict the residual life fatigue.

KEY WORDS: fatigue damage, fracture mechanics, pipeline, steel, crack growth, method of Paris, stress ratio.

المخلص

أسباب الكسر و التقطع للأجزاء و الأنابيب كثيرة و متعددة ولكن ذات أهمية متفاوتة، من بينها الضرر بالتعب الذي قد ينتج في جميع الأجزاء التي تخضع لاهتزازات دورية. تحمل الكلال أو التعب الميكانيكي لأنابيب توصيل الغاز و البترول يعتمد أساسا على عدة عوامل منها ذات طابع معدني، خصائص ميكانيكية و ظروف التشغيل التي يؤثر عليها الضغط الموجود في الأنابيب. من وجهة النظر الرقمية، انتشار التشققات يعتبر مشكلة معقدة لأنه يتطلب متابعة التصدع مع مرور الوقت، وبالإضافة إلى ذلك زيادة ضغوط العمل و تمدد الأنابيب المصممة بتشكيل فعال و أوقات عمل عالية تنتج مدود ذات ضغط متغير مهم، تؤدي بنا إلى الإهتمام الفعلي و الجاد بظاهرة التعب الذي يعتبر في يومنا هذا هو المسؤول الأول بنسبة 90 % على الأقل لجميع الكسور و التقطعات الناتجة عن أسباب ميكانيكية أثناء نشاطها. في نهاية المطاف، فإن نقل المحروقات في ظروف اقتصادية مثالية يستوجب استخدام ضغوط عالية، و بالتالي استخدام صلب عالي التمدد، و حماية المنشآت يتطلب صلابة جيدة من أجل اجتناب انهيار الأنابيب بانتشار التشعر. الحملات الدورية من خلال استخدام طريقة **API5L** بقيم ثابتة و المتعلقة بنسبة الحمولة و قيم الدورة للحمولة قد ضبطت على عدة أصناف من الصلب لإنتشار التشعر من أجل التنبؤ بمدة الحياة عند التعب و الكلال.

الكلمات المفتاحية : الكلال و التعب، ميكانيك الكسر، خطوط الأنابيب، الصلب، انتشار التشعر، نموذج **Paris** ،نسبة الحمولة، إجهاد .