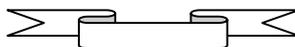




**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique**  
**Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen**



**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**

**Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master**  
**Spécialité : Maintenance Industrielle**

## *Thème*

---

---

***Défauts dans Les pipelines et leurs effets sur le  
Comportement en fatigue.***

---

---

Présenté par : HEBBAZ Mohammed Amine

Le :     /     /2015 devant le jury composé de :

Président	: BOURDIM Abdelghafour	MC_A	Université de Tlemcen
Encadreur	: BENACHOUR Mustapha	MC_A	Université de Tlemcen
Co-encadreur	: HADJOUI Féthi	MC_B	Université de Tlemcen
Examineur	: SEBAA Féthi	MC_A	Université de Tlemcen
Examineur	: MANGOUCI Ahmed	MA_A	Université de Tlemcen

*Année universitaire : 2014-2015*

***DÉDICACE***

***A MA MERE BENSABA CHERIFA***

***QUI S'EST CONSACREE COMPLETEMENT POUR NOUS***

***MALGRE TOUT***

***A LA MEMOIRE DE MON PERE***

***ZOUBIR***

***A MES FRERES TOUFIK ET KARIM***

***A MES SOEURS LEILA WARDA ET NADIA***

***ET A VOUS***

***CHER LECTEUR LECTRICE***

---

---

## REMERCIEMENTS

---

### **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 **BENACHOUR***

***Mustapha** Maitre de conférence au département de génie mécanique (faculté de technologie- 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 **HADJOUI***

***Fethi** 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 **BOURDIM Abdelghafour** Maitre de conférence 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 **MANGOUCI Ahmed** Maitre de conférences (Faculté des technologie -université Abou Bakr **BELKAID** de Tlemcen) qu'ils ont accepté d'examiner et évaluer le contenu scientifique de ce mémoire.*

*Mes remerciements s'adressent à tous les professeurs de département mécanique "a tous les professeurs de notre cursus universitaire, et a*

*Tous les enseignants de mon parcours scolaire un remerciement spécial de mon collègue **BELABBED Youcef**, et à tous mes amis.*

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

# RESUME

---

## RÉSUMÉ

Généralement, 90% des ruptures dans les tuyaux sous pression sont dues à des concentrations de contraintes au voisinage d'un défaut. Ces défauts se regroupent en cinq catégories : les cratères de corrosion, les fissures, les éraflures, les enfoncements ainsi que les défauts dits combinés (enfoncements+éraflures). Ces défauts réduisent la durée de vie des pipelines.

Le comportement en fatigue des pipelines dépend de plusieurs paramètres de nature métallurgiques, des propriétés mécaniques, des conditions de service caractérisé par la Pression mise en œuvre .un état de l'art et une analyse des défauts d'enfoncement et éraflures sur le comportement en fatigue sont présentées. Cette analyse a montré que la présence de ces défauts répond sur l'intégrité des pipelines.

L'étude numérique a montré que l'application d'une charge sur le type de pipelines à différents grade crée des profondeurs d'enfoncement.

La géométrie de l'enfoncement dépend de la durée d'application de la charge, en conséquence les contraintes générées.

**Mots clé :** Pipeline, Enfoncement, éraflure, Fissure, Endommagement par fatigue, Durée de vie.

## ABSTRACT

Generally 90% of the failure of pipelines under pressure are due to concentration strains close to a defect. These faults are grouped in five categories: craters of corrosion, cracks, gouges, dent, combination dents with gouges. The latters (defects) reduce the fatigue life. The fatigue behavior of pipelines depends on several parameters of metallurgical nature, mechanical properties and operating conditions characterized by pressure service. a state of the art and analysis of dent end gouges defects on behavior fatigue are presented. This analysis showed that the present of these defects responds to pipeline integrity.

The numerical study showed that the application of a load on the type of pipelines to different grade creates dent depths.

Geometry of the dent depends on the period of application of the load, consequently stresses generated.

**Keywords:** Pipeline; Dent; Gouges, Cracks, Fatigue damage, Fatigue life.

## ملخص

عموما 90% من الكسور وتقطع الانابيب التي تخضع الى ضغوطات داخلية يعود السبب فيها الى تركيز الاجهادات التي تقع بمحيط العيب، يمكن تصنيف هذه العيوب في خمسة فئات هي الخدوش، عيوب على شكل حفر. خدش + حفر، الكسور والصدأ، ان هذه العيوب تنقص من مدة حياة الانابيب، فتحمل الكلال او التعب الميكانيكي لأنابيب توصيل الغاز يعتمد اساسا على عدة عوامل منها ذات طابع معدني وخصائص ميكانيكية وظروف التشغيل التي يؤثر عليها الضغط الموجود في الانابيب.

وجدت دراسات لعيوب الخدوش وعيوب تشكل الحفر. اظهرت هذه الدراسات العديدة ان تطبيق الحمولة على مختلف رتب الانابيب يؤدي الى تشكل عمق فالحفر حيث الاجهادات الناتجة وهندسة الحفر متعلقة بفترة تطبيق الحمولة.

**كلمات مفتاحية:** انابيب، حفر، خدش، كسر، كلال، مدة حياة

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

Figure I-1: Pipeline dans l'environnement .....	4
Figure I-2 : Principe de Production de tubes soudés à (Procédé Fretz-Moon).....	5
Figure I-3 : Principe de Production de tubes de grand diamètre.....	6
Figure I-4 : Photos de la mise en forme des tubes par le procédé « UOE .....	7
Figure I-5 : Soudage des tubes par le procédé « UOE ».....	8
Figure I-6 : Machine d'expansion.....	8
Figure I-7 : Tubes soudés sous la forme spirale.....	9
Figure I-8 : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale.....	9
Figure I-9 : L'angle d'introduction de la bande.....	10
Figure I-10 :Obtention des tubes sans soudure.....	11
Figure I-11 : Caractéristique géométrique d'un tube sous pression interne.....	11
Figure I-12 : Exemple de propriétés à concilier dans un acier HSLA.....	13
Figure I.13 : Evolution des compositions des aciers pour tubes en fonction de la soudabilité...14	
Figure I.14 : Etapes caractéristiques du schéma de laminage.....	15
Figure I.15 : Influence de la taille du grain $a$ sur $R_e$ et la température de transition.. ..	16
Figure I.16 : Niveaux de limite d'élasticité accessible par différent traitement thermique .....	16
Figure I-17 : Répartition des différentes nuances d'acier composant le réseau européen.....	17
Figure I-18 : Relation entre la teneur en carbone et le grade de l'acier .....	18
Figure I-19 :Microstructure de l'acier X42.....	20
Figure I-20 : Microstructure de l'acier X52 .....	21
Figure I-21 : Microstructure de l'acier X60.....	22
Figure I-22 :Microstructure de l'acier X65.....	22
Figure I-23 : Microstructure de l'acier X70.....	23
Figure I.24: Durcissement par solution solide.....	24
Figure I-25 : Différents contraintes s'exerçant sur un conduit .....	25
Figure I-26 : Mode de rupture d'une canalisation dans le cas de fissuration Longitudinale.....	26

# LISTE DES FIGURES

---

## CHAPITRE II

Figure II.1 : Courbe contrainte/déformation.....	32
Figure.II.2 : Fissure traversant de longueur $2a$ dans une plaque infinie.....	34
Figure II.3 : Les trois modes élémentaires de rupture.....	35
Figure II.4 : Définition des axes $(x, y)$ et des coordonnées $(r, \theta)$ au voisinage de l'extrémité d'une fissure.....	36
Figure II.5 : Schématisation des zones de déformation en avant de la fissure .....	37
Figure.II.6: Première estimation de la zone plastifiée.....	38
Figure.II.7 : Variation du chargement appliquée en fonction du temps .....	40
Figure II-8 : Formation d'intrusions et extrusions dans des bandes de glissement .....	42
Figure II.9 : Stades I et II de la fissuration par fatigue.....	43
Figure II-10 : Longueur de fissure en fonction du nombre de cycle.....	44
Figure II.11 : Exemple de courbe de propagation.....	45

## CHAPITRE III

Figure III.1 : Causes des incidents significatifs des pipelines de transmission de gaz naturel souterrain et sous-marin.....	55
Figure III.2 : Types de défauts évalués dans le PDAM.....	57
Figure III.3. : Microscopies sur un acier corrodé.....	58
Figure III.4. : Types de corrosion généralise.....	59
Figure III.5 : Forme de pique d'après ASTM (American Standard Teste Material).....	59
Figure III.6 Défaut d'enfoncement.....	61
Figure III.7 : Géométrie et caractérisation des enfoncements.....	62
Figure III.8 : Présentation d'une indentation symétrique avec ses différents paramètres .....	62
FigureIII.9 : Choc provoqué par un engin de chantier.....	64
Figure III.10 : Géométrie et caractérisation des éraflures.....	65
Figure III.11 : Défauts combinés (enfoncements + éraflures ) .....	67
Figure III.12 : Fissure longitudinale .....	68
Figure.III.13 : Fissure transversale.....	68
Figure III.14 : Effet des fissures sur la durée de vie de fatigue.....	69

# LISTE DES FIGURES

---

## CHAPITRE IV

Figure 4.1 : Effet de rapport $D/t$ sur la durée de vie en fatigue des pipelines.....	74
Figure 4.2 : Effet de profondeur de l'enfoncement sur la durée de vie en fatigue des pipelines.....	75
Figure 4.3 : Effet des profile de l'enfoncement sur la durée de vie de fatigue en pipeline .....	76
Figure 4.4 : Effet des (acuités) $w/2d$ sur la durée de vie des enfoncements .....	76
Figure 4.5 : la comparaison des résultats des essaie a grand échelle avec le model développé par (british Gas).....	77
Figure (4.6.a) : la variation de la variation de contrainte en fonction de $(D/t)$ et $(d/D)$ .....	79
Figure (4.6.b) : la variation de la variation de contrainte en fonction de $(D/t)$ et $(d/D)$ .....	79
Figure 4.7 : La courbe de fatigue de pipe enfoncée.....	80
Figure 4.8 : Interface de Solidworks.....	83
Figure 4.9 : Processus d'enfoncement sous la charge.....	84
Figure 4.10 : Comportement d'un acier au carbone. ....	84
Figure 4.11: les contrainte dans un pipeline .....	85
Figure 4.12 : Interface matériaux.....	86
Figure 4.13 : Elément triangulaire parabolique .....	87
Figure 4.14 :.Dimensionnement du tube cylindrique étudié sur Solidworks.....	87
Figure 4.15 : Maillage d'un domaine cylindrique en éléments finis.....	88
Figure 4.16 : Conditions aux limites.....	88
Figure 4.17 : De l'effet de la charge de pénétrateur sur le tube.....	89
Figure 4.18 : Résultat de l'étude sur X80.....	89
Figure 4.19 : Variation de l'enfoncement en fonction de temps .....	93
Figure 4.20 : Variation de contrainte en fonction de temps.....	93

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE I

Tableau I.1 :Acier au carbone couramment utilisé dans l'industrie pétrolière.....	19
Tableau I.2 Caractéristiques et microstructure de l'acier X42 Tubes de conduite PSL1..	20
Tableau I.3 :Caractéristiques et microstructure de l'acier X52 Tubes de conduite PSL1....	21
Tableau I.4 :Caractéristiques et microstructure de l'acier X60 Tubes de conduite PSL1...	22
Tableau I.5 :Caractéristiques et microstructure de l'acier X65 Tubes de conduite PSL1...	22
Tableau I.6 :Caractéristiques et microstructure de l'acier X70 Tubes de conduite PSL1 ...	23
Tableau I.7 :Evolution de gazoducs depuis 40 ans.....	24

### CHAPITRE III

Table III.1 : Liste des types des défauts les plus courants de pipeline.....	52
--	----

### CHAPITRE IV

Tableau IV.1 :Rapport de variation de contrainte ( $\Delta\sigma$ ) en fonction de (D/t) et (d/D).....	78
Tableau IV.2 : Caractéristique géométrique des tubes utilisés .....	83
Tableau IV.3 :Caractéristique mécanique des aciers .....	86
Tableau IV.4:Variation de profondeur d'enfoncement on fonction de temps .....	91
Tableau IV5 :Variation de contrainte on fonction de temps.....	92

# LISTE DES ABREVIATION

---

## LISTE DES ABREVIATION

PMS	Pression maximal de service
HSLA	Hight Strength Low Alloy Steel
HIC	Hydrogen Induced Cracking
WT	Wall Thichness
DWTT	Drop Weight Tear Test
CE	Carbone Equivalent
API	American Petrolium Institute
PSL	Pipes Steel Line
TK	Temperature de transition
SMLS	Seamless
ASTM	American Standard Taste Materials
EPRG	Européen Pipelines Research Group .
ASME	American Society of Mechanical Engineers, Etats-Unis.
RSTRENG	Code pour évaluer la rupture des pipelines corrodés extérieurement, Etats Unis .
ZAT	zone affectée thermique
PDAM	Pipeline Defect Assessment Manual

---

## LISTE DES SYMBOLES

---

### LISTE DES SYMBOLES

$\beta$	La largeur de bande
Dext	Le diamètre extérieur de tube formé
$\alpha'$	L'angle d'introduction de la bande par rapport à l'axe symétrique
t	Epaisseur de tube
FC	Facteur de Charge
KI	Facteur d'intensité de contraintes en mode I
$\emptyset$	Diamètre
$R_e$	Limite d'élasticité
$d'$	La taille de grain ferritique
$\sigma_0$	Contrainte d'écoulement du matériau dense
$\sigma_R$	Résistance à la rupture
G	L'énergie de Griffith
$G_c$	L'énergie de Griffith critique
E	Module d'Young
a	longueur de la fissure
$a_c$	la longueur critique de défaut
$a_0$	longueur de la fissure initiale
K	Facteur d'intensité de contrainte
$\varepsilon$	Déformation
R	Rapport de charge
N	Nombre de cycles
C	Constante de la loi de PARIS
m	Exposant de la relation de PARIS
$\nu$	Coefficient de poisson
$R_m$	La résistance à la traction du matériau
B et n	Sont des constantes caractéristiques du matériau.
$\Delta K_{Seuil}$	La valeur de $\Delta k$ au seuil de propagation pour un rapport de charge R

## LISTE DES SYMBOLES

---

C	Est déterminé expérimentalement
$\sigma$	Contrainte
$r_y$	La taille de la zone plastique
R1	Le rayon du tube,
$\phi$	L'angle de référence (original)
$\alpha$	L'angle après la déformation
$d_d$	Profondeur de l'indentation dans le cas d'une canalisation non pressurisée
$d_d^p$ :	Profondeur de l'enfoncement d'une canalisation pressurisée
$\sigma_f$	La contrainte d'écoulement du matériau
$\sigma_y$	La limite élastique du matériau
$R_m$	La résistance à rupture
$a_g$	La profondeur de l'éraflure
$M_F$	Le facteur de Folias
$2c$	La longueur du défaut (éraflure)
$d_d^p'$	La profondeur de l'enfoncement après retour élastique.
$\sigma_\theta$	La contrainte circonférentielle associée à l'enfoncement.
$\sigma_f$	La contrainte d'écoulement plastique,

**SOMMAIRE**

DEDICACE.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
RESUME.....	III
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES ABREVIATIONS.....	IX
LISTE DES SYMBOLES.....	X
SOMMAIRE.....	XII

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

**CHAPITRE I GENERALITES SUR LES PIPELINES ET LES ACIERS**

<b>Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I.1 Fabrication des pipelines.....</b>	<b>5</b>
I.1.1 Familles de tubes.....	5
I.1.1.1 Fabrication de tubes de diamètre inférieure à 16".....	5
I.1.1.2. Fabrication de tubes soudés de grand diamètre.....	6
I.2 Procédé de fabrication des tubes de pipelines.....	6
I.2.1 Les tubes soudés sous forme longitudinal.....	7
I.2.2 Les tubes soudés sous la forme spirale.....	9
I.2.2.1 L'angle d'introduction de la bande.....	10
I.2.3. Les tubes réalisés sans soudure.....	10
I.3. Caractéristiques des tubes.....	11
I.3.1 Dimensionnement des tubes.....	12
<b>I.2. Caractérisation et propriétés des aciers pour pipeline.....</b>	<b>12</b>
I.2.1 Soudabilité.....	13
I.2.2. Laminage.....	14
I.2.3 Limite d'élasticité.....	15

# SOMMAIRE

---

<b>I.3. Matériaux utilisés a fabrication de pipeline</b> .....	17
I.3.1 Teneur des aciers du pipeline.....	17
I.3.2. Tubes de conduite PSL 1et PSL 2.....	18
I.3.3. Influence des éléments sur les caractéristiques de l'acier.....	23
I.3.4 Evolution de gazoducs depuis 40 ans.....	24
<b>I.4 Contraintes exerçant sur une conduite</b> .....	25
I.4.1 Sollicitation d'un réseau .....	25
I.4 .2 différents sources de contrainte circonférentielle.....	26
I.4 .3 sources des contraintes longitudinales.....	26
<b>Références bibliographique de chapitre I</b> .....	27

## CHAPITRE II APERÇU SUR LA FISSURATION PAR FATIGUE

<b>II.1 Aspects historiques du phénomène de fissuration par fatigue</b> .....	31
<b>II.2 la mécanique linéaire de la rupture</b> .....	32
II.2.1 Le Critère d'énergie.....	33
II.2.2 Modes de ruptures .....	34
II.2.2.1 Distribution des contraintes à la pointe de la fissure en mode I.....	35
II.2.3 Zones plastiques à fond de fissure .....	36
II.2.4 Influence de l'état de contrainte sur la taille de la zone plastique .....	38
<b>II.3 Endommagement par fatigue</b> .....	39
II.3.1 Variation du chargement appliquée.....	40
II.3.2 Mécanismes physiques de défaillance en fatigue.....	41
<b>II-4 Amorçage de fissures de fatigue</b> .....	41
II.4.1 Mécanismes d'amorçage des fissures de fatigue.....	41
<b>II.5 Propagation de fissure</b> .....	42
II.5.1 Propagation de fissures de fatigue .....	42
II.5.2 Description des courbes de propagation de fissures.....	43
<b>II.6 Paramètres influençant la fissuration par fatigue</b> .....	47
<b>Référence bibliographique de chapitre II</b> .....	48

## CHAPITRE III LES DEFAUTS DANS LES PIPELINES

<b>Introduction</b> .....	51
<b>III.1 Un peu d’histoire sur les méthodes d’évaluation des défauts dans pipeline</b>	51
<b>III.2 Etat de l’art sur les défauts dans le pipeline</b> .....	52
III.2.1 Cause de défaillance des pipelines.....	55
III.2.2 PDAM (The Pipeline Defect Assessment Manual).....	56
III.2.2.1 Présentation du PDAM.....	56
III.2.2.2 Types de défauts évalués dans le PDAM.....	57
<b>III.3 Défaillance par corrosion</b> .....	58
III.3.1 Corrosion dans les pipelines .....	58
III.3.1.1 Différents types de corrosion.....	58
III.3.1.2 Défaillance par corrosion.....	59
III.3.1.3 Mécanisme de corrosion des pipelines.....	60
III.3.1.4 Fatigue-corrosion.....	60
<b>III.4 Défaut d’enfoncement</b> .....	60
III.4.1 Définition d’un enfoncement.....	60
III.4.2 La géométrie et caractérisation des enfoncements.....	61
III.4.3 Détermination de profondeur de l’indentation.....	62
III.4.4 Condition d’acceptabilité d’un enfoncement.....	63
<b>III.5 Les éraflures</b> .....	64
III.5.1 Définition d’une éraflure.....	64
III.5.2 contrainte relative à la zone à défaut des éraflures.....	65
<b>III.6 Les défauts combinés (enfoncements + éraflures)</b> .....	66
<b>III.7 Les défauts dans les soudures</b> .....	67
III.7.1. Orientation des fissures.....	67
III.7.1.1 Les fissures longitudinales.....	67
III.7.1.2 Les fissures transversales.....	68
III.7.2 cause des fissures.....	69
III.7.3 Effet des défauts de soudure sur la durée de vie de fatigue.....	69
<b>III.8 Conclusion</b> .....	70
<b>Référence bibliographique de chapitre III</b> .....	71

# SOMMAIRE

---

## CHAPITRE IV ETAT DE L'ART ET SIMULATION NUMERIQUE DE L'ENFONCEMENT

<b>IV.I. Etat de l'art des effets des défauts (enfoncement, éraflure) sur le comportement en fatigue.....</b>	<b>74</b>
IV.I.1 Effet de l'enfoncement sur le comportement de fatigue.....	74
IV.I.2 Effet des éraflures et défauts combiné (éraflure + enfoncement) sur le comportement en fatigue.....	77
IV.I.3 Analyse de la durée de vie en fatigue des pipelines enfoncée.....	78
IV.I.3.1 nombre de cycle de rupture et la durée de vie de fatigue.....	78
IV.I.3.2 Exemple de calcul la durée de vie fatigue.....	81
IV.I.3.3 Autres model de calcul le nombre de cycle de fatigue .....	82
IV.I.4 Paramètres régissant la résistance à la fatigue d'enfoncement.....	82
<b>IV.II. Simulation numérique d'enfoncement.....</b>	<b>83</b>
IV.II.1 Simulation numérique.....	83
IV.II.2 Méthodologie de création d'un enfoncement.....	84
IV.II.3 Différentes étapes du comportement mécanique du matériau.....	84
IV.II.4 Contrainte dans le tube.....	85
IV.II.5 Caractéristique mécanique des aciers utilisés.....	85
IV.II.6 Choix de l'élément .....	87
IV.II.7 Discrétisation du domaine d'étude en éléments finis.. ..	87
IV.II.8 Condition aux limites.....	88
IV.II.9 Application des charges.....	88
IV.II.10 Analyse et l'interprétation des résultats.....	89
<b>IV.III Conclusion.....</b>	<b>94</b>
<b>Référence bibliographique de chapitre IV.....</b>	<b>95</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>96</b>

## Introduction générale

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, ces 50 dernières années le moyen d'acheminement le moins coûteux et le plus sûr pour de grandes quantités d'énergies et sur des longues distances. Quel que soit l'endroit que le pipeline traverse (mer ou terre), ce dernier est toujours exposé aux risques d'endommagements que ce soit par des interférences externes ou environnementales. Il faut bien noter que la majorité des ruptures des pipelines qui se trouvent sur terre ou immergés en mer sont causées principalement par des agressions externes. Ces dernières se résument à des enfoncements, des éraflures ou aussi les combinaisons (enfoncements + éraflures).

Des études récentes faites par European Gas Pipeline Incident Group, pour 1060 cas de rupture dans les pipelines, ont montré que 49.6 % ont été causées par des agressions externes. Les autres causes d'incidents se répartissent en défauts de corrosion (15.3%), les défauts de construction (16.5%), ouverture de vannes par erreur (4.6%), les glissements de terrain (7.3%) et autres avec 6.7%. Toutes les structures mécaniques sont soumises à des efforts dont leurs origines varient selon leur fonctionnement, leur milieu environnant ainsi qu'aux effets extérieurs qui sont variables ; dans la majorité des cas, elles sont sous forme de sollicitations cycliques qui peuvent provoquer leur endommagement.

Si le matériau utilisé est soumis à des efforts avec des valeurs inférieures à celle de sa limite d'élasticité on obtient un endommagement par fatigue, comme une rupture qui surgit au bout d'un certain nombre de cycles.

Une rupture du matériau peut être provoquée par un amorçage qui est toujours suivi d'une propagation de fissures ; donc lorsqu'une structure mécanique présente une fissure de fatigue, un contrôle de suivi de sa propagation devient indispensable afin de pouvoir y remédier avant qu'elle n'atteigne la taille critique.

Les défauts tels les enfoncements, éraflures et défauts de corrosion sont les facteurs important affectant la résistance de la fatigue de pipelines car ils réduisent la durée de vie de fatigue. L'objectif de notre travail et de montrer comment ces défauts affectent le comportement en fatigue on va également détailler l'effet de défauts d'enfoncement c.a. d comment la profondeur de l'enfoncement varie avec les dimensions de pipeline (diamètre, épaisseur, longueur) et comment

Ces derniers affectent la durée de vie de fatigue. Pour cela, ce manuscrit est scindé en quatre chapitres :

## INTRODUCTION GENERALE

---

- ❖ Le premier chapitre est divisé en deux parties : la première partie est réservée à la présentation des caractéristiques mécaniques et chimiques des aciers ainsi les différentes procédures de fabrication des tubes des pipelines. La deuxième partie est axée sur les différentes contraintes exercées sur un pipeline.
  
- ❖ Le deuxième 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.
  
- ❖ Le Troisième chapitre présente des différents types de défauts géométriques que l'on peut rencontrer dans les tuyaux métalliques (défauts causés par impact avec un corps étranger, les fissures ainsi que les caractères de corrosion) et plus particulièrement les enfoncements et les éraflures.
  
- ❖ Le quatrième chapitre montre les effets des défauts (enfoncement, éraflure) sur le comportement en fatigue. de plus ce chapitre inclut une simulation numérique de défauts d'enfoncement

Nous terminerons le mémoire par une conclusion et les perspectives.

## Introduction

Un pipeline est une canalisation enterrée ou aérienne transportant des matières, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse (Figure I.1). Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol. Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés en zone de risques sismique ou politiquement instable. Au contraire de leur investissement initial ; leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrentes, au moins sur de petites et moyennes distances.



*Figure I-1 : Pipeline dans l'environnement [1]*

Selon la matière ou produit transporté, le pipeline est désigné par [2] :

- ✚ Gazoduc (pour transport le gaz)
- ✚ Oléoduc (pour transporter le pétrole)
- ✚ Aqueduc (pour transporter l'eau)

## I.1 fabrication des pipelines :

La fabrication des tubes pour pipelines est la transformation des plaques d'acier en tubes en vue de son utilisation qui peut changer d'un produit à un autre et d'une région à une autre. [3]

### I.1.1 Familles de tubes

Il existe trois grandes familles de tubes :

- 1- Les petits tubes soudés dont le diamètre ne dépasse pas  $219\text{mm} \leq 8''$ .
- 2- Les moyens tubes soudés dont le diamètre est compris entre 219mm et 406mm (9'' à 16'').
- 3- Les grands tubes soudés dont le diamètre est supérieur à 16''. [4]

#### I.1.1.1 Fabrication de tubes de diamètre inférieure à 16''

La fabrication de tels tubes s'exécute toujours en continu. C'est à - dire que les chaînes de soudeurs produisent sans arrêt, des tubes de longueurs illimitées ou presque, à partir de feuillards ou de bobines. L'opération se termine par un tronçonnage aux longueurs d'utilisation. (Figure. I-2).

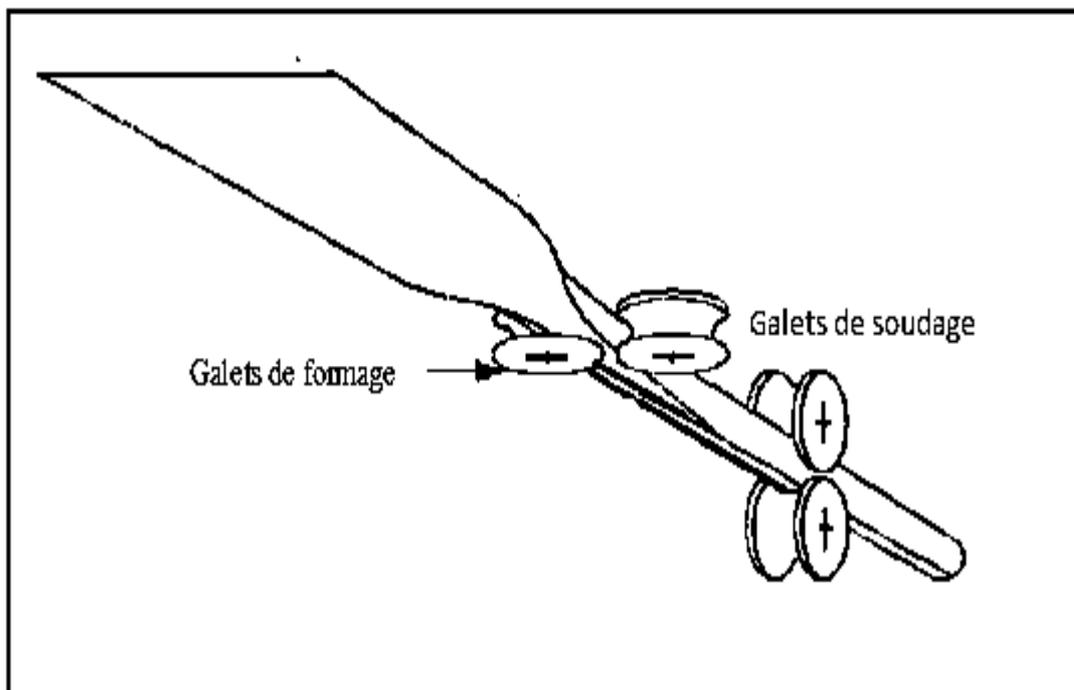


Figure I-2 : Principe de Production de tubes soudés (Procédé Fretz-Moon). [5]

## I.1.1.2. Fabrication de tubes soudés de grand diamètre

Il est habituel de réserver l'application [tubes de grand diamètre] aux produits dans le diamètre extérieur est supérieur à 16 pouces ou 406 mm [6]

Cette dimension peut, en effet être considérée comme la limite atteinte par les tubes sans soudure.

Mais pour les productions de grand série au prix de revient le plus compétitif, on fait généralement appel à la technique des tubes soudés longitudinalement suivant une hélice, dans l'un au l'autre cas la matière première est une tôle unitaire dont la largeur est indépendante du diamètre du tube, l'épaisseur de la tôle est égale à l'épaisseur du tube à obtenir.

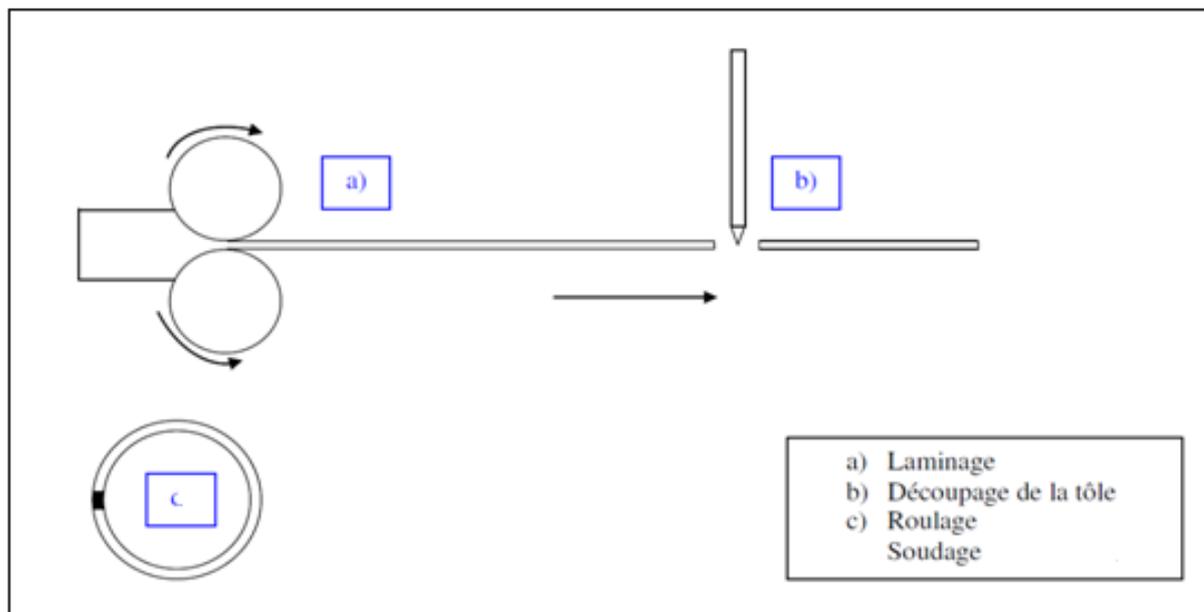


Figure I-3 Principe de Production de tubes de grand diamètre

## I.2. Procèdes de fabrication des tubes de pipelines

On retrouve :

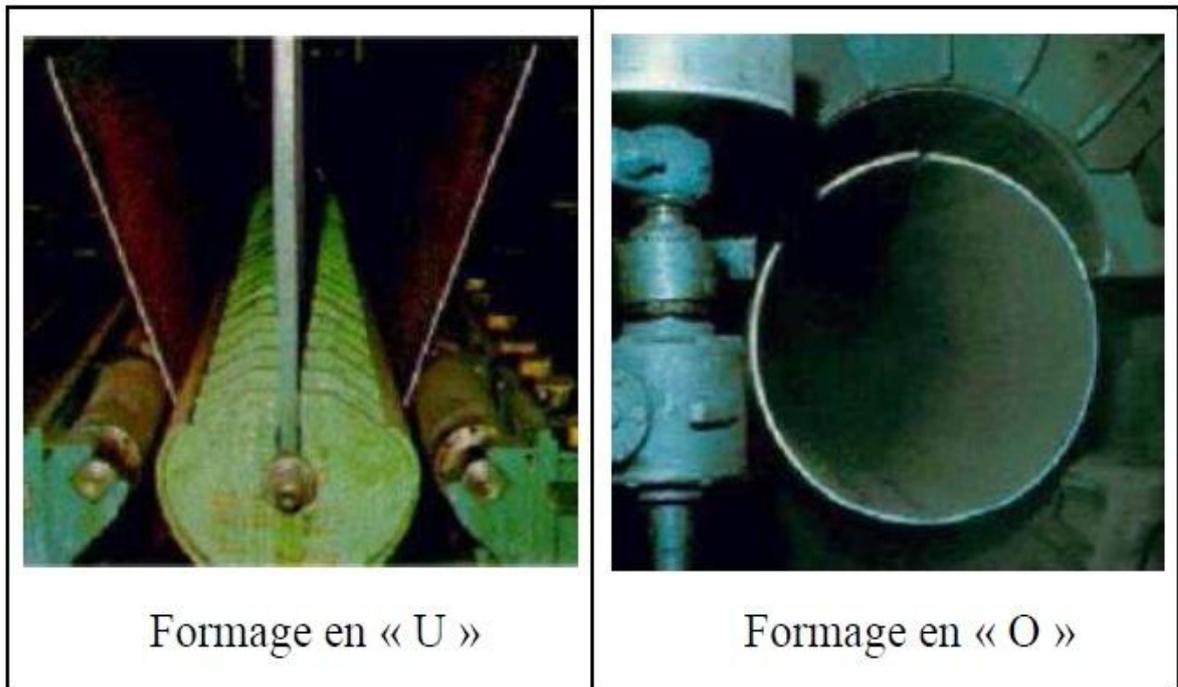
- ✚ Les tubes soudés sous forme longitudinale.
- ✚ Les tubes soudés sous la forme spirale.
- ✚ Les tubes formés sans soudure.

## I.2.1 Les tubes soudés sous forme longitudinale :

Les tubes de grand diamètre soudés longitudinalement sont fabriqués selon le procédé "UOE", désignation qui reprend la variation de forme au cours de la fabrication ; le croquage, la forme « U », la forme « O », soudage et enfin l'expansion. [3] :

**a. Le formage** représente les trois étapes pour passer de la plaque à la forme cylindrique.

- le croquage à l'aide d'une machine appelée croqueuse afin de fixer la plaque et d'amorcer le pliage
- la déformation en forme de « U » à l'aide d'une presse
- la déformation en forme de « O » toujours par une autre presse, (Figure I-4) représente la mise en forme des tubes par le procédé « UOE »



*Figure I-4 Photos de la mise en forme des tubes par le procédé « UOE »*

**b. Le soudage :** le soudage du tube est effectué intérieurement et extérieurement à l'aide de têtes soudeuses automatiques en utilisant la technique de soudage à l'arc sous flux. La figure suivante représente Le soudage intérieur et extérieur du tube.

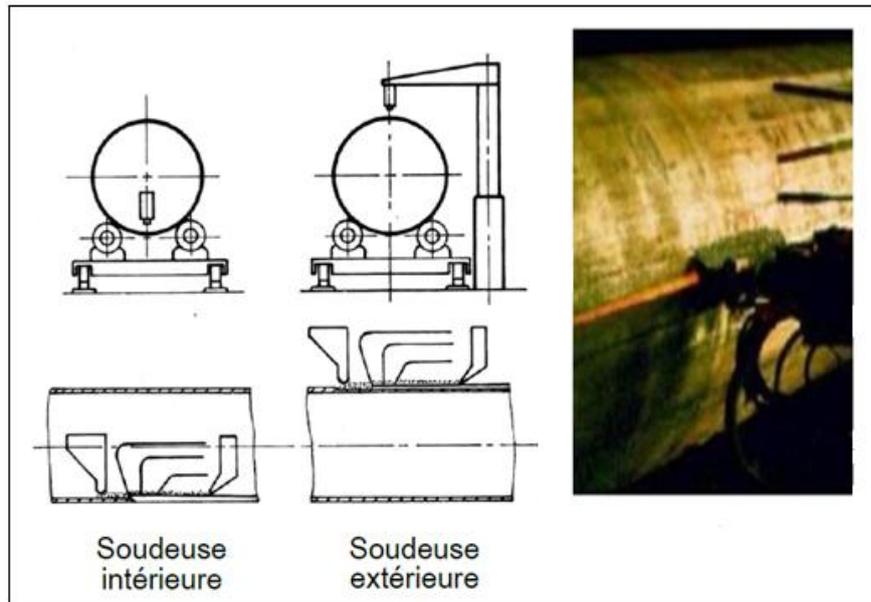


Figure I-5. Soudage des tubes par le procédé « UOE », [7]

**c. L'Expansion et calibrage :** Dans le but d'obtenir des tubes de section parfaitement circulaire, les tubes après être soudés sont soumis à une expansion mécanique ou hydraulique qui leur fait subir une augmentation de diamètre de 1 à 1.5 %. (Figure I-6)

Cette opération a pour conséquence de relaxer les contraintes résiduelles. Enfin une opération de Chanfreinage est effectuée par une Lameuse afin de faciliter le raccordement des tubes entre eux.

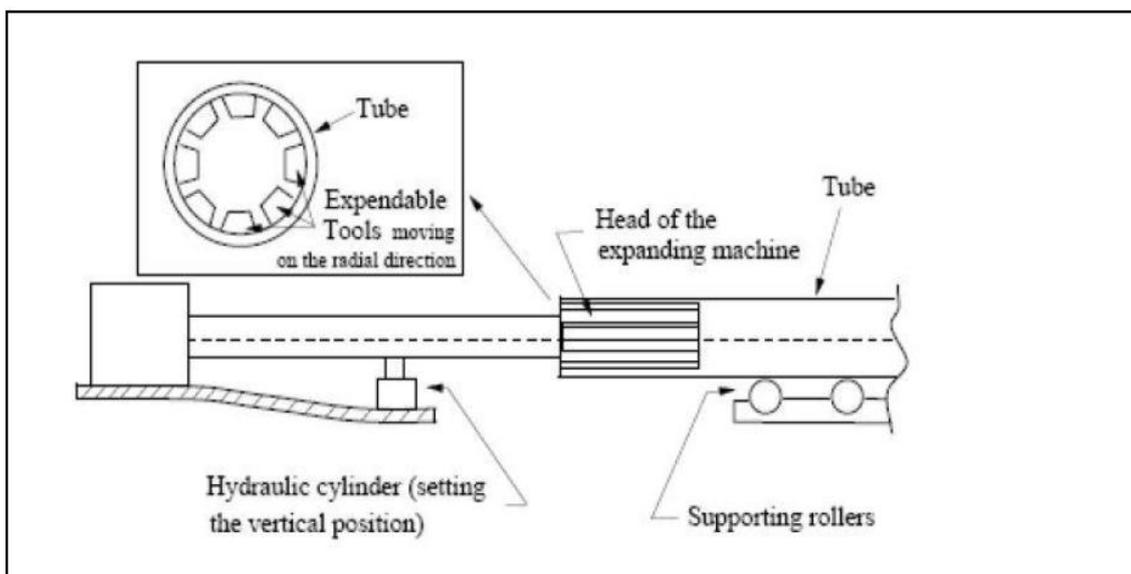


Figure I. 6. Machine d'expansion

## I.2.2 Les tubes soudés sous la forme spirale

Les tubes soudés en spirale sont obtenues par enroulement et soudure hélicoïdale d'un ruban de tôle approvisionné sous forme de bobines (figure I-7) ; ce procédé exige un contrôle très sévère de la soudure en usine, en raison des nombreuses reprises qu'il entraîne, et qui impose un appareillage très étudié et une très bonne qualité des tôles, pour garantir une bonne fiabilité de la fabrication. [8]

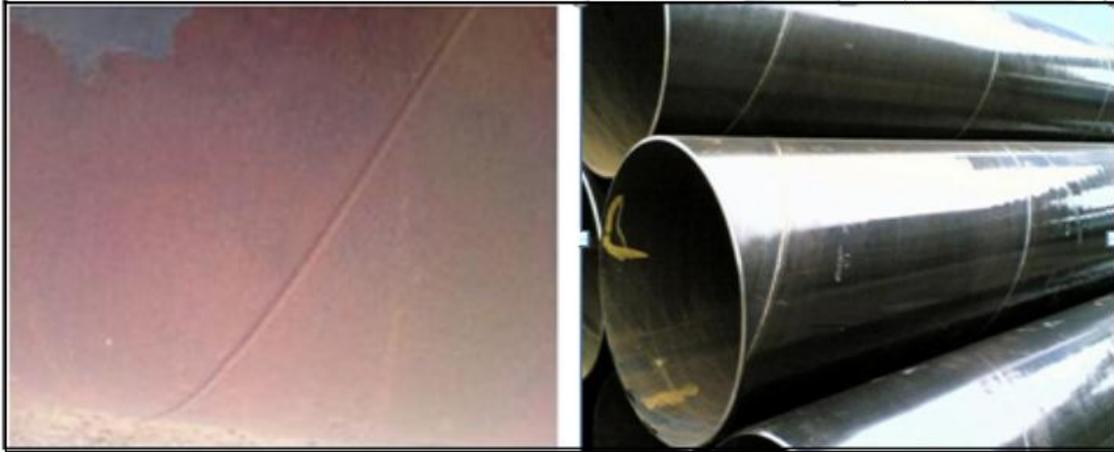


Figure I-7 tubes soudés sous la forme spirale

La fabrication des tubes spirale peut être subdivisée en opérations principales (La préparation de la bande, La bande de rabotage, cintrage, soudage) (figure I-8)

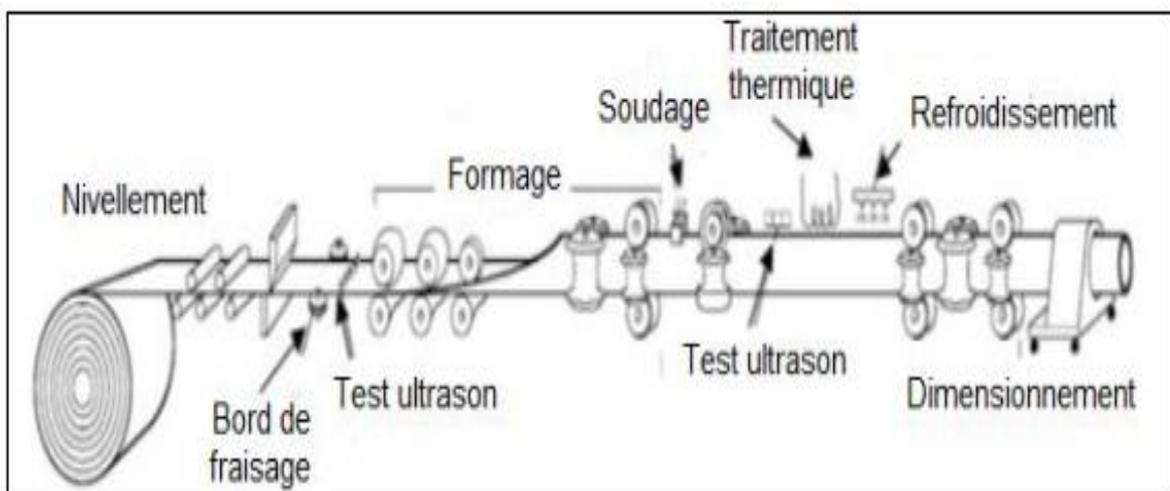


Figure I-8. Technique de fabrication des tubes soudés en spirale [9]

## I.2.2.1 L'angle d'introduction de la bande

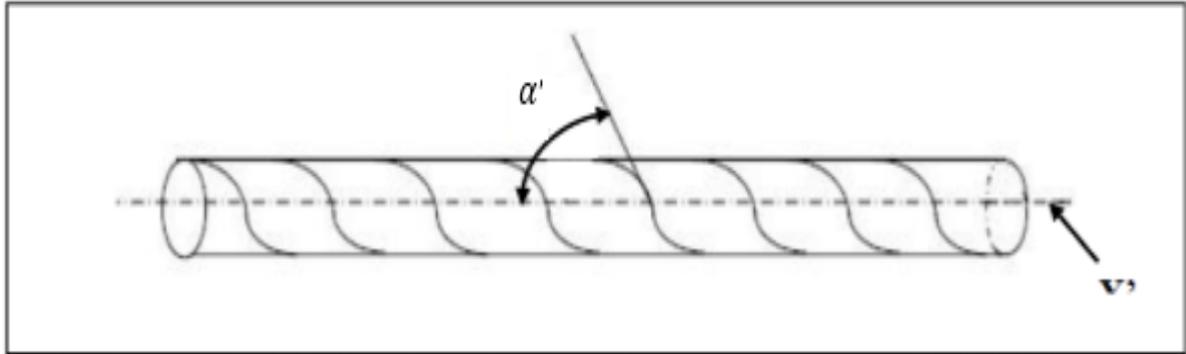


Figure I-9. L'angle d'introduction de la bande [9]

Le processus de formage ou de cintrage du tube est conditionné par l'angle d'introduction de la bande selon la relation :

$$\sin \alpha' = \frac{\beta}{\pi * D_{ext}} \quad (I.1)$$

Avec

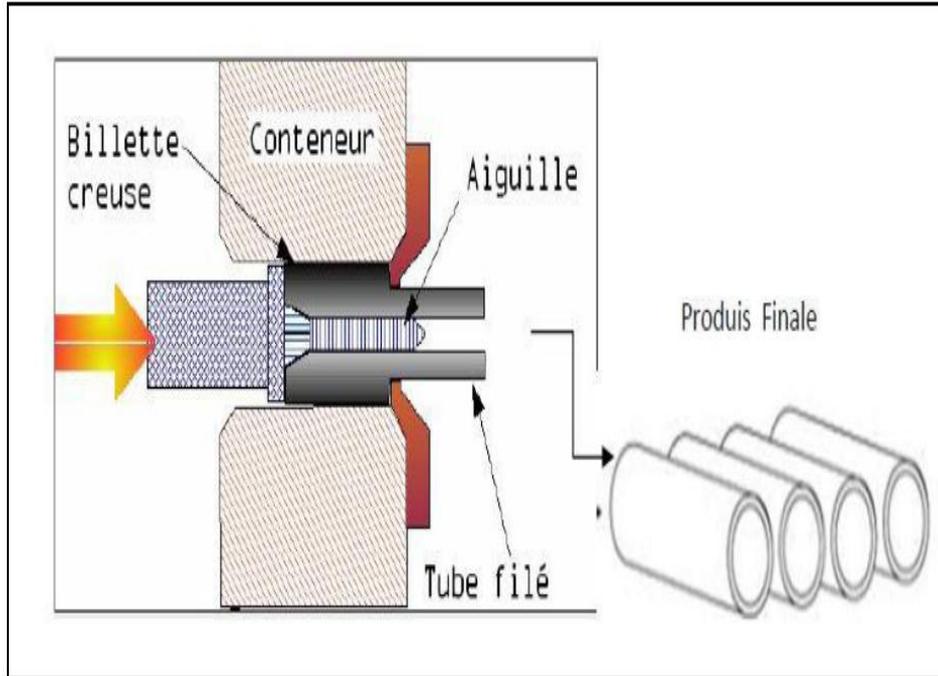
$\beta$  : La largeur de bande (mm)

$D_{ext}$  : Le diamètre extérieur de tube formé (mm)

$\alpha'$  : L'angle d'introduction de la bande par rapport à l'axe symétrique

## I.2.3. Les tubes réalisés sans soudure

Ainsi que son nom l'indique, le tube sans soudure présente une homogénéité métallurgique parfaite dans sa section, puisqu'il est issu "en masse d'un lopin d'acier". L'utilisation du tube sans soudure se situe donc surtout dans les domaines où les sollicitations mécaniques ou corrosives sont les plus exigeantes : forages pétroliers, industries mécaniques et automobiles, appareils sous pression, etc. [2]. Les méthodes principales de fabrication de ce type de tube se font de la façon suivante le métal est contenu entre la filière et l'aiguille, et par des pressions de poussées axiales, on obtient un tube monobloc sans soudure. Il existe une variante dite filage sur le nez d'aiguille où l'aiguille est fixe [3]. figure (I .10)



Figure(I.10) Obtention des tubes sans soudure [3]

### I.3. Caractéristiques des tubes

La plupart des pipelines sont faites d'acier, bien que le plastique et l'aluminium.

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...) [10] (Figure I. 11)

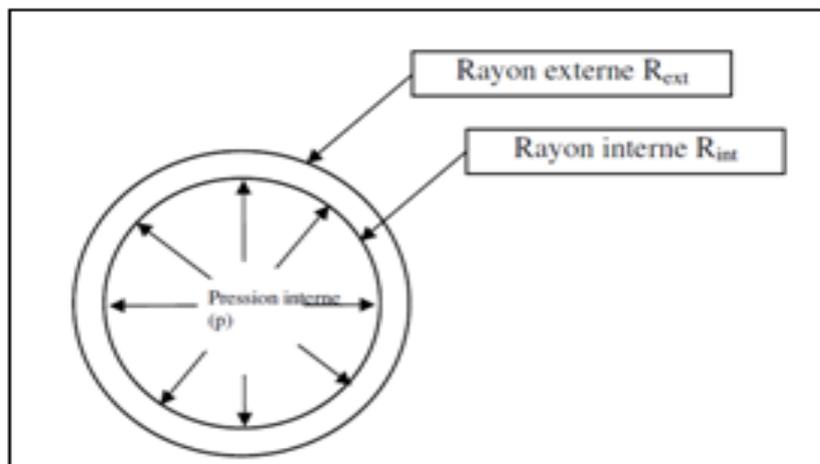


Figure I-11 : Caractéristique géométrique d'un tube sous pression interne.

## I.3.1 Dimensionnement des tubes

Épaisseur ( $t$ ) du tube à poser est donnée par :

$$t_{min} = \frac{Pms.\varnothing}{2.FC.R_e} \quad (I.2)$$

Avec

FC : Facteur de Charge

Pms : Pression maximale de service

$\varnothing$  : Diamètre

$R_e$  : Limite d'élasticité

## I.2. Caractérisation et propriétés des aciers pour pipeline

L'une des exigences du cahier des charges que doit remplir l'acier pour pipeline est la réconciliation des propriétés d'emploi ; une limite d'élasticité maximale, une bonne ténacité, ainsi qu'une bonne soudabilité, une bonne résistance à la corrosion et un faible coût de revient.

Pour répondre à ces exigences la classe des aciers dits (HSLA) (Haigh Strength Low Alloy Steels) a été développée au fil des quarante dernières années. Ces aciers à bas teneur en carbone et micro-alliés dont la microstructure ferrito-perlitique ou ferrito-bainitiques (figure I.12) ont connus des progrès considérables liés au développement des schémas de traitements thermomécaniques de laminages à température contrôlée.

95% des aciers utilisés pour gazoducs sont des aciers micro-alliés à haute résistance (HSLA).

La figure I.2 illustre les différentes propriétés d'emploi à concilier pour les aciers HSLA pour gazoducs.

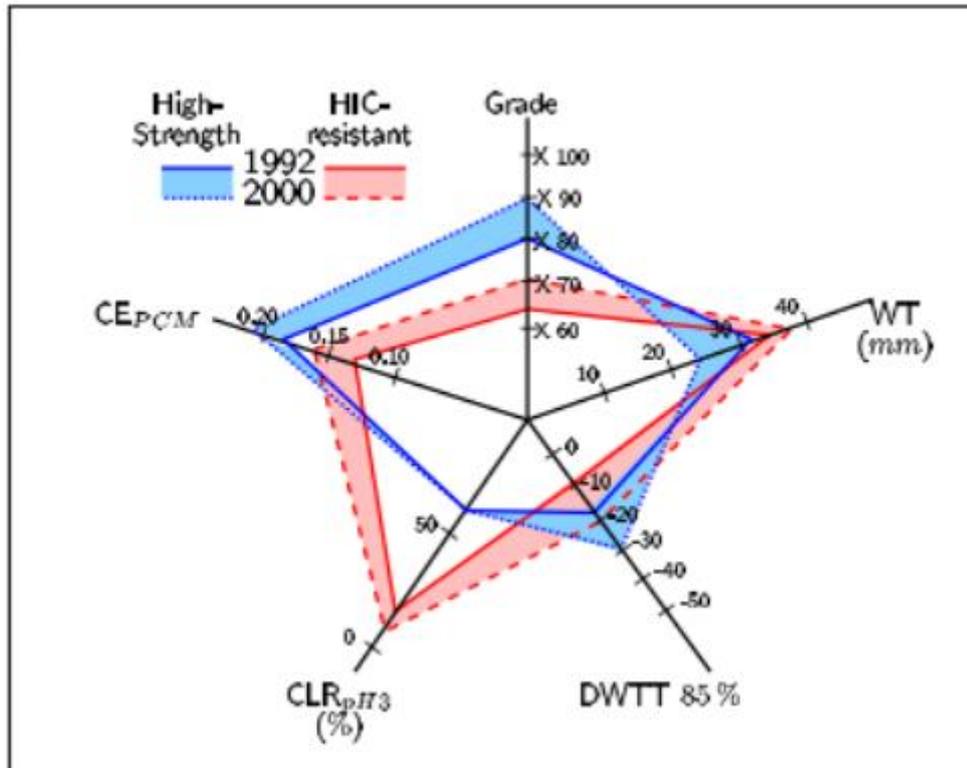


Figure I-12 : Exemple de propriétés à concilier dans un acier HSLA [11]

Grade : limite d'élasticité, WT : Wall Thickness : épaisseur ; DWTT 85% : Température de transition à 85% de rupture ductile (C°), CLR : Indice de résistance au test Hid (%), CE<sub>PCM</sub> : Carbone équivalent (soudabilité)

### I.2.1 Soudabilité

On définit la soudabilité de l'acier comme son aptitude à ne pas former de structures de trempe fragilisant durant l'opération de soudage. Compte tenu du procédé de fabrication d'un gazoduc, les propriétés de soudabilité de l'acier sont très importantes. Elles seront meilleures si la teneur en carbone est faible. Le rôle des autres éléments d'alliages n'est cependant pas négligeable. On a donc défini la notion de carbone équivalent  $c_{eq}$  qui intègre l'effet des principaux éléments d'alliage :

$$C_{eq\%} = C\% + \frac{Mn\%+Si\%}{6} + \frac{Ni\%+Cu\%}{15} + \frac{Cr\%+Mo\%+V\%}{5} \quad (I.3)$$

Les propriétés de soudabilité sont meilleures si ce paramètre  $C_{eq}$  est plus faible.

Ceci explique l'évolution des aciers pour tubes, constatée au cours des 40 dernières années est et présentée dans un diagramme (C, Ceq), figure 1.13. Aujourd'hui, la plupart des aciers utilisés pour fabriquer des tubes ont une teneur en carbone de l'ordre de 0.05%. [12]

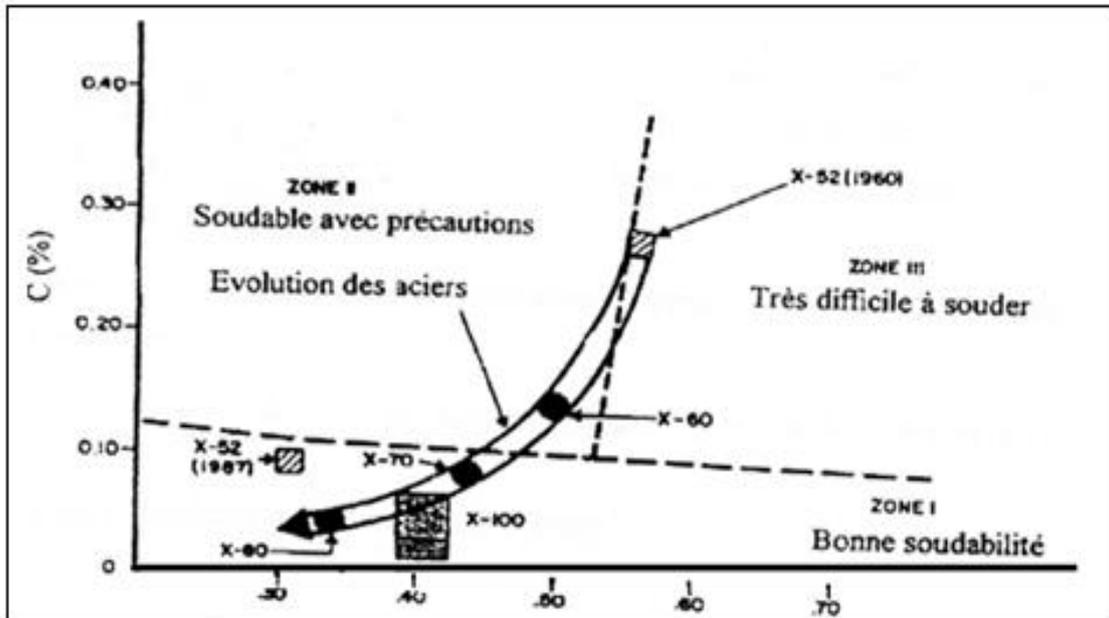


Figure 1.13 : évolution des compositions des aciers pour tubes en fonction de la soudabilité [13]

## 1.2.2. Laminage

Le laminage est conduit en deux temps (figure 1-14). la première étape est effectuée à haute température. L'austénite recristallise vite et de manière homogène. Une part très importante de la réduction d'épaisseur de la brique est appliquée dans ce domaine. au fur et à mesure que la température baisse, la recristallisation devient de plus en plus difficile. en maîtrisant bien la température et le temps entre chaque passe, on aboutit à une austénite recristallisée fine et homogène. Au cours de l'étape suivante, on amène progressivement la tôle à l'épaisseur désirée, et on confère à l'austénite de bonnes caractéristiques en vue du changement de phase  $\gamma \rightarrow \alpha$ . la dernière phase du laminage, pratiquée en dessous de la température  $T_{NR}$  de non recristallisation de l'austénite, permet d'écrouir cette phase. L'écrouissage de l'austénite favorise la germination de nombreux grains de ferrite et affine la microstructure finale [21]

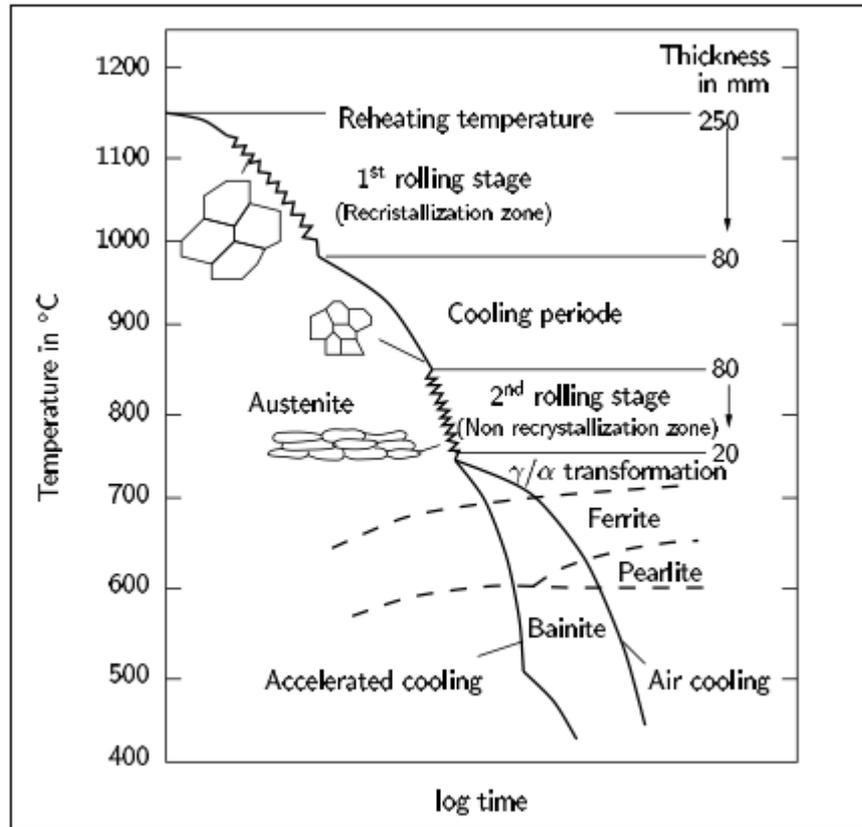


Figure I.14 Etapes caractéristiques du schéma de laminage [21]

### 1.2.3 Limite d'élasticité

L'augmentation de la limite d'élasticité a principalement été obtenue par affinement de la taille du grain ferritique et de la diminution de la température de transition.

Les travaux de halle et Petch ont permis d'explicitier le durcissement induit par une diminution de la taille du grain ferritique  $d'$ . La dépendance donnée par la relation (I.4) a depuis été bien vérifiée expérimentalement figure(I.15).

$$R_e = \sigma_0 + \frac{K_y}{\sqrt{d'}} \quad (I.4)$$

Avec  $d'$  : La taille de grain

La constante  $K_y$  rapportée dans la littérature varie entre 14 et 23 MPa mm<sup>1/2</sup>, mais communément pour les aciers, une valeur autour de 18 MPa mm<sup>1/2</sup> est la plus admise.

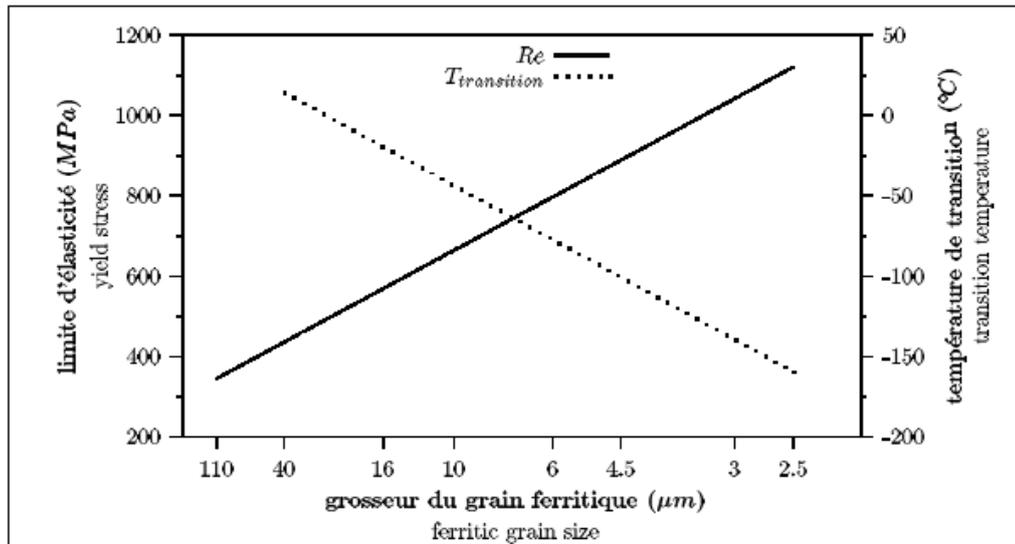


Figure I. 15. Influence de la taille du grain sur  $R_e$  et la température de transition (Acier : 0,1 % C – 0,5 % Mn – 0,2 % Si – 0,006 % N). [21]

La première caractérisation de la ténacité d'un acier est la température de transition ductile-fragile. On cherche bien sûr à diminuer celle-ci pour privilégier le domaine ductile ou la ténacité. [21] L'amélioration constante de la limite d'élasticité ( $R_e$ ) est liée au développement des tôles obtenues par laminage à température contrôlée suivi d'un refroidissement accéléré. La figure (I.16) donne l'augmentation des performances accessibles par différents procédés en termes de limite d'élasticité, pour de faibles teneurs en carbone équivalent.

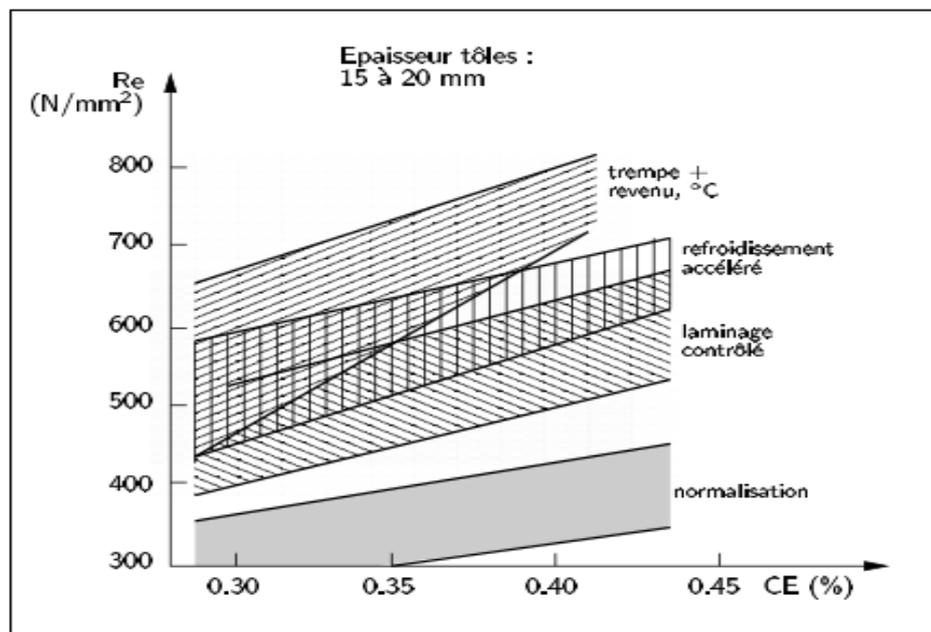


Figure I.16 Niveaux de limite d'élasticité accessible par différents traitements [21]

## I.3. Matériaux utilisés à la fabrication de pipeline

Les distances de canalisations, toujours plus importantes et un souci de rentabilité, ont poussé les compagnies gazières à changer les nuances d'aciers et à augmenter simultanément le diamètre des tuyaux, et les pressions internes. C'est pour cela que le réseau européen est composé d'une dizaine de nuances différentes (Grade A, Grade B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80,...) [16], tout en sachant que 3 de ces nuances représentent environ 70% de la diversité de ce réseau, à savoir : Grade B, X52 et X60, (figure I-17)

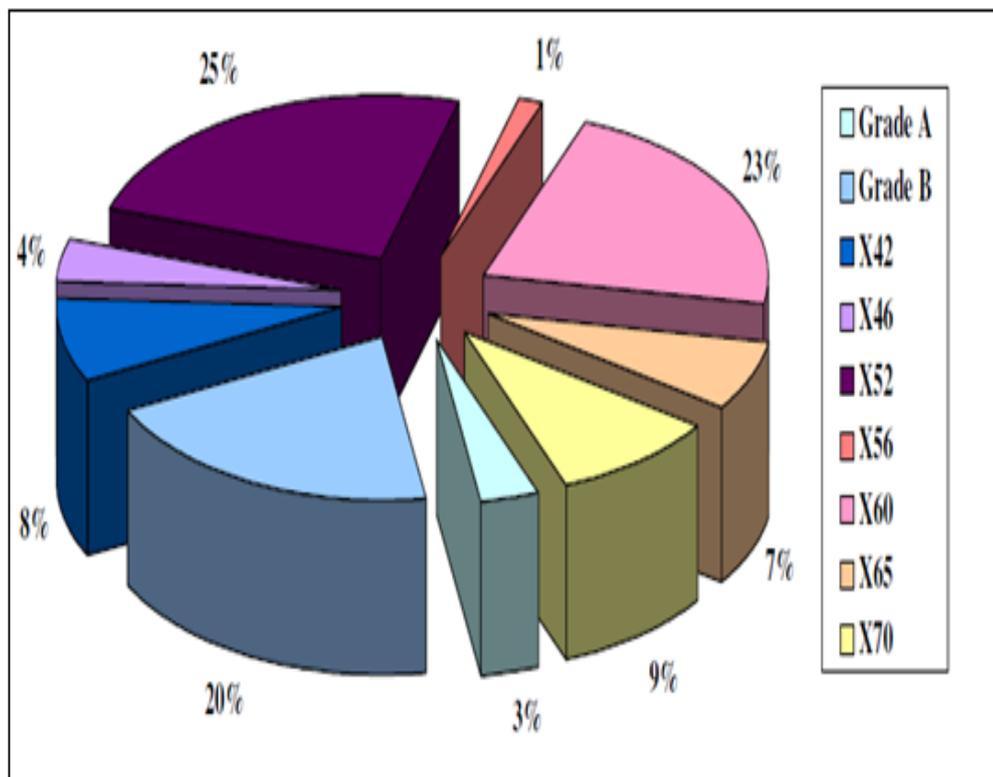


Figure I-17 : Répartition des différentes nuances d'acier composant le réseau européen en 2004.

### I.3.1 Teneur des aciers du pipeline

Les aciers des tubes peuvent être divisés en deux groupes [3] : 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. (Figure I-18) représente la Relation entre la teneur en carbone et le grade de l'acier

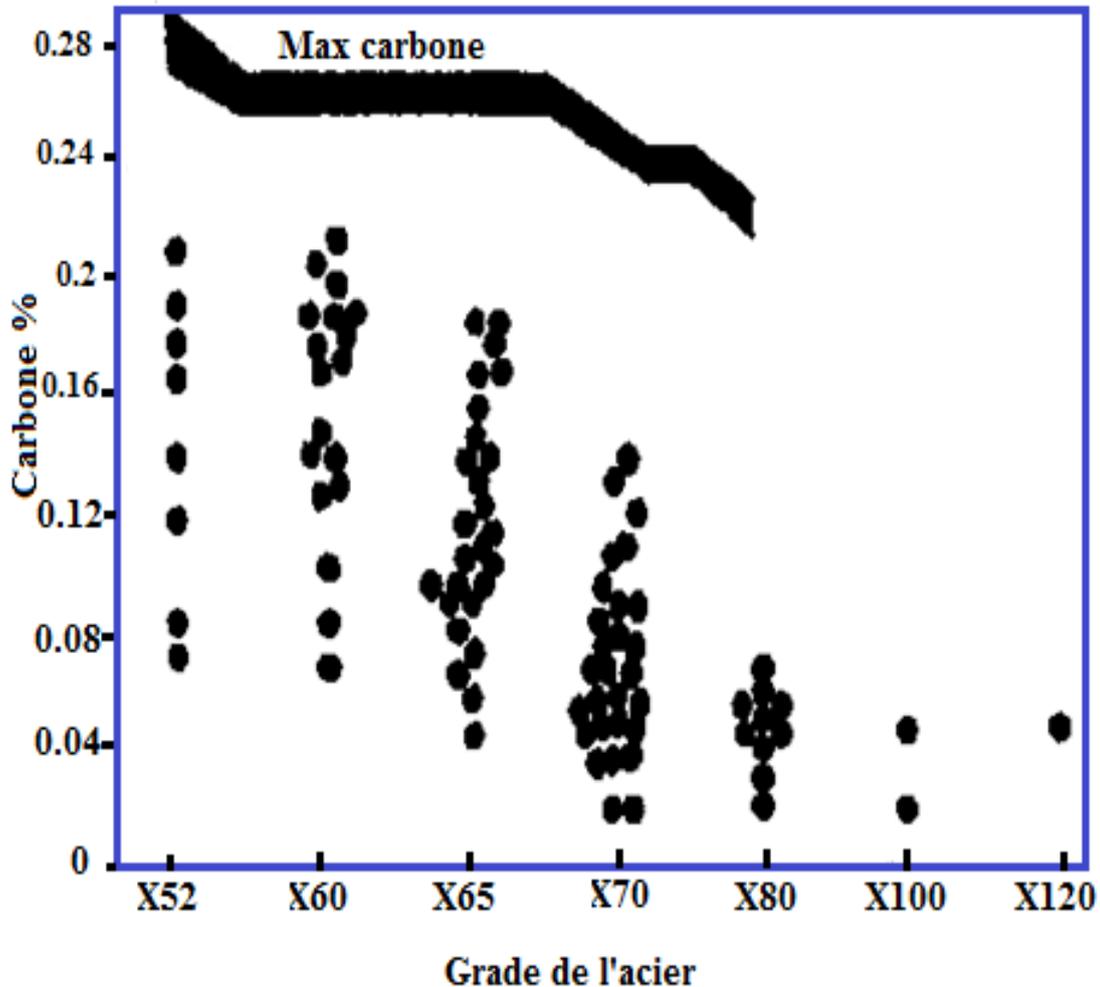


Figure I-18. Relation entre la teneur en carbone et le grade de l'acier [17]

### I.3.2. Tubes de conduite PSL 1et PSL 2

Les aciers type API 5L, Tubes de conduite PSL 1et PSL 2 utilisé beaucoup dans l'industrie de tube de pipeline [19], a certain temps nous remarquons dans ces caractéristiques les valeurs de la Résistance de rupture d'un même acier sont dévers, même chose pour la limite élastique, cela est dû aux résultats des essais expérimentales. Le tableau suivant (Tab I.1) [18] reflète la composition chimique et les Caractéristiques mécaniques de l'acier type API 5L, Tube de conduite PSL 2.

Tableau I.1. Acier au carbone couramment utilisé dans l'industrie pétrolière

Equipements		Tubes et Raccords				
Conformes à Are in agreement		Parachèvements des tubes sans soudure et soudés Pipes finishes seamless and welded API5L				
Utilisation Générale		Tubes de conduite - Steel line pipes PSL 2				
<b>Composition chimique [%]</b>						
API 5L – PSL2	X42	X52	X60	X65	X70	X80
Carbone C	Non Soudé 0,24 Soudé 0,22	SMLS 0,24 Welded 0,22	SMLS 0,24 Welded 0,22	SMLS 0,24 Welded 0,22	SMLS 0,24 Welded 0,22	SMLS 0,24 Welded 0,22
Manganèse Mn	SMLS 1,3 Welded 1,3	SMLS 1,4 Welded 1,4	SMLS 1,4 Welded 1,4	SMLS 1,4 Welded 1,45	Welded 1,65	Welded 1,85
Phosphore P	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Soufre S	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
Titane Ti	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06
<b>Caractéristiques mécaniques</b>						
Résistance rupture N/mm <sup>2</sup> min maxi	414 - 758	455 - 758	517 - 758	531 - 758	565 - 758	621 - 827
Limite élastique 0,2 % N/mm <sup>2</sup> mini maxi	290 - 496	359 - 531	414 - 565	448 - 600	483 - 621	552 - 690

Les tableaux suivants reflètent la composition chimique et les caractéristiques mécaniques des aciers type API 5L, Tubes de conduite PSL 1 avec une microstructure de chaque aciers.

Tableau I.2 Caractéristiques et microstructure de l'acier X42 Tubes de conduite PSL1

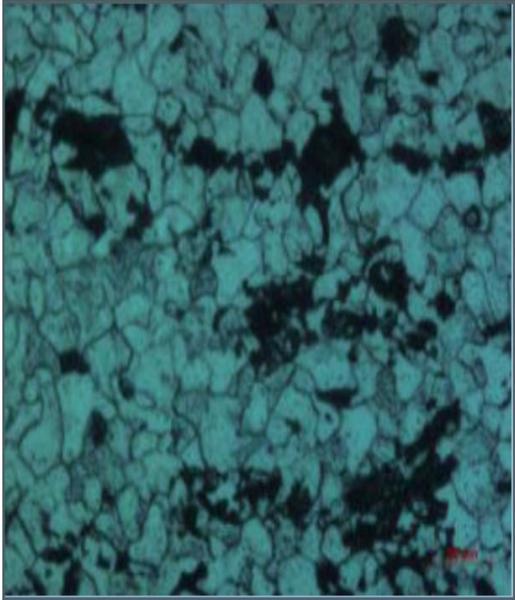
API 5L - PSL1		X42	Microstructure de l'acier X42
<b>Composition chimique%</b>			
Carbone C	SMLS 0,28 Welded 0,26		
Manganèse Mn	SMLS 1,3 Welded 1,3		
Phosphore P	0,03		
Soufre S	0,03		
Titane TI	0.04		
<b>Caractéristiques mécaniques</b>			
Résistance rupture N/mm <sup>2</sup> min maxi	414		
Limite élastique 0,2 % N/mm <sup>2</sup> mini maxi	290		

Figure I-19 microstructure de l'acier X42[3]

L'acier X42, c'est un mélange de grains de ferrite sur les limites (contours visibles), et la perlite,

Tableau I.3 Caractéristiques et microstructure de l'acier X52 Tubes de conduite PSL1

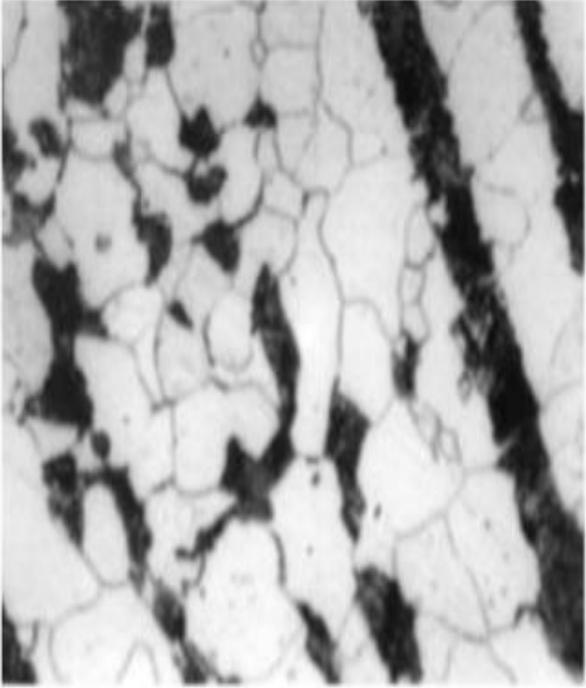
API 5L - PSL1	X52	Microstructure de l'acier X52
<b>Composition chimique%</b>		
Carbone C	SMLS 0,28 Welded 0,26	
Manganèse Mn	SMLS 1,4 Welded 1,4	
Phosphore P	0,03	
Soufre S	0,03	
Titane TI	0.04	
<b>Caractéristiques mécaniques</b>		
Résistance rupture N/mm2 min Maxi	455	
Limite élastique 0,2 % N/mm2 mini maxi	359	

Figure I-20 microstructure de l'acier X52[3]

Nous observons des bandes de perlite colorées en noir alternées avec des bandes de ferrite en blanc, On peut également dire que la ferrite est majoritaire dans cette structure.

# CHAPITRE I GENERALITES SUR LES PIPELINES ET LES ACIERS

Tableau I.4 Caractéristiques et microstructure de l'acier X60 Tubes de conduite PSL1

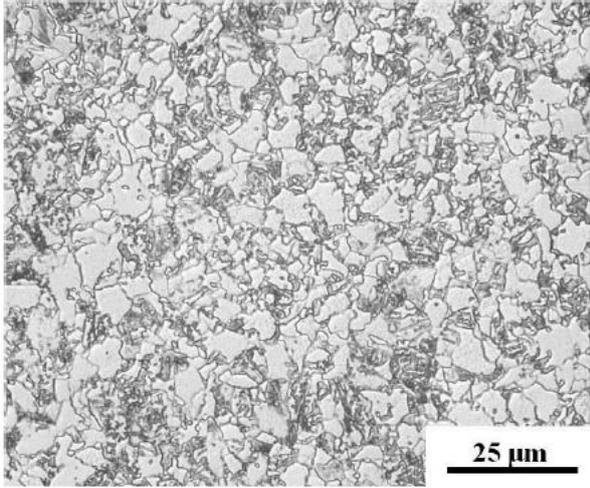
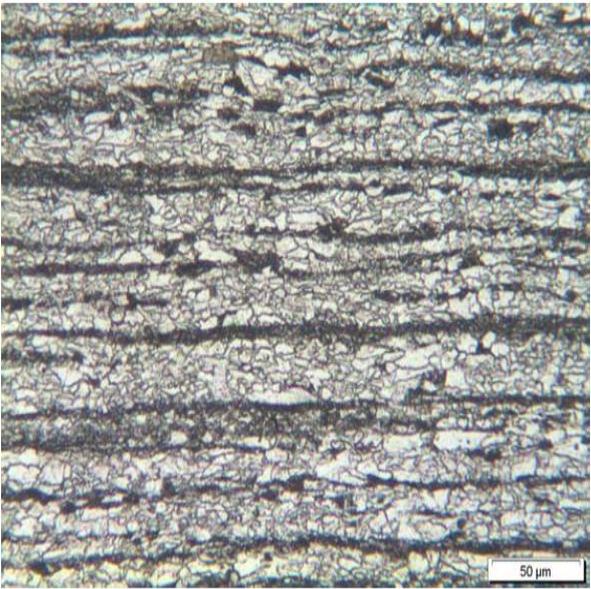
API 5L - PSL1	X60	Microstructure de l'acier X60
<b>Composition chimique%</b>		
Carbone C	SMLS 0,28 Welded 0,26	
Manganèse Mn	SMLS 1,4 Welded 1,4	
Phosphore P	0,03	
Soufre S	0,03	
Titane TI	0,04	
<b>Caractéristiques mécaniques</b>		
Résistance rupture N/mm2 min maxi	517	
Limite élastique 0,2 % N/mm2 mini maxi	414	

Tableau I.5 Caractéristiques et microstructure de l'acier X65 Tubes de conduite PSL1

API 5L - PSL1	X65	Microstructure de l'acier X65
<b>Composition chimique%</b>		
Carbone C	SMLS 0,28 Welded 0,26	
Manganèse Mn	SMLS 1,4 Welded 1,45	
Phosphore P	0,03	
Soufre S	0,03	
Titane TI	0,06	
<b>Caractéristiques mécaniques</b>		
Résistance rupture N/mm2 min maxi	531	
Limite élastique 0,2 % N/mm2 mini maxi	448	

Tableau I.6 Caractéristiques et microstructure de l'acier X70 Tubes de conduite PSL1

API 5L - PSL1	X70	Microstructure de l'acier X70
<b>Composition chimique%</b>		
Carbone C	Welded 0,26	
Manganèse Mn	Welded 1,65	
Phosphore P	0,03	
Soufre S	0,03	
Titane TI	0.06	
<b>Caractéristiques mécaniques</b>		
Résistance rupture N/mm <sup>2</sup> min maxi	565	
Limite élastique 0,2 % N/mm <sup>2</sup> mini maxi	483	

*Figure I-23 microstructure de l'acier X70 [10]*

Les aciers de type X60, X65, X70 présentent une microstructure de type ferrite-perlitique. Les bandes de perlite marquées dans les aciers de type X60, X65, X70 expliquent la sensibilité de ces aciers à la fissuration.

### I.3.3. Influence des éléments sur les caractéristiques de l'acier

On distingue les éléments d'addition à effet durcissant la ferrite. Les éléments les Plus efficaces sont ceux que l'on cherche à diminuer pour des raisons de soudabilité (carbone) ou d'amélioration des caractéristiques de résilience (phosphore, carbone, ... etc.) (Figure I.24) représente la variation de Re en fonction de teneur d'élément. Afin de ne pas rendre l'acier sensible au vieillissement et de détériorer ainsi les propriétés de résilience, l'azote est toujours présent sous une forme de combinaison. Par contre, le manganèse est le seul élément d'addition qui soit alors favorable, mais avec un effet durcissant très limité. [2]

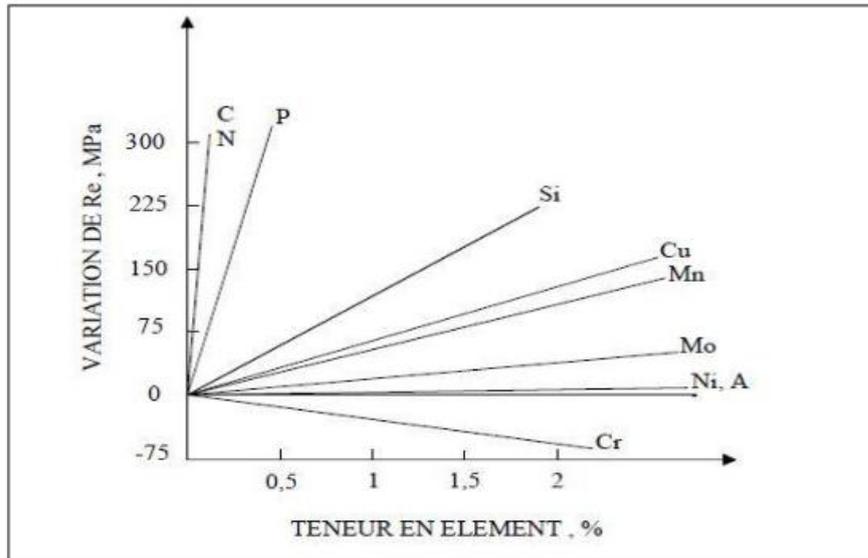


Figure I-24. Durcissement par solution solide [12]

### I.3.4 Evolution de gazoducs depuis 40 ans

Le tableau (I.7) représente l'évolution de gazoducs depuis 40 ans. [21]

Tableau (I.7) : Evolution de gazoducs depuis 40 ans.

Année	grade	Diamètre (mm)	Épaisseur (mm)	Pression maximal (bar)
1958	X52	700	8	52
1963	X60	700	8	60
1970	X65	1000	15	70
1980	X70	1300	25	100
1992	X80	1400	25	130
Diamètre (1992) = diamètre (1985)×2				
Épaisseur(1992) = Épaisseur(1985)×3				
Pression max(1992)=pression (1985)×2.5				
L' limite d'élasticité Re(1992)=Re(1958)×1.5				

## I.4 Contraintes exerçant sur une conduite

### I.4.1 Sollicitation d'un réseau

Le contenu du gazoduc et sous pression cette pression constitue une source de contrainte s'exerçant sur la paroi de la conduite. Le sol, autour du pipeline, peut bouger et constituer une autre source de contrainte les procédés de fabrication des contraintes, tel le soudage, peuvent introduire également des contraintes résiduelles.

Dans une conduite, les contraintes s'exercent dans deux directions (figure I-25) circonférentielle ment (contrainte dite circonférentielle) et longitudinalement (contrainte dite longitudinalement ou axiale).

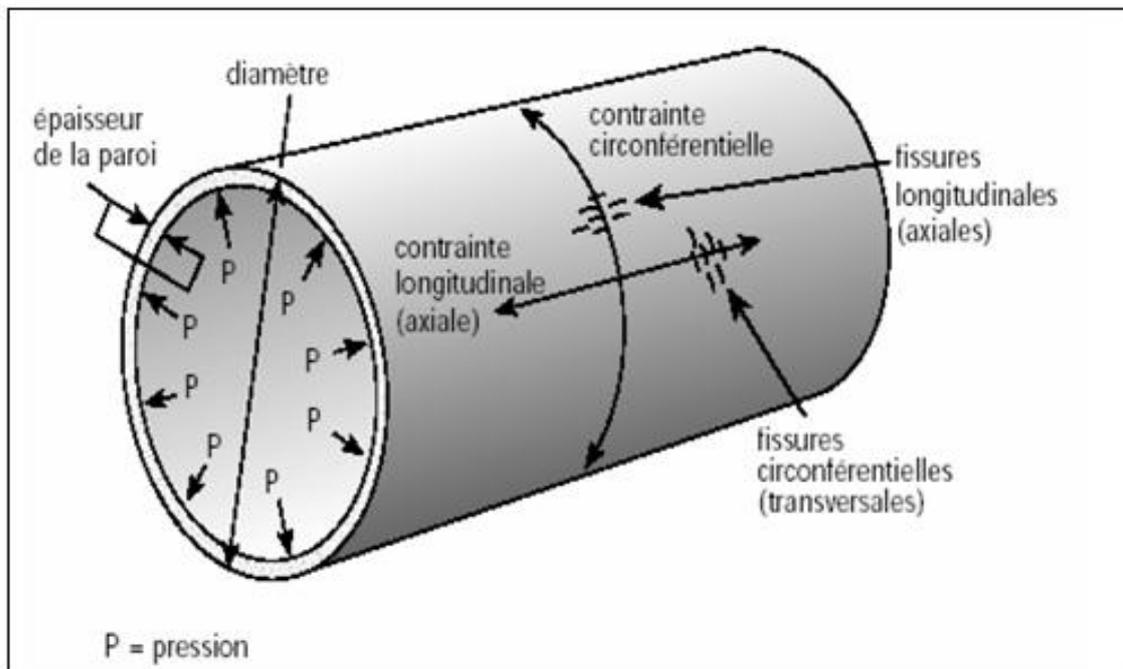
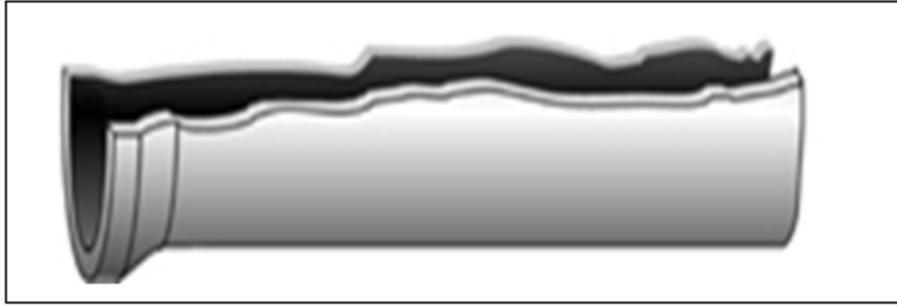


Figure I-25 différentes contraintes s'exerçant sur un conduit [19]

Les fissures de fatigue se forment de façon perpendiculaire à la direction de la contrainte principale de la traction.

Nous trouvons, le plus souvent, des fissures longitudinales (figure I-26) car les contraintes circonférentielles sont les plus élevées ; elles sont situées dans les zones de concentration de contrainte axiale élevée.



*Figure I-26 : Mode de rupture d'une canalisation dans le cas d'une fissuration Longitudinale*

## **I.4 .2 différents sources de contrainte circonférentielle**

Les différents sources de contrainte circonférentielle sont :

- ✚ La fabrication de la conduite enduit des contraintes résiduelles
- ✚ La pression interne de service est le composante de contrainte le plus importante
- ✚ La pression interne s'exerçant sur une conduite ovalisée, donne une contrainte de flexion
- ✚ Au niveau des soudures, ou associée à des stries, a des piqûres de corrosion, éraflures, nous avons naissance de concentration de contraintes
- ✚ Les tassements et glissements de terrain induisent des contraintes secondaires,
- ✚ Les changements de températures le long de l'axe du gazoduc.

## **I.4 .3 sources des contraintes longitudinales**

Les sources des contraintes longitudinales sont :

- ✚ La pression interne de service donne une contrainte pouvant atteindre le tiers, voir la moitié de la contrainte circonférentielle,
- ✚ Les glissements de terrain et tassement de sol
- ✚ La variation de température le long de l'axe du gazoduc

## Références bibliographique de chapitre I

- [1] Amina Bendjabour « Corrosion localiser des aciers API 5L-X52de la ligne ASR/MP sollicite en sol algérien » thèse de magister en sciences des matériaux, Université Tlemcen. 2011
- [2] Mammr Miloud et Zairi fadjr Eddine « Analyse des défauts dans les pipelines et caractérisation du matériau » Mémoire pour l'obtention du diplôme ingénieur d'état en génie mécanique, université Tlemcen. 2011
- [3] Hadjoui Fethi « Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines à différents grades » thèse de Doctorat en génie mécanique. Université Tlemcen. 2011
- [4] François Saint-Antonin. « Essais de fluage » Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris ENSMP Ingénieur de Recherche au Centre d'Études Nucléaires de Grenoble Commissariat à l'Énergie Atomique. M140-4
- [5] Jean Piarre Jansen. « Aciers des tubes et pièces de forme » .Société Europepe Franc 1992.
- [6] Sedrini Abdelkader. « Etude sur le comportement en endommagements des aciers API 5X65 du model weibull », pour l'obtention du diplôme ingénieur d'état en génie mécanique, université Tlemcen, 2007.
- [7] Manuel pour le transport et la distribution du gaz, Titre VI : « Matériaux utilisés pour les canalisations de transport et de distribution », Association technique de l'industrie du gaz de France, 1985
- [8] Bouziane Abdelkader, « contribution à la détermination des critères de qualité des tubes soudés soumis à une pression intérieure », thèse de magister en génie mécanique, université mhamed bougara boumerdes, 2008.
- [9] Fateh Aggoun. « Évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation »Thèse de Magister en Génie Mécanique option : Mécanique Appliquée en Engineering. 2010

[10] Bellahcen 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.

[11] Gertner A.W, Graf.M.K, hillenbrand.H.G. «Producer's view of large diameter line pipe in the next decade» the international conference on pipeline reliability. PP III-1.1-III1.15 Calgary(1992)

[12] Djdid Ibrahim « étude sur les défaillances des aciers API-5LX60 pour pipeline cas de la ligne GZ1 » Mémoire de master en génie mécanique option maintenance industriel université Tlemcen 2013.

[13] J.MGray. And poutremoli. M. «Metallurgical options for API grade X70 and X80 line pipe». In international conference: pipe technologie. Rome. PP171-191. (1987).

[14] Chunming Wang, Xingfang W. jie lie, Ning an xu. "Transmission electron microscopy of martensite, austensite, islands in pipeline steel X70". Materials science and engineering A 438-440 ,267 -176. (2006)

[15] J. Vincent-Genod. « Le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation. Institut français du pétrole ». Société des éditions technique de paris. (1989).

[16] julien cappel « Étude de la nocivité d'un défaut de type éraflure sur une conduite destinée au transport de gaz naturel soumise à une pression d'hydrogène » thèse de doctorat l'Université Paul Verlaine de Metz

[17] J.M. Gray, « Niobium bearing steels in pipeline projects», Niobium Science and Technology, Dec 2 &5, 2001.

[18] Mr Ahmed Benhamouda « étude des comportements de fissure dans les tube sous pression interne » Mémoire pour l'obtention du diplôme magister, université Mentouri Constantine .2012.

[19] Rapport de l'enquête MH-2-95, « fissuration par corrosion sous tension des oléoducs et des gazoducs canadiens », office national d'énergie ;(1996)

[20] ACPRE. «Risk management program standard“ the office of pipeline safety», American petroleum institute, association of American, national gas association of pipeline safety representatives, gas recherche institute (1996)

[21] François ravaline « développement d'acier pour gazoducs a haute limite d'élasticité et ténacité élevé : mécanique et mécanismes de la rupture ductile à grande vitesse » thèse de doctorat .l'école nationale supérieur de mines de paris en science et génie des matériaux.1998

### II.1 Aspects historiques du phénomène de fissuration par fatigue

Les débuts de la recherche sur le phénomène de la fatigue remontent aux débuts du *XIX<sup>ème</sup>* Siècle. La première étude publiée sur ce phénomène est due à un ingénieur des mines allemand du nom d'Albert ; mais c'est Poncelet qui fut le premier en 1839 à introduire le terme fatigue à propos de rupture de matériaux métalliques. [14] Au milieu du *XIX<sup>ème</sup>* siècle, les recherches se sont sensiblement développées avec l'industrialisation croissante et notamment grâce à l'essor du transport ferroviaire. Les premiers investissements importants en termes de recherches ont été déclenchés par un accident de train sur la ligne Paris-Versailles survenu le 8 mai 1842 où la rupture d'un essieu a entraîné la mort de plusieurs dizaines de personnes. En 1860, Wölher - ingénieur des chemins de fer allemands - a publié ses résultats d'essais systématiques de rupture par fatigue sur essieux de locomotive. Il a alors observé que la charge limite supportée en fatigue était bien inférieure à celle supportée en statique. Et qui est également à l'origine de la caractérisation de la fatigue par l'approche des courbes dites S-N (amplitude de contrainte - nombre de cycles à rupture), qui est encore couramment employée aujourd'hui. Enfin, il est le premier à avoir parlé du concept d'endurance limite. Dans la continuité de ces travaux, Goodman a proposé en 1899 une approche prenant en compte les contraintes non purement alternées. En 1910, Basquin a pu proposer un modèle empirique permettant de caractériser la limite d'endurance des matériaux. Plus récemment, depuis le milieu du *XX<sup>ème</sup>* siècle, Palmgren puis Miner ont proposé des règles de cumul de l'endommagement dû à la fatigue pour les sollicitations à amplitude variable. Enfin, Manson et Coffin furent les premiers à s'intéresser à l'influence de l'amplitude de déformation plastique sur la durée de vie. En ce qui concerne la fissuration, il a fallu attendre le milieu du *XX<sup>ème</sup>* siècle pour disposer des outils et concepts théoriques pour décrire le problème physique associé à la présence d'une fissure macroscopique. Les travaux de Griffith puis ceux d'Irwin ont donné naissance à la mécanique linéaire de la rupture (Linear Elastic Fracture Mechanics LEFM) et à la notion de facteur d'intensité des contraintes. C'est Paris, qui fut le premier à relier mécanique de la rupture et fatigue en suggérant que le taux de croissance d'une fissure par nombre de cycle  $da/dN$  pouvait être relié à l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes  $\Delta K$  pour un chargement cyclique à amplitude constante.

## II. 2 la mécanique linéaire de la rupture

La rupture désigne la séparation d'un corps en plusieurs parties sous l'action d'une contrainte de nature statique, c'est à dire qu'elle est constante ou qu'elle varie avec le temps. Il peut s'agir d'une contrainte de traction, de compression, de cisaillement ou de torsion. Les deux modes de rupture des matériaux à usage industriel sont la rupture ductile et la rupture fragile [1]. Une telle classification repose sur la capacité d'un matériau à subir une déformation plastique. Le comportement lié au rapport entre la contrainte de traction et la déformation à ces deux types de rupture est illustré par la (figure II.1).

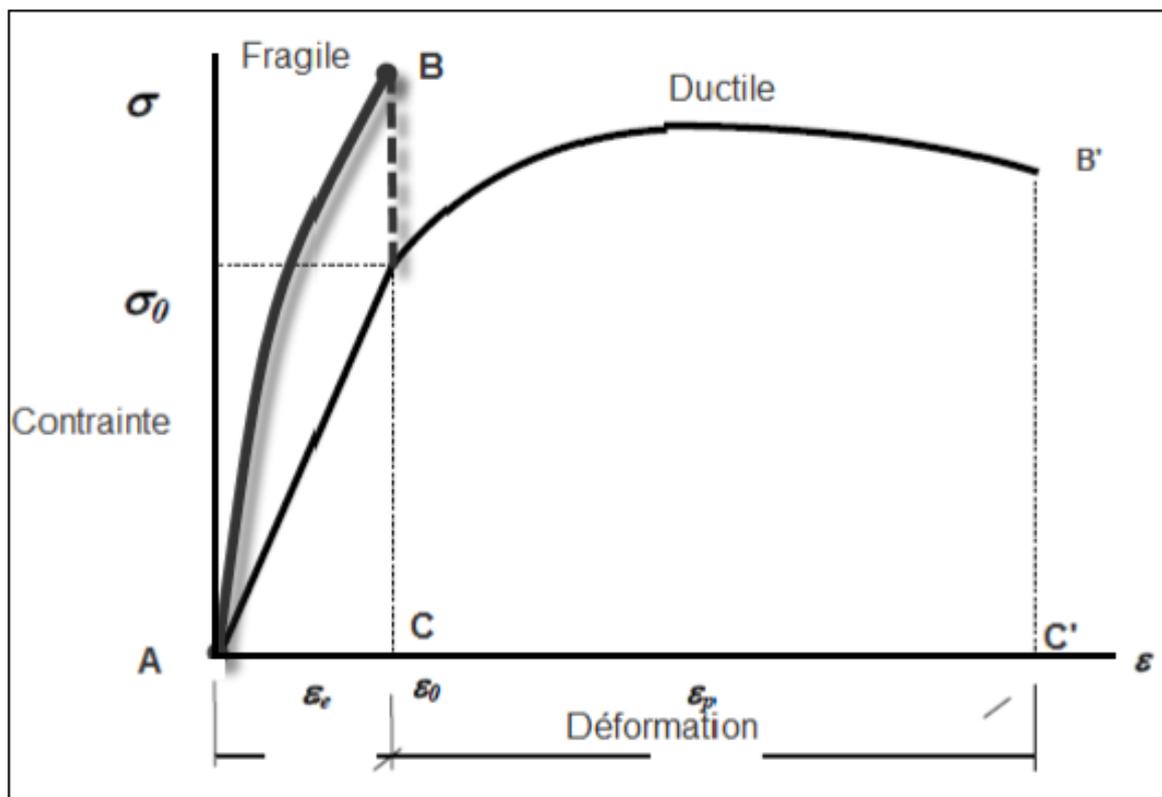


Figure II.1. Courbe contrainte/déformation [2]

La mécanique de la rupture se propose de décrire les étapes d'amorçage et de propagation de la fissuration. Selon le comportement du matériau durant la propagation d'une fissure, on peut être confronté à deux types de rupture :

**Rupture fragile** : Dans le cas d'une rupture fragile, les fissures peuvent se propager très rapidement et n'être assorties que d'une très légère déformation plastique.

De telles fissures sont dites instables, et leur propagation, une fois entamée, se poursuit spontanément en absences de toute augmentation de la contrainte appliquée. La rupture fragile est rapide survient sans déformation notable et par une énergie d'absorption faible (énergie de rupture). La direction de cette propagation est presque perpendiculaire à la direction de la contrainte de traction appliquée et il en résulte une surface de rupture relativement unie. Les surfaces de rupture fragile d'un matériau possèdent des caractéristiques qui leur sont propres et sont exemptes de toute trace de déformation plastique par exemples.

**Rupture ductile :** La rupture ductile se caractérise par une vaste déformation plastique située à proximité d'une fissure qui se propage. Elle se déroule assez lentement, à mesure que s'allonge la fissure une telle fissure est dite stable, c'est-à-dire qu'elle résiste à tout allongement ne résultant pas d'un accroissement de la contrainte appliquée. La rupture ductile est presque toujours un moindre mal, contrairement à la rupture fragile qui a un caractère soudain et brutale et a des effets imprévus en raison de la propagation spontanée et rapide de la fissure. En réparation, la présence d'une déformation plastique signale l'imminence d'une rupture et rend donc possible l'application de mesures préventives. Une rupture ductile nécessite plus grande énergie de déformation, car les matériaux ductiles sont généralement plus tenaces. Sous l'action d'une contrainte de traction, la plupart des alliages métalliques sont ductiles, tandis que les céramiques sont particulièrement fragiles et que les polymères sont exposés aux deux types de rupture.

### II.2.1 Le Critère d'énergie

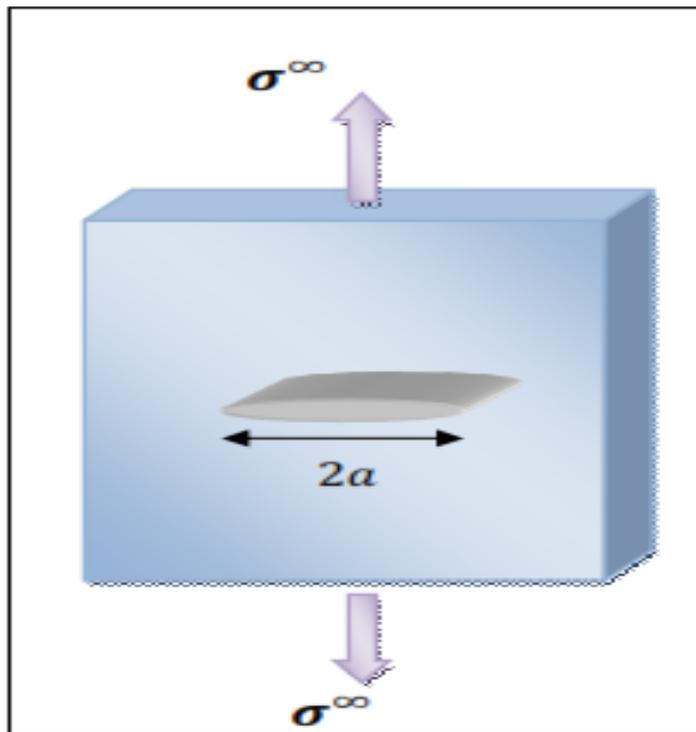
L'approche énergétique est basée sur le postulat suivant : l'extension d'une fissure qui conduit à la rupture se produit lorsque l'énergie fournie est suffisante pour vaincre la Résistance du matériau. Griffith fut le premier à proposer un critère d'énergie pour la rupture des matériaux fragiles, qui fut ensuite étendu aux matériaux ductiles par d'autres auteurs : Irwin et Orowan. L'énergie de Griffith notée  $G$  (qu'on appelle aussi taux de restitution d'énergie) est définie par la variation d'énergie par unité de surface fissurée, associée à la propagation d'une fissure dans un matériau linéaire élastique. La rupture se produit lorsque  $G$  atteint une valeur critique  $G_C$ ,  $G_C$  est une mesure de la ténacité du matériau.

Pour une fissure de longueur  $2a$  (figure II.2) dans une plaque de dimensions infinies (ce qui équivaut à dire que la longueur de fissure est très petite par rapport aux dimensions de la plaque dans la plan de chargement), constituée d'un matériau de module d'Young  $E$  et Soumise à une contrainte de traction, l'énergie de Griffith  $G$  par unité de surface fissurée est donnée par :

$$G = \frac{\pi(\sigma^\infty)^2 a}{E} \quad (\text{II.1})$$

Si on continue à augmenter la contrainte appliquée  $\sigma^\infty$ , la rupture se produira lorsque l'énergie  $G$  atteint sa valeur critique pour une contrainte appliquée  $\sigma_R$ . On a alors d'après la Relation (II.1)

$$G_c = \frac{\pi\sigma_R^2 a}{E} \quad (\text{II.2})$$



*Figure. II.2 Fissure traversant de longueur  $2a$  dans une plaque infinie.*

### **II.2.2 Modes de ruptures**

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 et les trois composantes vectorielles de cette discontinuité forment les trois modes de rupture (Figure II.3) [3]

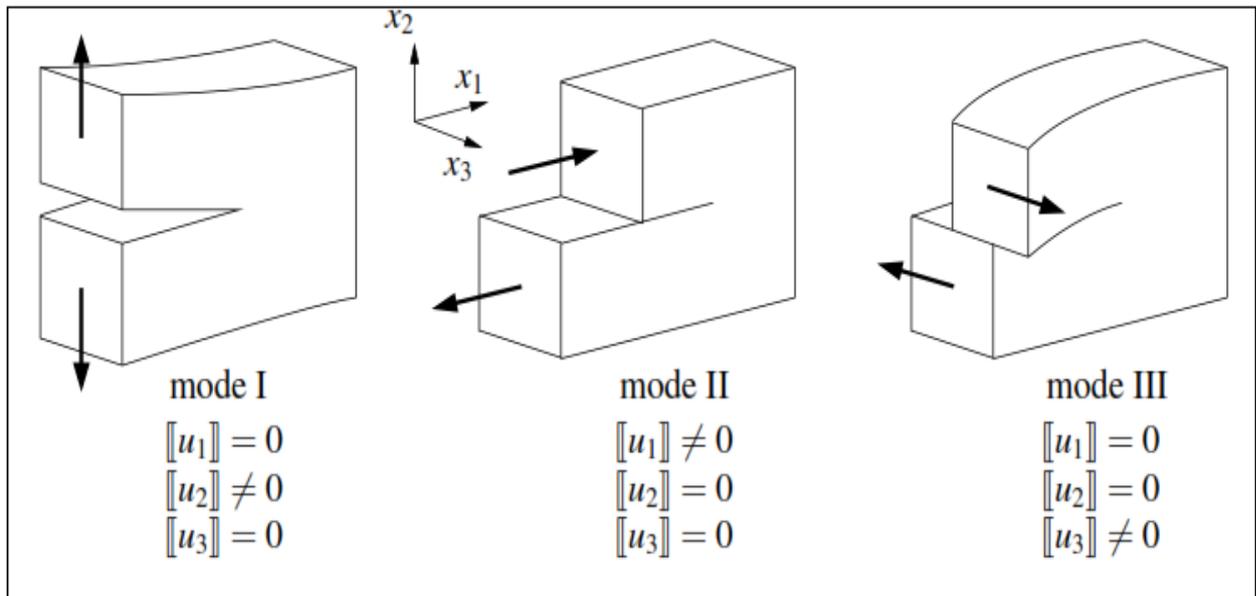


Figure II.3. Les trois modes élémentaires de rupture

**Mode I :** Mode d'ouverture (Contrainte de traction appliquée perpendiculairement au plan de la fissure).

**Mode II :** Mode glissement plan (scission dans le plan de la fissure et appliquée perpendiculairement au front de la fissure).

**Mode III :** Cisaillement anti-plan (scission dans le plan de la fissure et appliquée parallèlement au front de la fissure).

Dans le cas général, la surface de rupture se développe suivant une combinaison de ces trois modes. Notons que les ruptures brutales résultent souvent de la propagation des fissures en mode I (Figure II.4). C'est la raison pour laquelle la mécanique de la rupture s'intéresse plus particulièrement à ce mode.

### II.2.2.1 Distribution des contraintes à la pointe de la fissure en mode I

Le champ de contraintes au voisinage de la pointe de fissure en mode I (figure II.4) est décrit par système d'équations suivant : [4]

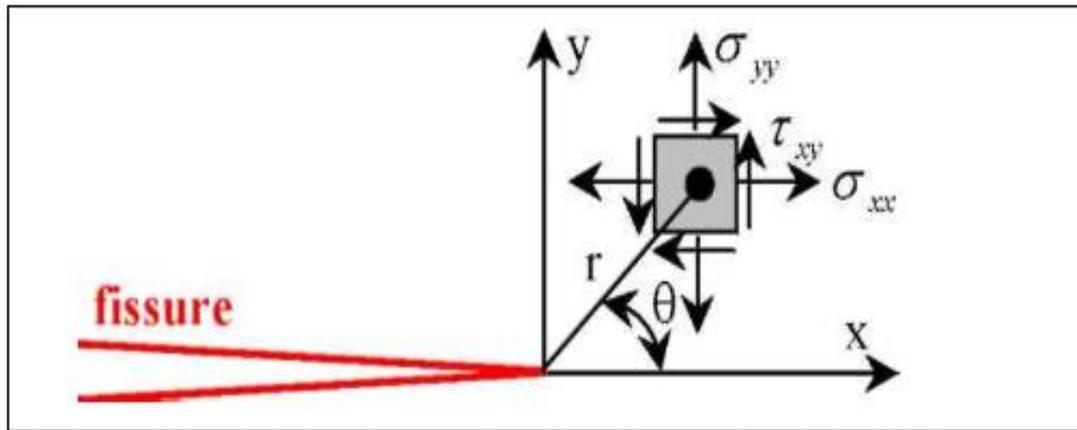


Figure II.4. Définition des axes (x, y) et des coordonnées (r, θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure

$$\begin{cases} \sigma_{xx}(\theta) = \frac{k_1}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2}) \\ \sigma_{yy}(\theta) = \frac{k_1}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2}) \\ \sigma_{xy}(\theta) = \frac{k_1}{\sqrt{2\pi r}} \cdot (\cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2}) \\ \sigma_{zz}(\theta) = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \\ \sigma_{zz}(\theta) = 0 \end{cases} \quad \text{(II.3)}$$

en déformation plane.  
en contrainte plane.

KI représente le facteur d'intensité de contrainte introduit par Irwin [5] en 1957 caractérisant la cinématique des mouvements des fissures.

Le facteur d'intensité de contrainte est défini en fonction de la distribution des contraintes  $\sigma_{yy}$  par la relation :

$$k_I = \sqrt{2\pi} \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{yy}(r, \theta) f^{1/2} \quad \text{(II.4)}$$

Le facteur K rassemble à lui tout seule l'influence de la dimension de la fissure, des forces appliquées et de la géométrie de la pièce fissurée.

### II.2.3 Zones plastiques à fond de fissure

En avant d'une fissure par fatigue, on distingue trois zones (Figure II-5) [6] :

- ✚ La plus éloignée du fond de fissure où les déformations restent essentiellement élastiques.
- ✚ Une seconde où les déformations plastiques sont faibles et uniformes. Cette zone est créée lors de l'ouverture de la fissure.
- ✚ Une troisième où les déformations sont importantes, en particulier au voisinage immédiat de l'extrémité de la fissure.

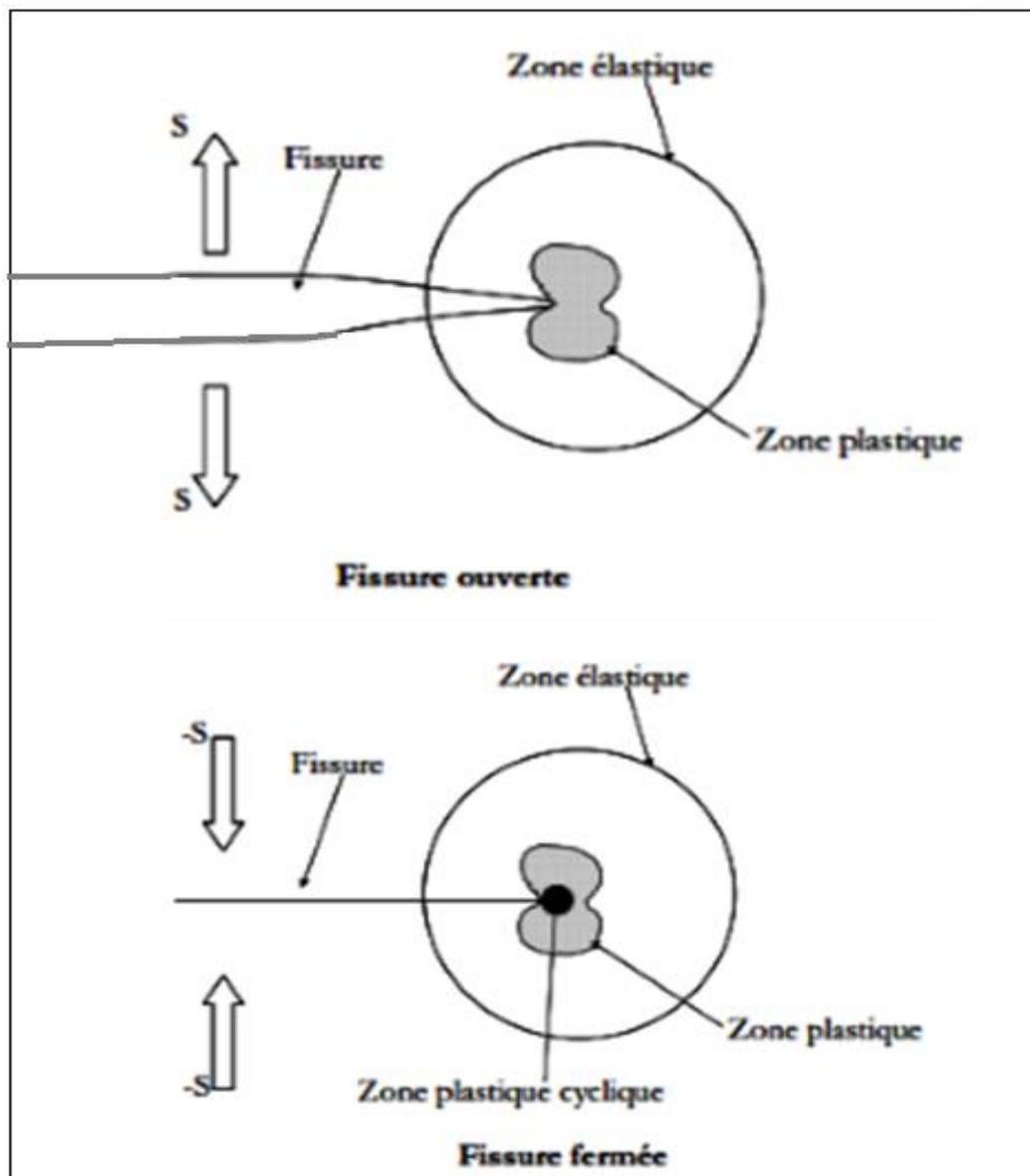


Figure II-5 : Schématisation des zones de déformation en avant de la fissure.

**II.2.4. Influence de l'état de contrainte sur la taille de la zone plastique**

En contrainte plane, la composante  $\sigma_{zz}$  est nulle. De plus si l'on fait l'hypothèse simplificatrice que les composantes  $\sigma_{xx}$  et  $\sigma_{xy}$  n'interviennent pas dans la plastification en fond de fissure, la seule composante active est donc  $\sigma_1 = \sigma_{yy}$  pour ( $\theta = 0$ )

On a: 
$$\sigma_1 = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \tag{II.5}$$

Au cours du chargement, la contrainte  $\sigma_1$  atteint localement la limite d'élasticité  $R_e$ , il y aura alors plastification à la pointe de la fissure dans une zone telle que :

$$\sigma_1 = R_e = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r_y}} \tag{II.6}$$

Soit : 
$$r_y = \frac{K_I^2}{2\pi R_e^2} \tag{II.7}$$

Ce modèle simple défini par Irwin, en contraintes planes, fait l'hypothèse que la forme de la zone plastique est circulaire (Figure. II.6). et que le matériau est élastique parfaitement plastique. En réalité, la taille de cette zone dépend de nombreux paramètres tels que l'état de contraintes, le mode de rupture, etc.

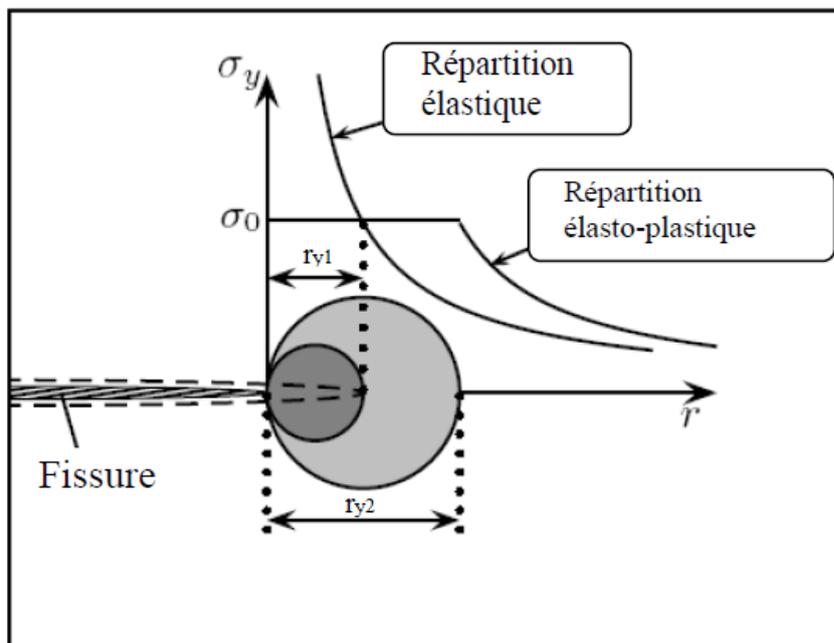


Figure. II.6 Première estimation de la zone plastifiée.

Dans la zone plastique en déformations planes, la limite d'élasticité peut être multipliée par un facteur de quelques unités en raison du confinement de la plasticité. Broek a proposé d'utiliser un facteur d'entrave à la plasticité défini par la relation :  $L = \sigma_{max}/R_e$  est égal à trois. En déformation planes, l'équation (II.7) devient :

$$r_{y,Dp} = \frac{K_I^2}{2\pi(LR_e)^2} = \frac{K_I^2}{18\pi R_e^2} \quad (\text{II.8})$$

On voit donc que la taille de la zone plastique en déformation planes  $r_{y,Dp}$  est 9 fois que celle en contraintes planes. Comme les surfaces de l'éprouvette ne sont pas en déformations planes, la valeur moyenne du facteur d'entrave à la plasticité est inférieure à trois.

### II.3 Endommagement par fatigue

La fatigue est une forme de défaillance qui se produit dans des structures (ponts, aéronefs, pièces de machines, etc.) subissant des chargements cycliques constants, variables ou aléatoires. Elle est susceptible de se manifester même lorsque la contrainte est nettement inférieure à la résistance à la traction ou à la limite conventionnelle d'élasticité dans le cas d'une charge statique. Une telle défaillance porte le nom de fatigue parce qu'elle succède habituellement à une longue période de cycles de déformation et de contrainte [1].

La contrainte appliquée peut être Contraintes mécaniques : Lorsqu'une charge ou une force est appliquée à un matériau, cette contrainte est assimilée à une traction ou une compression, à une flexion ou à une torsion. Dans de nombreux matériaux, les contraintes appliquées peuvent avoir un ou plusieurs effets, 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.

La contrainte peut être aussi une contrainte résiduelle : 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, soudée 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 absence de l'application de charges externes (force appliquée, déplacement d'un gradient thermique).

### II.3.1. Variation du chargement appliquée

Les chargements appliqués peuvent prendre plusieurs formes : spectres (Figure II.7) :

- ✚ La contrainte varie de façon régulière et sinusoïdale en fonction du temps.
- ✚ Les contraintes max et min sont asymétriques par rapport à une contrainte nulle.
- ✚ Le cycle de contraintes variables.

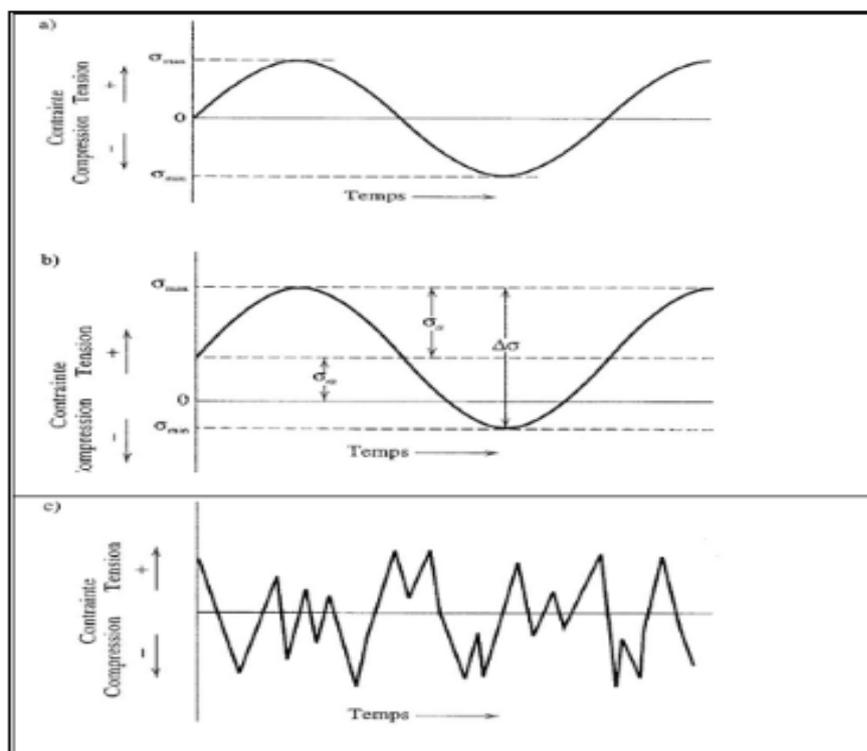


Figure II.7 Variation du chargement appliquée en fonction du temps

Selon l'amplitude de la contrainte, on peut définir deux grands domaines : la fatigue endurance et la fatigue oligocyclique [15] :

**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.

**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).

### II.3.2 Mécanismes physiques de défaillance en fatigue

Défaillance en 4 étapes :

1. Amorçage d'une fissure
2. Propagation d'une fissure « courte » (stade I)
3. Propagation d'une fissure « longue » (stade II)
4. Rupture finale (brutale)

### II-4 Amorçage de fissures de fatigue

Plusieurs définitions sont utilisées dans la littérature : variation de la rigidité de l'éprouvette, apparition d'une fissure de quelques microns, chute de la charge supportée par l'éprouvette [7]. La phase d'amorçage est généralement constituée par la nucléation et la croissance de fissures « courtes » mais la longueur seuil de fissure à laquelle l'amorçage se produit manque de définition uniforme. Plusieurs auteurs pensent que la phase d'amorçage d'une fissure de fatigue est de durée négligeable et qu'il existe des « petites » fissures de taille comparable à celle d'un défaut microstructural. Ces fissures se manifestent dès les premiers cycles de sollicitation [8].

#### II.4.1 Mécanismes d'amorçage des fissures de fatigue.

Bien que les défauts existent dans toutes les pièces soumises à la fatigue, irrégularités de surface ou inclusions, provoquant des concentrations de contrainte locales très élevées conduisant à la rupture rapide par formation de microfissures particulièrement dangereuses, ils ne sont pas les seuls sites d'amorçage des fissures. Dans de nombreux cas où le matériau est globalement soumis à des contraintes inférieures à sa limite d'élasticité, il y a formation de bandes de glissement persistantes dans certains grains. Ces bandes de glissement peuvent donner lieu à des microfissures permanentes par formation d'intrusions et d'extrusions [9] ou par réunion entre elles. Le mécanisme de formation des intrusions et extrusions à la surface est illustré sur la (Figure II-8).

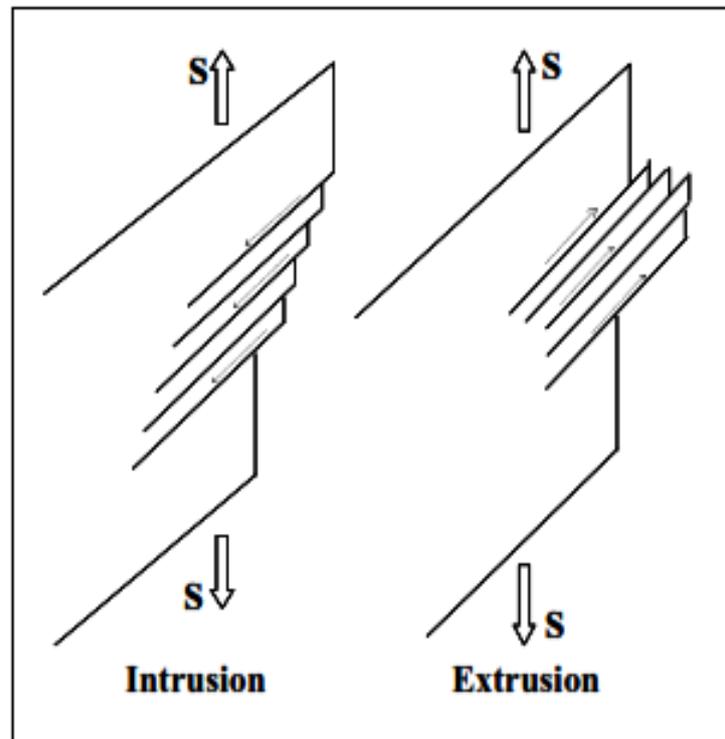


Figure II-8 : Formation d'intrusions et extrusions dans des bandes de glissement

### II.5 Propagation de fissures

Cette situation donne lieu, pour l'évaluation de la tenue de pièces en fatigue, à une approche basée sur des données de propagation de fissures. Dans le cas d'un défaut préexistant dans la pièce ou de l'apparition d'une fissure, deux types de problèmes peuvent être traités :

- ✚ évaluation de la vitesse de propagation de la fissure (ou du défaut assimilé à une fissure) de manière à estimer la durée de vie résiduelle de la pièce. Ce problème se traite parfaitement en utilisant la Mécanique de la Rupture.
- ✚ évaluation du chargement pour lequel la fissure ne se propage pas.

#### II.5.1 Propagation de fissures de fatigue

Comme nous venons de le voir, les fissures de fatigue s'amorcent généralement à la surface du matériau, en un ou plusieurs endroits, la propagation est souvent transgranulaire dans une direction cristallographique définie, même lorsque l'amorçage est intergranulaire, c'est le stade I (état de contraintes planes). Ensuite, intervient le stade II au cours duquel la fissure quitte le plan de scission maximale pour se propager dans le plan de contrainte normale, c'est-à-dire perpendiculaire à la contrainte principale maximale (état de déformation plane) (Figure II-9) [10].

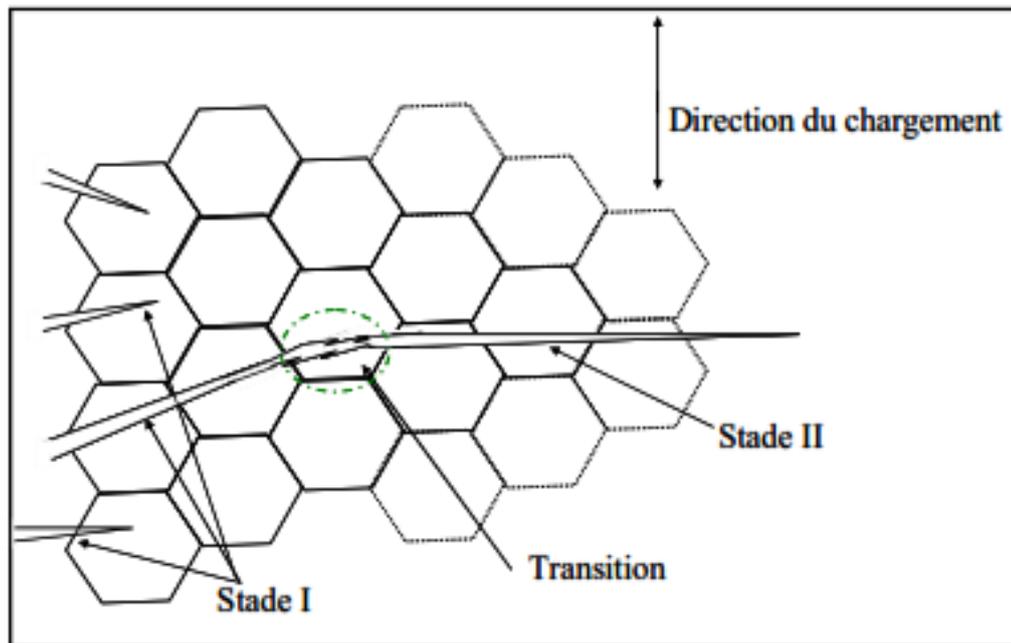


Figure II-9 : Stades I et II de la fissuration par fatigue.

La surface fissurée dans le stade I est très limitée par rapport à la surface totale de rupture bien que ce stade présente une durée de vie importante. Dans plusieurs cas, la fissure peut s'amorcer directement en stade II sans passer par le stade I. [11].

### II.5.2 Description des courbes de propagation de fissures

L'interprétation de la courbe de dommage repose sur l'existence d'une taille critique de fissure, qui dépend de la contrainte maximale atteinte au cours des cycles, et au-dessus de laquelle la propagation serait irréversible et conduirait à la rupture.

On a donc cherché à suivre la progression des fissures au cours de la fatigue. Si elles débouchent en surface, ce qui est le cas général, et si la méthode utilisée est suffisamment sensible, leur observation est possible à partir d'une longueur de 0,01 mm à 0,1 mm suivant la résolution du système de suivi de la longueur des fissures.

La façon la plus simple de représenter la progression des fissures est de rapporter leur profondeur en fonction du nombre de cycles subis par l'éprouvette d'essai. Le nombre de cycles  $N$  pouvant être très élevé (quelques millions de cycles), on utilise l'échelle logarithmique pour le représenter.

La Figure (II.10) représente schématiquement ce type de courbe.

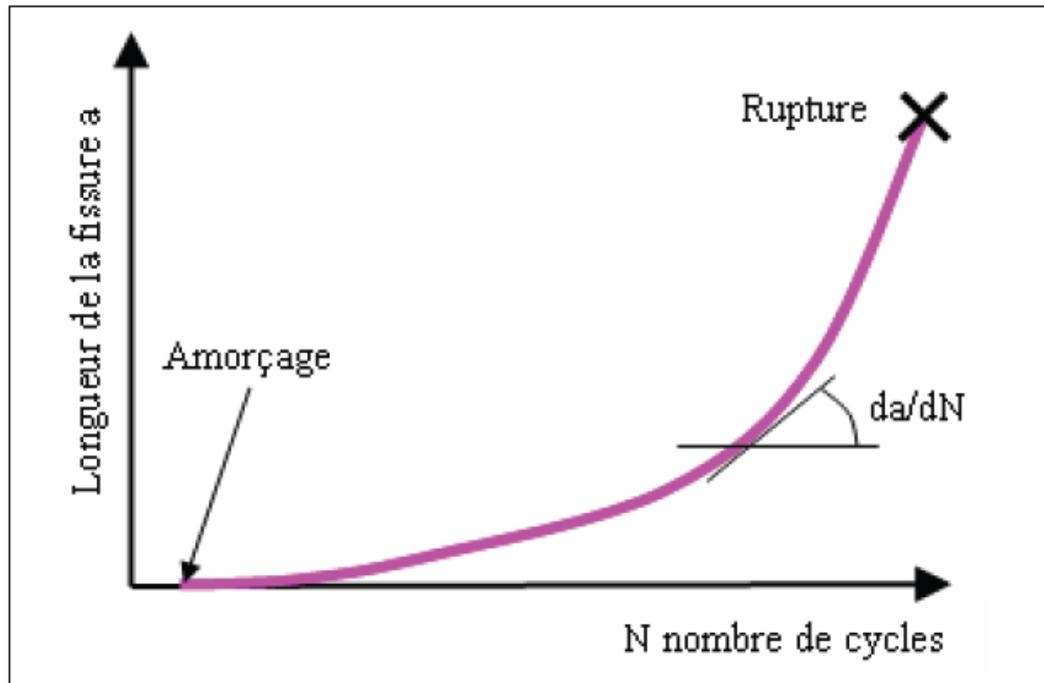


Figure II.10 : Longueur de fissure en fonction du nombre de cycle

On peut, à partir des enregistrements de la longueur de fissure  $a$  en fonction du nombre de cycles  $N$ , tracer la vitesse de fissuration  $da/dN$  en fonction d'un paramètre caractérisant le chargement (la contrainte alternée  $\sigma_a$  ou la déformation totale par cycle  $\varepsilon\sqrt{a}$  pondérée par la longueur de fissure). Le développement de la Mécanique de la Rupture a permis, grâce notamment à l'utilisation du facteur d'intensité des contraintes (FIC) noté  $K$ , de mieux étudier quantitativement les stades de propagation lente et de propagation brutale des fissures de fatigue.  $K$  est proportionnel à  $\sigma_a\sqrt{a}$ . L'approche s'appuyant sur le FIC est la plus utilisée pour décrire la propagation des fissures de fatigue, tant que la plastification en pointe de fissure qui accompagne la propagation reste confinée dans une zone de taille faible par rapport à la longueur de la fissure et aux dimensions de la structure fissurée. On a pu, avec cette approche, traiter de nombreux cas pratiques où l'on a observé des fissures préexistantes dans une structure. Les résultats expérimentaux montrent que les variations de la vitesse de fissuration en fonction de l'amplitude du FIC présentent, l'allure décrite sur la (Figure II.11) :

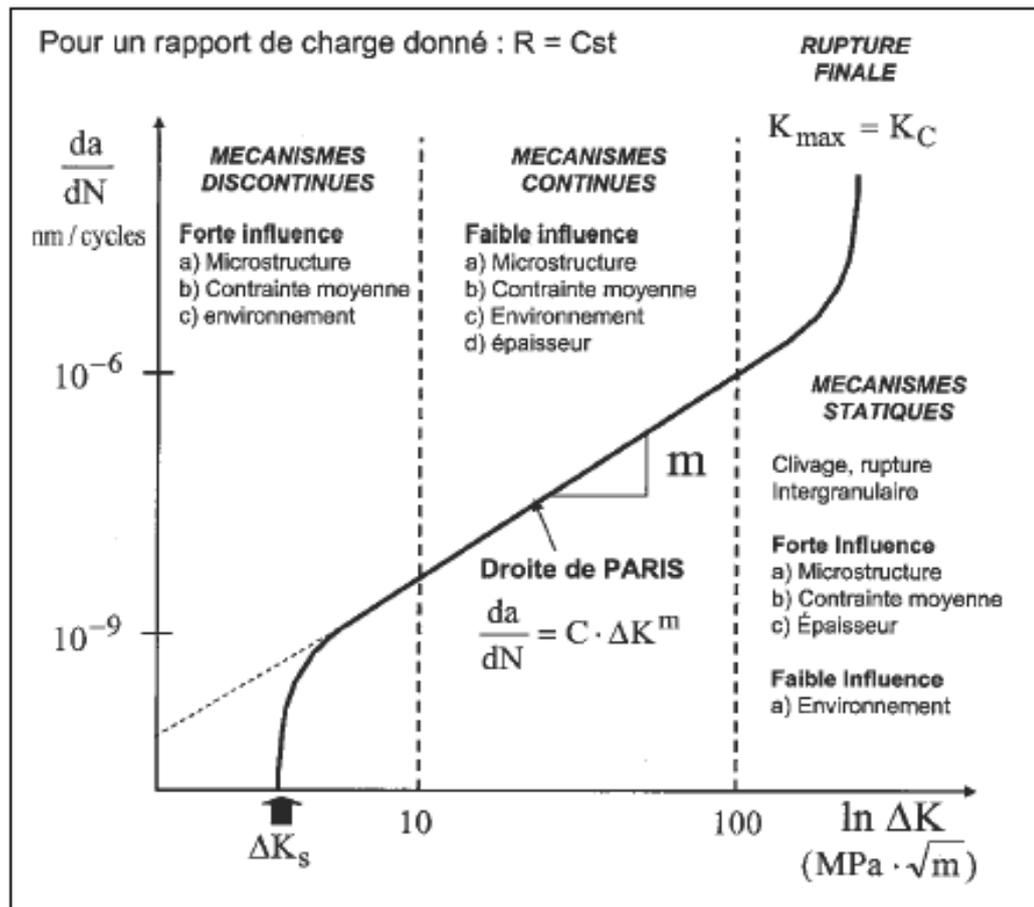


Figure II.11 : Exemple de courbe de propagation.

On distingue habituellement trois domaines dans la propagation des fissures « longues » :

**Domaine I :** domaine des faibles vitesses de fissuration où les effets de l'environnement et de la microstructure sont prédominants. Pour décrire ce domaine, on effectue Généralement des essais à  $\Delta_k$  ( $\Delta_k = K_{max} - K_{min}$ ) décroissant pour déterminer la valeur de  $\Delta k_{seul}$ .

**Domaine II :** domaine des vitesses moyennes ou de Paris où la vitesse de propagation varie linéairement avec  $\Delta_k$  en échelle bi-logarithmique. La fissure se propage le plus souvent dans un plan perpendiculaire à la direction de l'effort appliqué. C'est le domaine où s'applique la loi de Paris.

**Domaine III :** domaine correspondant au cas des chargements élevés pour lesquels une déchirure se produit dans le matériau en pointe de fissure. Les vitesses de propagation Sont très élevées et conduisent très vite à la rupture de la pièce (pour  $k_{max} = k_{IC}$ )

Pour décrire la partie linéaire de cette courbe (domaine II), Paris proposa la relation empirique

$$\frac{d_a}{d_N} = C(\Delta K)^m \quad (\text{II.9})$$

La loi proposée par Paris ne décrit pas la totalité de la courbe ; cependant, d'autres lois empiriques ou analytiques ont été proposées pour décrire l'ensemble de la courbe de propagation. Forman, pour tenir compte de l'augmentation asymptotique de la vitesse de fissuration lorsque  $k_{max} \rightarrow k_{IC}$ , proposa une amélioration de la relation de Paris pour décrire les domaines II et III de la courbe de propagation :

$$\frac{d_a}{d_N} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)(k_{IC} - k_{max})} \quad (\text{II.10})$$

Avec : 
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{k_{min}}{k_{max}}$$

Pour rendre compte de l'effet de seuil dans la région I, Klesnil et Lucas [12] proposèrent quant à eux une modification de la relation sous la forme :

$$\frac{d_a}{d_N} = C(\Delta K^m - \Delta k_{seuil}^m) \quad (\text{II.11})$$

Frost a alors proposé une relation qui rend compte de l'ensemble de la courbe de propagation, Établie pour des aciers ferrito-perlitique [13] :

$$\frac{d_a}{d_N} = B \left[ \frac{(\Delta K - \Delta K_{Seuil})^4}{R_m^2 (K_{IC}^2 - K_{max}^2)} \right]^n \quad (\text{II.12})$$

$K_{IC}$  désignant la valeur critique du facteur d'intensité de contraintes,  $\Delta K_{Seuil}$  est la valeur de  $\Delta k$  au seuil de propagation pour un rapport de charge  $R$  donné,  $R_m$  est la résistance à la traction du matériau,  $B$  et  $n$  sont des constantes caractéristiques du matériau.

### II.6. Paramètres influençant la fissuration par fatigue

Le développement de modèles de propagation a connu un grand essor et a permis de tenir compte de plusieurs paramètres et conditions imposés en service ou en laboratoire qui agissent sur la propagation des fissures. Les paramètres qui agissent peuvent être classés en deux catégories, à savoir :

- ✚ Les paramètres intrinsèques qui dépendent du matériau : module de Young, limite d'élasticité, propriétés cycliques et état métallurgiques du matériau.
  
- ✚ Les paramètres extrinsèques qui dépendent des conditions de l'essai, indépendamment de la nature du matériau étudié : température, fréquence, environnement, dimensions des éprouvettes, rapport de charge...etc.

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE CHAPITRE II

- [1] Mécanique de la rupture. //www.unit.eu, Septembre 2007.
- [2] Dahaoui Mourad. « Effet des préformations sur le comportement en fatigue des alliages d'aluminium à durcissement structural ». Thème de magistère option endommagement et fiabilité des matériaux. Université ABBT. 2013
- [3] Zoumana Soumahoro. «Étude du couplage thermomécanique dans la propagation dynamique de fissure». Thèse de Doctorat. L'Ecole Polytechnique, 2005.
- [4] H.M. Westergaard. « Bearing pressures and cracks ». Transactions ASME, Journal App. Mech., A 49. 1939.
- [5] 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.
- [6] C. Bathias. « Etude des mécanismes de la fissuration par fatigue des aciers ferritiques et des aciers austénitiques ». Thèse de doctorat 1972.
- [7] F. Nguedjio. « Amorçage des Fissures de Fatigue et Probalisation ». Calvin université de technologie de Compiègne mécanique appliquée et matériaux, 1989.
- [8] N. Gérard « Etude du comportement des fissures courtes au fond d'une entaille mécanique sous sollicitation en fatigue » 2003.
- [9] thèse, Amorçage et propagation des fissures courtes dans un alliage d'aluminium lithium, École centrale Paris, 1991.
- [10] H.P. Lieurade. « La pratique des essais de fatigue ».PYC Edition Paris, 1982.
- [11] R. Cerveny. « Etude de la propagation des fissures de fatigue dans L'alliage d'aluminium 7010-T7651 (fermeture et influence de microstructure et de la géométrie des éprouvettes) » thèse de doctorat 1994.

[12] M. Klesnil. Lucas « Effect of stress cycle asymmetry on fatigue crack growth material science and engineering », p. 231-240, 1972.

[13] N.E. Frost, L.P. Pook, K. Denton. « eng.fract.mech». vol.5, P1061. 1973.

[14] Aboulghit El Malki Alaoui « Influence du chargement sur la propagation en fatigue de fissures courtes dans un acier de construction navale » Thèse de Doctorat Université de Metz, 2005

[15] 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. 2009

### **Introduction**

Ce chapitre est consacré à l'étude des effets de différents types de défauts géométriques que l'on peut rencontrer dans les tuyaux métalliques (défauts causés par impact avec un corps étranger, les fissures ainsi que les caractères de corrosion) et plus particulièrement les enfoncements et les éraflures.

Ce chapitre se compose de quatre parties : Après une introduction, une première partie présente un rapide historique de méthodes d'évaluation des défauts dans les pipelines. La deuxième partie sera dédiée aux différents types de défauts les plus courants et les causes de défauts que l'on peut rencontrer dans les canalisations. La troisième partie illustre une présentation détaillée de Types de défauts évalués dans le PDAM. Le chapitre se termine par une conclusion.

Des études statistiques ont par ailleurs montré la très grande importance des endommagements par impact. Ces dommages peuvent se produire au cours de fouilles pour l'entretien ou pour de nouveaux travaux de génie civil à proximité des canalisations. Environ 50% des endommagements enregistrés sur les pipelines en Europe et 53.5% aux États-Unis sont causés par des interférences mécaniques dues aux contacts avec des corps étrangers.

Ce problème a nécessité l'utilisation d'outils spécifiques pour analyser les dommages éventuels des canalisations dus à ces impacts externes statiques ou dynamiques.

En plus des études menées sur les enfoncements et les éraflures seuls, on trouve aussi quelques travaux de recherche réalisés sur le couple enfoncement + éraflure. Ce dernier cas est moins développé en raison de la complexité du problème.

### **III.1 Un peu d'histoire sur les méthodes d'évaluation des défauts dans les pipelines**

L'effet des défauts dans les structures a été étudié qualitativement à partir de 15 siècles par Leonard de Vinci [4]. Celui-ci a mesuré la force d'élongation d'un fil de fer, et a observé que la force d'élongation du fil était plus importante pour un fil court qu'un fil long. Il a introduit le concept de distribution volumique des défauts.

En 1920, Griffith [5] a publié pour la première fois une formule reliant la contrainte à rupture à la taille des irrégularités (défauts). Cette relation découle d'un simple bilan énergétique à partir d'une analyse des contraintes au niveau d'un trou elliptique faite précédemment et de la première loi de la thermodynamique. Toutefois, ces travaux sont applicables uniquement aux matériaux parfaitement élastiques.

Avant les années 1950, l'ingénierie des structures ne prenait pas en considération la présence des fissures, ces dernières étant jugées inacceptables en terme de qualité, sans avoir été évaluées quantitativement. Dans les années 1950, il y avait un intérêt majeur pour l'industrie aéronautique aux Etats Unis, Notamment pour la rupture des alliages d'aluminium, et dans les années 1960, Cet intérêt s'est déplacé aux risques de rupture dans les centrales nucléaires.

Cela conduira à la mise au point de la mécanique élastoplastique de la rupture en utilisant diverses approches (facteur d'intensité de contraintes (K), Intégrale J et écartement de fissure. Les décennies 1950 et 1960 ont également été une période où la sécurité des canalisations de gaz et de pétrole a commencé à préoccuper les compagnies pétrolières, principalement aux Etats-Unis en raison de la taille et du vieillissement de ces canalisations. Les premiers travaux de recherche sur la rupture des pipelines présentant des défauts ont été Réalisés par John F. Kiefner et al. à l'institut de Battelle [6]. La majorité de ces travaux était basée sur des essais d'éclatements de tubes. L'objectif principal de ces travaux était de fournir et de comprendre les relations entre les essais d'éclatements et la taille des défauts détectés.

### III.2Etat de l'art sur les défauts dans le pipeline

Le tableau III.1 représente les définitions des défauts les plus courants de pipeline

Table III.1 – Liste des types des défauts les plus courants de pipeline [2]

Dénomination	Définition
Coup d'arc	Point où le métal a été mis en fusion superficiellement par un arc électrique
Défaut Artificiel	Défaut usiné artificiellement dans un but de test
Flambage	Rupture partielle du tube due à une torsion excessive, causée par une modification brutale de l'environnement (ex : Tremblement de terre)
Corrosion	Réaction électrochimique entre le pipeline et l'environnement, en trainant une perte de métal

## CHAPITRE III LES DEFAUTS DANS LES PIPELINES

---

Zone de corrosion	Corrosions multiples sur une large zone
Fissure	Fracture plane (2 dimensions) avec possible déplacement de métal, dont la cause est inconnue
Enfoncement	Distorsion de la surface du pipeline entraînant une modification locale du diamètre interne
Enfoncement avec manque de métal	Enfoncement ayant entraîné une perte de métal locale
Griffure	Perte de métal induite mécaniquement entraînant la formation de tranchées
Meulage	Réduction d'épaisseur du pipeline réalisée à la main ou par disqueuse
Fissure sur soudure d'aboutage	Fissure localisée sur ou à proximité d'une soudure d'aboutage
Défaut sur soudure d'aboutage	Défaut localisé sur ou à proximité d'une soudure d'aboutage
Fissuration assistée par hydrogène	Fissure causée par atomes d'hydrogène
Délaminage	Imperfection ou discontinuité du métal causant une séparation en couche parallèle ou angulaire au tube
Fissure sur soudure longitudinale	Fissure localisée sur ou à proximité d'une soudure de fabrication longitudinale
Défaut sur soudure longitudinale	Défaut localisé sur ou à proximité d'une soudure de fabrication longitudinale
Ovalisation	Déformation généralisée du tube

Défaut de fabrication	Anomalie créée lors de la fabrication du tube (ex : particule étrangère dans le métal)
Zone de défaut de fabrication	Anomalie de fabrication répertoriée sur une large zone
Fissuration par corrosion sous contrainte	Fissure créée par la mise sous contrainte d'une zone corrodée
Ecaillage	Abrasion de la surface du pipeline entraînant une texturation du métal
Fissure sur soudure hélicoïdale	Fissure localisée sur ou à proximité d'une soudure de fabrication hélicoïdale
Défaut sur soudure-hélicoïdale	Défaut localisé sur ou à proximité d'une soudure de fabrication hélicoïdale
Repliure	Déformation extrême du métal entraînant la formation d'un pli
Autre	Tout défaut détecté n'appartenant pas à l'une des catégories ci-dessus

### III.2.1 Cause de défaillance des pipelines

Les causes des défaillances des canalisations sont de diverses natures, (figure III.1). Elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite dans la conduite.

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.

Les mouvements de terrain (glissements du sol, tremblement de terre,...) peuvent aussi être la cause de dommage sur les gazoducs enterrés.

Les exploitants de gazoducs étudient ces problèmes depuis longtemps et possèdent une bonne connaissance des méthodes permettant de les gérer. En Europe, on relève essentiellement des défauts liés aux agressions mécaniques extérieures et à la corrosion, En effet, il arrive que les gazoducs soient endommagés ou perforés 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 une entaille, Provoque l'affaiblissement de la résistance à la rupture du gazoduc. Elle réduit la section du tuyau, en le rendant plus sensible à la pression de service et aux efforts causés par les mouvements des sols ; ensuite l'effet d'amplification locale de la contrainte accroît exponentiellement la nocivité de ce défaut.

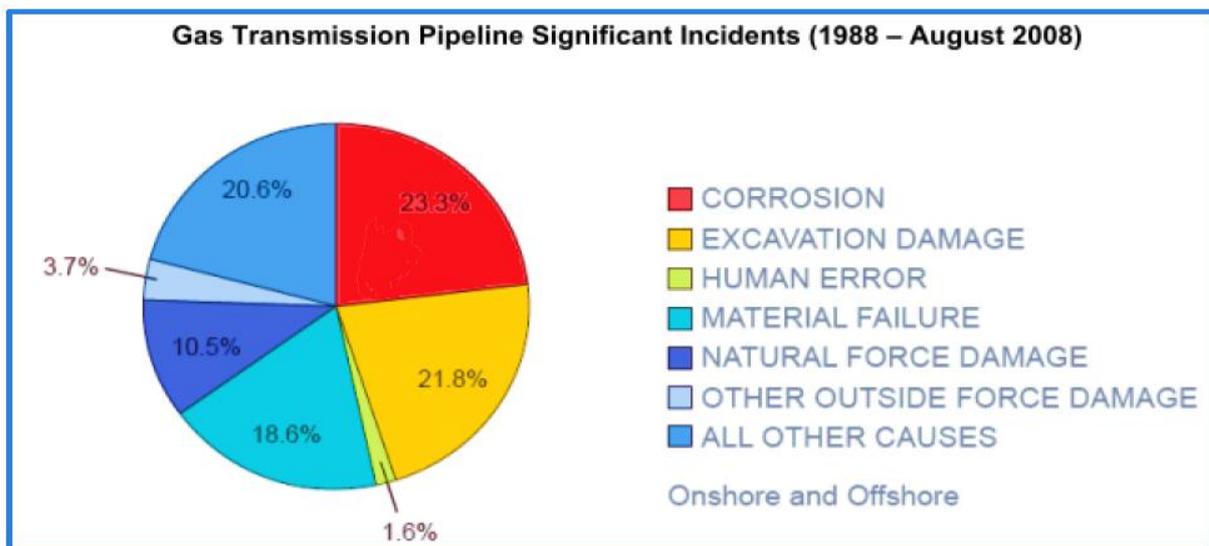


Figure III.1 : causes des incidents significatifs des pipelines de transmission de gaz naturel souterrain et sous-marin.

Il existe plusieurs codes et manuels techniques d'évaluation des défauts dans les canalisations, les codes **PDAM** (The Pipeline Defect Assessment Manual) sont les plus utilisés.

### III.2.2 Le PDAM (The Pipeline Defect Assessment Manual)

Il existe plusieurs codes et manuels techniques d'évaluation des défauts dans les canalisations, les plus utilisés ont été cités précédemment, ces derniers utilisent simultanément La mécanique de rupture et l'analyse limite [3]. Les résultats analytiques et numériques obtenus sont renforcés par des résultats expérimentaux. Pour mieux comprendre le fonctionnement et l'application de ces codes et manuels, une bref présentation du PDAM est faite ci-après [7].

#### III.2.2.1 Présentation du PDAM

**PDAM** est un manuel d'évaluation des défauts dans les pipelines. Ce dernier contient les Différentes techniques disponibles actuellement pour l'évaluation des défauts des Canalisations (corrosion, soudures, éraflures, ...). Ce manuel est basé essentiellement sur des essais mécaniques et permet de maintenir un niveau de sécurité élevé. En plus de l'identification des meilleures méthodes, ce manuel a servi aussi à donner les limites empiriques de l'application des méthodes existantes. Ce document est considéré comme une aide pour la maintenance des canalisations pouvant présenter des défauts. Il a été établi en août 2002.

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

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

## III.2.2.2 Types de défauts évalués dans le PDAM

- a) Les défauts de type éraflure,
- b) Les défauts de corrosion, causés par des piqûres de corrosion
- c) Les défauts dans les soudures, les plus courants étant les manques de pénétration.
- d) Les défauts de type enfoncement.

La Figure III.2 représente les types de défauts évalués dans le PDAM

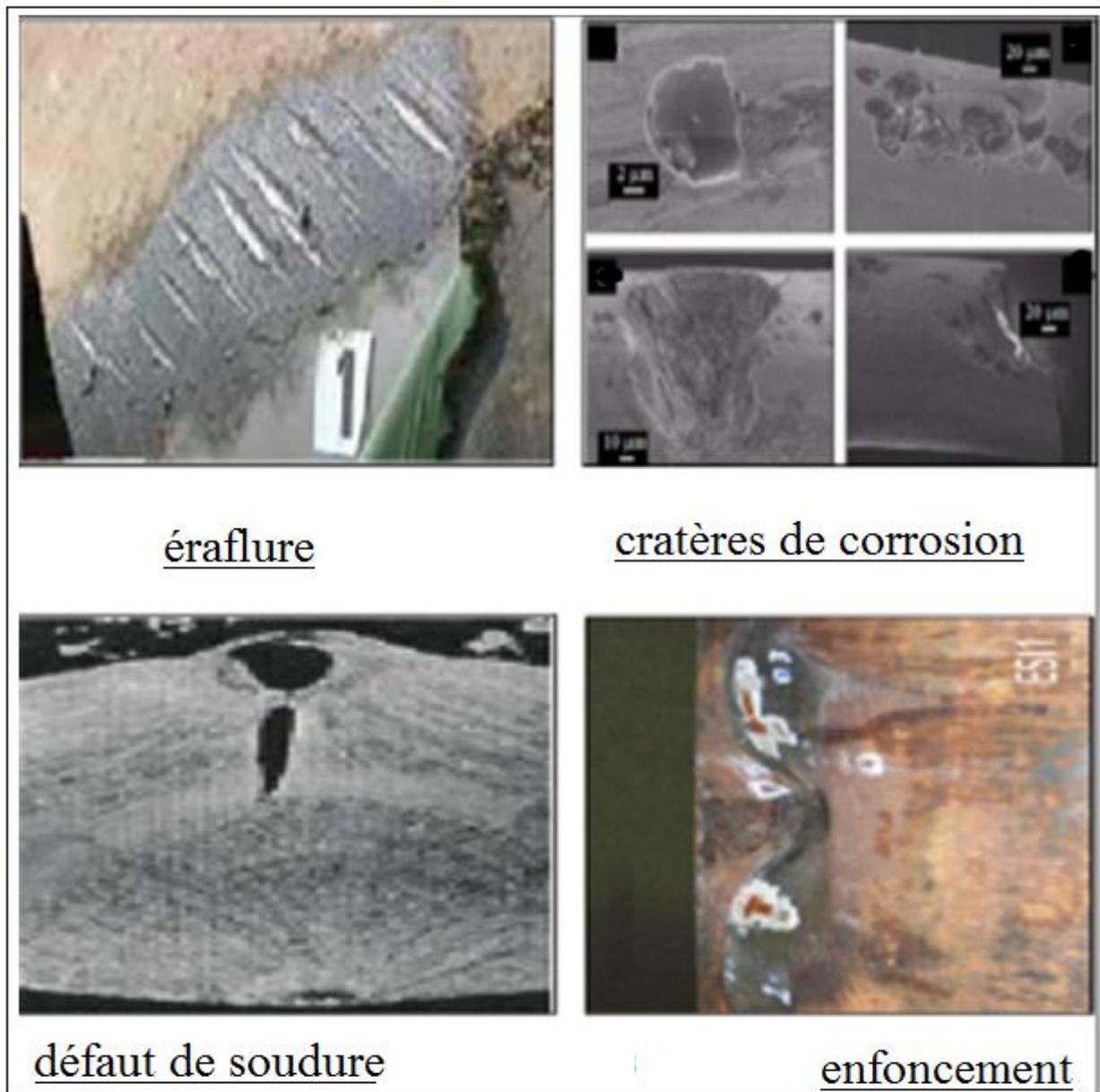


Figure III.2 types de défauts évalués dans le PDAM

### III.3 Défaillance par corrosion

Généralement la corrosion est très présente sur les canalisations métalliques, elle conduit à une diminution de l'épaisseur des canalisations dans les zones affectées.

#### III.3.1 Corrosion dans les pipelines

La corrosion des pipelines de pétrole et de gaz est la dégradation de celui-ci ou de ses propriétés mécaniques sous l'effet de l'environnement immédiat qui peut être le sol, l'atmosphère, l'eau ou d'autres Fluides. Compte tenu du nombre important de paramètres intervenant dans le processus électrochimique, la corrosion est un phénomène très complexe. La figure (III.3) présente un exemple de corrosion.



*Figure III.3 microscopies sur un acier corrodé*

#### III.3.1.1 Différents types de corrosion

D'un point de vue général et macroscopique, il existe deux types de corrosion :

**La corrosion généralisé** : ce type affectant la totalité de la structure du métal, n'est pour cette raison préjudiciable que sur le plan de l'esthétique mais ne modifié que très peu les propriétés mécaniques du matériau. (figure III.4.a)

**La corrosion localisée (par piqûre)** : est la plus dangereuse car les dégâts qu'elle provoque en profondeur diminuent fortement la résistance du métal en générale ce type de corrosion se manifeste sur les matériaux qui présentent une hétérogénéité sur leur surface. (figure III.4.b)



Figure III.4 types de corrosion

### III.3.1.2 défaillance par corrosion

Les défaillances des canalisations sont de diverse nature, La plupart de ces défaillances sont causées par des piqûres de corrosion, ce dernier est définie comme la forme d'attaque localisée dans laquelle un ou plusieurs point de faible surface son corrode avec une pénétration dans la masse du métal. Il Due à un dé passivation locale (rupture de la couche passive), en milieu réducteur et en présence d'ion chlorure : (soit par dissolution d'inclusions (MnS par exemple) ou soit par adsorption d'ions Cl<sup>-</sup> dans la couche de passivation.) La forme de la corrosion par piqûre peut être identifiée par analyse métallographique ou un échantillon corrodé peut être sectionné en choix, la forme la taille et la profondeur de la pénétration peut être déterminée (figure III.5)

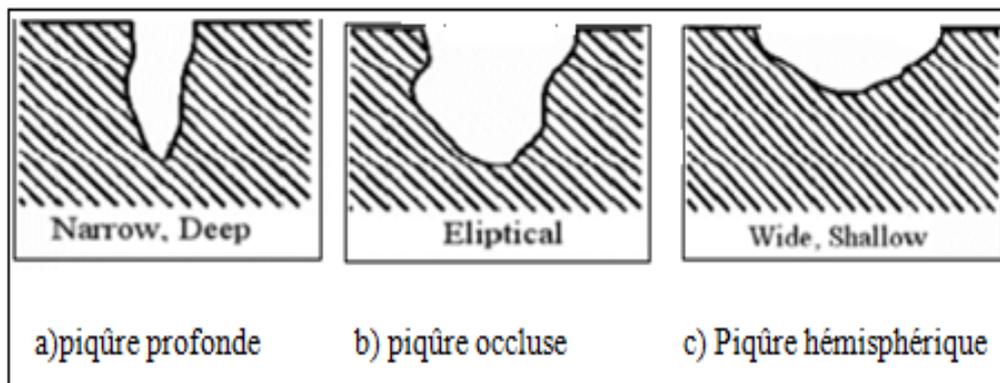


Figure III.5 forme de piqure d'après ASTM (American Standard Teste Materials)

### III.3.1.3 Mécanisme de corrosion des pipelines

La corrosion des matériaux et plus particulièrement celle des canalisations désigne l'altération de ce matériau (cette canalisation) par réaction avec un oxydant (le dioxygène et le cation H en majorité). Le principal agent corrosif dans l'industrie pétrolière est l'hydrogène sulfuré ( $H_2S$ ) Qui provient à la fois du brut mais aussi principalement de la décomposition thermique des composés soufrés . La corrosion par  $H_2S$  est provoquée selon le mécanisme suivant [10] :



### III.3.1.4 Fatigue-corrosion

Un matériau résistant très bien à la fatigue et très bien à la corrosion dans un milieu donné, peut se rompre de manière catastrophique sous l'effet combiné de la fatigue et de la 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. [11]

## III.4 Défaut d'enfoncement

### III.4.1 Définition d'un enfoncement

Un enfoncement dans un pipeline est une déformation plastique permanente de la section Circulaire de la paroi du tube dû à un impact avec un corps étranger (exemple : le godet d'un engin en travaux pour les canalisations enterrées ou posées par terre, les ancrs des bateaux pour les pipelines immergés).

Autrement dit un enfoncement est un changement de la courbure de la paroi du pipeline sans changement d'épaisseur. La profondeur de cet enfoncement est définie comme la réduction maximale du diamètre du tuyau par rapport à son diamètre initial (voir figure III.6)

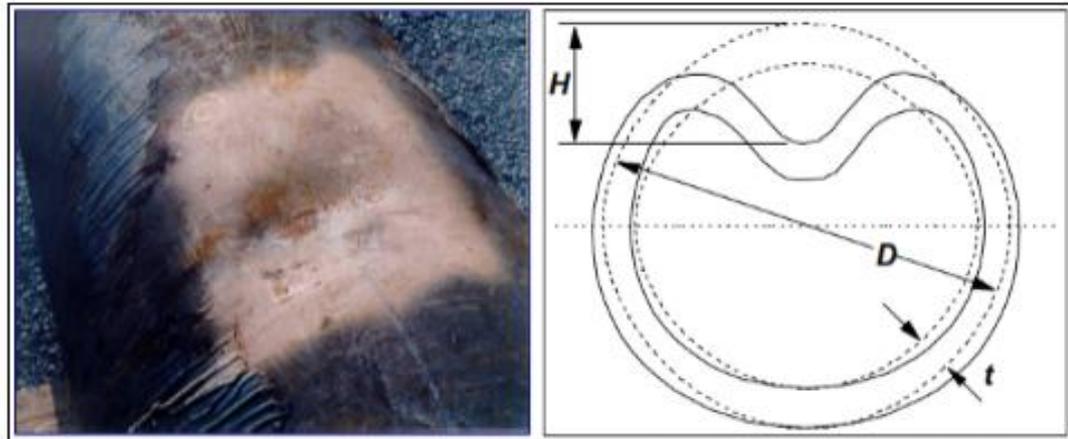


Figure III.6 défaut d'enfoncement

Un enfoncement provoque une concentration locale de contrainte et de déformation et une réduction locale du diamètre du tuyau [14]. La présence des enfoncements dans les tuyaux peut se résumer au cas suivants [15] :

- ✚ Indentation lisse (Plain dent) : ce type d'enfoncement correspond à celui où il n'y a pas de réduction de l'épaisseur de la paroi du tube.
- ✚ Indentation pliée (kinked dent) : c'est un enfoncement qui provoque un changement brusque de la paroi du pipeline
- ✚ indentation dans des soudures, cette configuration traduit la combinaison d'un enfoncement et d'un autre défaut car les soudures sont susceptibles de présenter des Fissures, ...

### III.4.2 La géométrie et caractérisation des enfoncements

La profondeur d'enfoncement est habituellement mesurée en se référant à la découpe extérieure originale de la pipe intacte, et souvent exprimée en pourcentage du diamètre original de pipe. La forme d'enfoncement peut être définie en termes de rayon de courbure local dans la direction circulaire et/ou axiale. (La figure III.7)

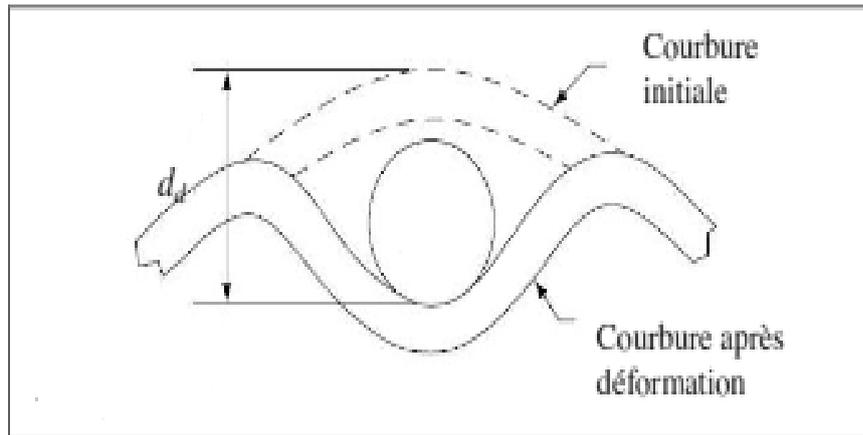


Figure III.7 géométrie et caractérisation des enfoncements

### III.4.3 détermination de profondeur de l'indentation

Les enfoncements (indentations) locaux sur les canalisations est un sujet compliqué impliquant des non linéarités géométriques et matérielles. Il est impossible d'obtenir une solution théorique complète sans aucune simplification. Quand la déformation provoquée par un enfoncement est grande, l'énergie élastique stockée dans le tube peut être négligée. [3]

Quelques travaux ont été réalisés à ce jour dans ce domaine [17, 18]. La figure III.8) illustre le profile de déformation d'un pipeline soumis à une indentation locale.

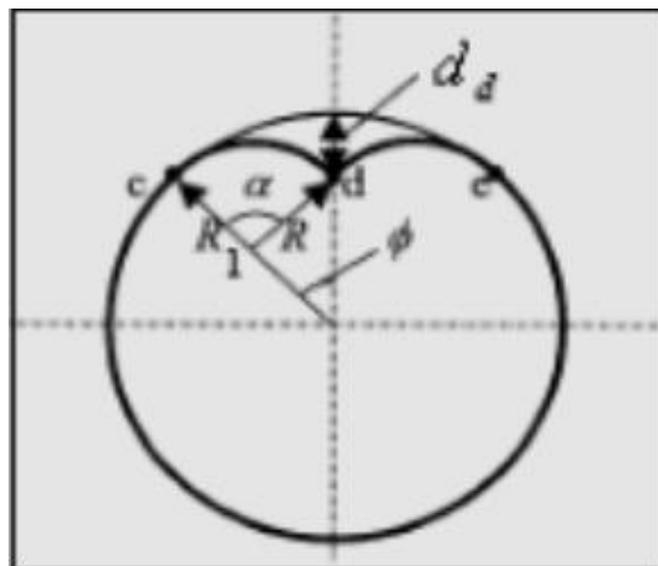


Figure III.8 : Présentation d'une indentation symétrique avec ses différents paramètres

En appliquant les relations géométriques d'une indentation symétrique, nous pouvons écrire les équations d'équilibres suivantes [17] :

$$R1.\varnothing = R.\alpha \quad (III.7)$$

$$d_d = R1 (1 - \cos \varnothing) - R [\cos(\alpha - \varnothing) - \cos \varnothing] \quad (III.8)$$

$$R1 \sin \varnothing = R [\sin \varnothing + \sin(\alpha - \varnothing)] \quad (III.9)$$

Avec :  $R1$  est le rayon du tube,  $R$  est le rayon de courbure de l'arc déformé (de l'indentation),  $\varnothing$  est l'angle de référence (original) et  $\alpha$  est l'angle après la déformation (voir figure III.8).

Pour un angle  $\varnothing$  donné, la solution de (III.7)-(III.9) est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 2\varnothing \\ R = \frac{1}{2} R1 \end{array} \right\} \quad (III.10)$$

Par remplacement de l'équation (III.10) dans l'équation (III.8), on obtient la formule qui donne la profondeur de l'indentation en fonction de l'angle  $\varnothing$  et du rayon du tube  $R$  (mm) :

$$d_d = R1 (1 - \cos \varnothing) \quad (III.11)$$

### III.4.4 Condition d'acceptabilité d'un enfoncement

Des études récentes ont été menées par l'EPRG (Européen Pipelines Research Group) [9] sur la nocivité d'un enfoncement simple. Ces dernières montrent qu'un enfoncement qui se situe "loin" par rapport à un joint de soudure avec une profondeur allant jusqu'à 10% du diamètre extérieur du pipeline ne conduit pas à la rupture si la contrainte de membrane est inférieure à 72% de la limite d'élasticité [9].

$$\frac{d_d}{D} \leq 10\% \quad (III.12)$$

Dans l'équation (III.12),  $d_d$  est la profondeur de l'enfoncement dans le cas d'un tube sans pression et  $D$  ( $D=2R1$ ) est le diamètre externe du tube.

L'EPRG a trouvé une relation empirique entre la profondeur de l'enfoncement dans le cas d'une canalisation non pressurisée et celle soumise à une pression interne  $d_a^p$ , cette relation est donnée par la formule :

$$d_a = 1.43 d_a^p \quad (\text{III.13})$$

### III.5 Les éraflures

Il arrive fréquemment que le tuyau soit soumis à un choc provoqué par un outil (coup de pic par exemple) ou un engin de chantier, voir (figure III.9). La plupart du temps, l'incident passe inaperçu ou n'est pas signalé tout simplement.

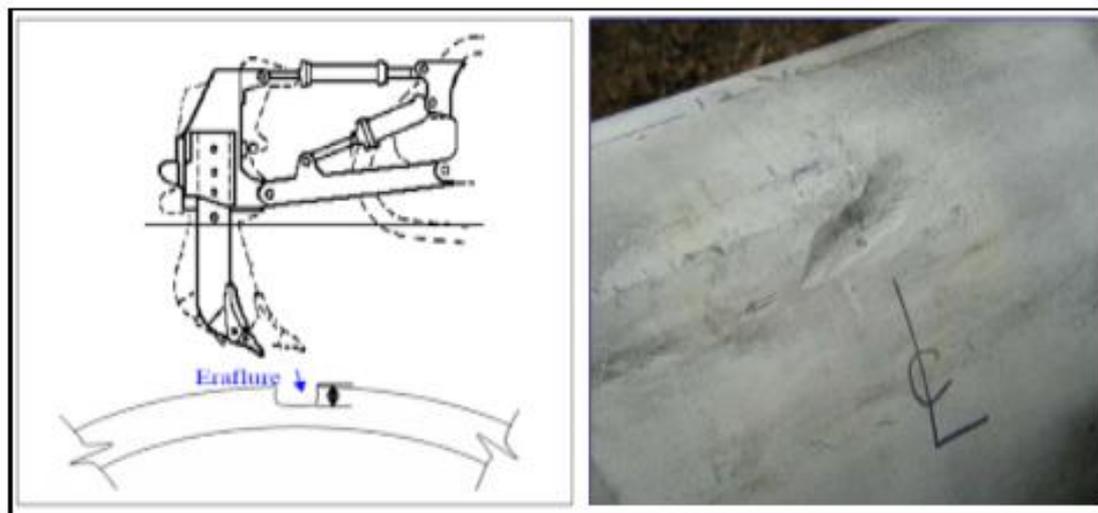


Figure III.9 : choc provoqué par un engin de chantier

#### III.5.1 Définition d'une éraflure

Une éraflure est endommagement superficiel de la surface dû à un contact avec un objet étranger qui provoque un enlèvement de matières (figures III.10). Cette éraflure peut être considérée comme une entaille. Les dimensions d'une éraflure sont définies de façon que la longueur soit plus grande que la largeur. [3]

Le choc causé par l'agression externe peut néanmoins provoquer de graves endommagements au tuyau. En service, l'action de la pression pourra provoquer une rupture localisée qui provoquera elle-même une fuite et éventuellement une explosion.

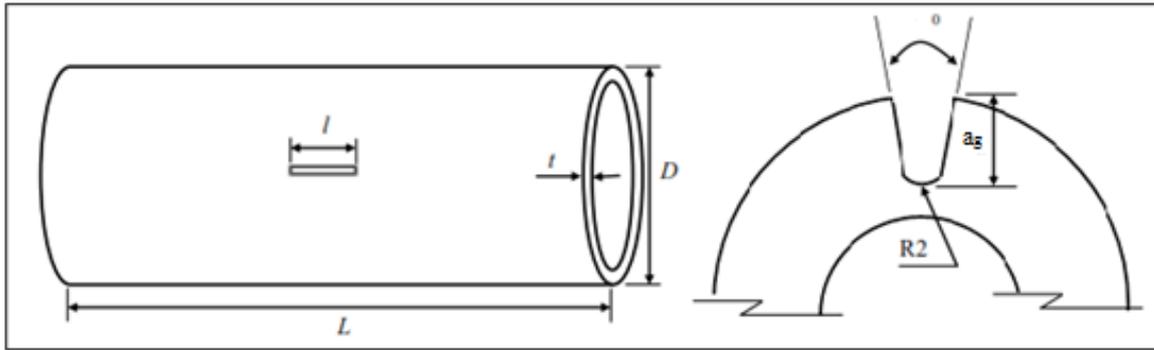


Figure III.10 géométrie et caractérisation des éraflures

### III.5.2 contrainte relative à la zone à défaut des éraflures

Un critère de rupture a été développé et validé à partir de résultats d'essais d'éclatements. Les défauts sont simulés par des entailles usinées en V orientées longitudinalement. Les équations de NG-18 sont les plus performantes pour évaluer les canalisations contenant des éraflures.

Ces mêmes équations ont été recommandées par l'EPRG pour l'évaluation des canalisations ayant subi des endommagements mécaniques [12].

La contrainte circonférentielle critique  $\sigma_{\theta}^c$  relative à la zone à défaut est donnée par [3] :

$$\sigma_{\theta}^c = \sigma_f \left[ \frac{1 - \frac{a_g}{t}}{1 - \frac{a_g}{t} \left( \frac{1}{M_F} \right)} \right] \quad (\text{III.14})$$

Avec :

$\sigma_f$  est la contrainte d'écoulement du matériau, cette contrainte est donnée par un concept empirique pour tenir compte de la capacité d'écroutissage du matériau. Elle est généralement donnée par la formule :

$$\sigma_f = \frac{\sigma_y + R_m}{2} \quad (\text{III.15})$$

$\sigma_y$  : est la limite élastique du matériau

$R_m$  : est la résistance à rupture

$a_g$  : est la profondeur de l'éraflure (mm)

$M_F$  : est le facteur de Folias ; une correction pour tenir compte de la courbure de membrane. La solution analytique du facteur de Folias se présente sous la forme d'une série infinie : trois approximations généralement utilisées sont données ci-dessous :

$$M_{F1} = \sqrt{1 + 0.26\left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}}\right)^2} \quad (\text{III.16})$$

Cette approximation elle est valable Pour  $\frac{2c}{\sqrt{Rt}} > 8$

2c : La longueur du défaut (éraflure), en (mm),

$$M_{F2} = \sqrt{1 + 0.314\left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}}\right)^2 - 0.00084\left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}}\right)^4} \quad (\text{III.17})$$

Approximation utilisée par ASME B31G modifié et RSTRENG

$$M_{F3} = \sqrt{1 + 0.40\left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}}\right)^2} \quad (\text{III.18})$$

Avec

R : rayon de tube

t : épaisseur de tube

Approximation utilisée par ASME B31G

### III.6 Les défauts combinés (enfoncevements + éraflures)

Un enfoncevement est une déformation plastique permanente de la section du pipeline du à un contact avec un corps étranger (agression externe), ce même contact peut aussi provoquer un enlèvement de la matière. Dans ce cas, on se retrouve dans une situation où on a un défaut combiné (enfoncevement + éraflure, voir figure II.11). Ce type de défaut est très compliqué car il implique des non linéarités géométriques et matérielles.

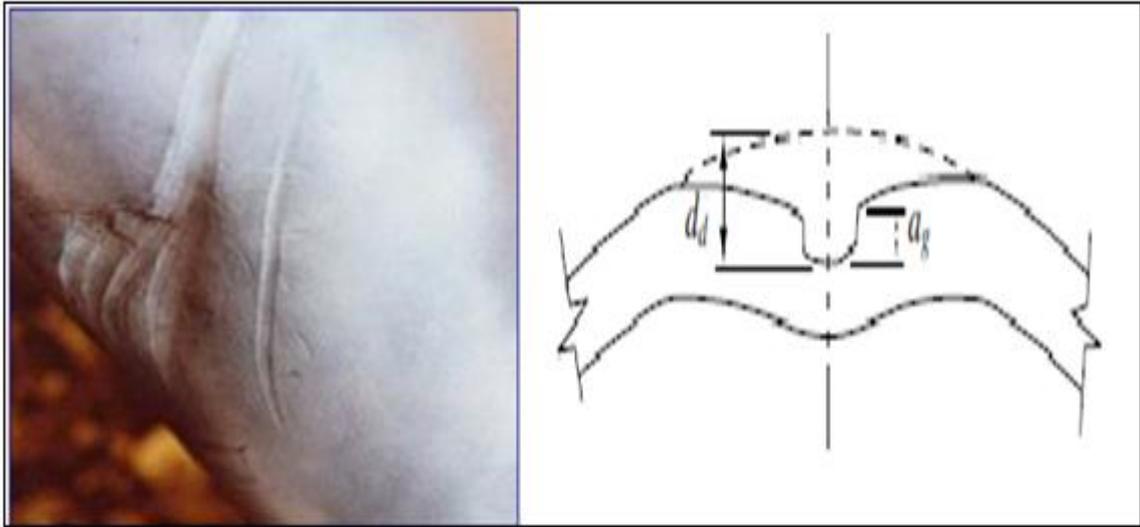


Figure III.11 défauts combinés (enfoncements + éraflures)

La présence d'un défaut tel qu'un enfoncement + éraflure dans une canalisation est très dangereuse. En effet, en plus de la concentration de contraintes provoquée par l'agression externe, il y a aussi une réduction de l'épaisseur du pipeline due à la présence de l'éraflure. En conséquence, on constate une diminution locale de la résistance mécanique de la canalisation.

### III.7 Les défauts dans les soudures

#### III.7.1. Orientation des fissures :

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur [13].

##### III.7.1.1 Les fissures longitudinales

Dans les petites soudures entre fortes sections sont souvent le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées. En soudage à l'arc submergé, elles sont généralement associées à des vitesses de soudage élevées ou peuvent être liées à des problèmes de porosités non apparentes à la surface de la soudure. Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous [13] (Figure III.12.).

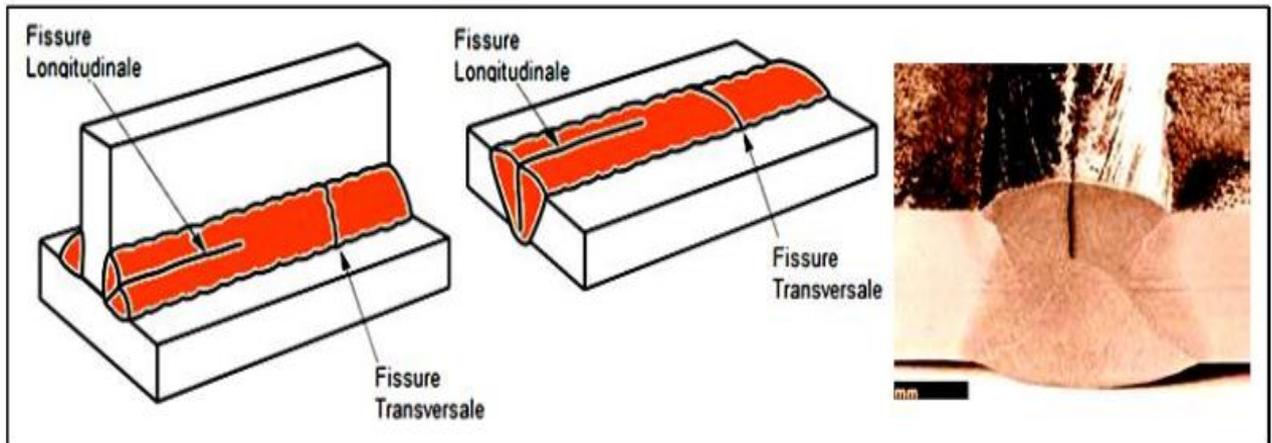


Figure III.12 : Fissure longitudinale

### III.7.1.2 Les fissures transversales :

Sont perpendiculaires à l'axe de la soudure. Celles-ci peuvent être limitées en taille et contenues entièrement dans le métal de soudure ou bien se propager dans la zone adjacente affectée par la chaleur puis dans le métal de base à partir du métal de soudure.

Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité. La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens transversal (Fig. III.13.).

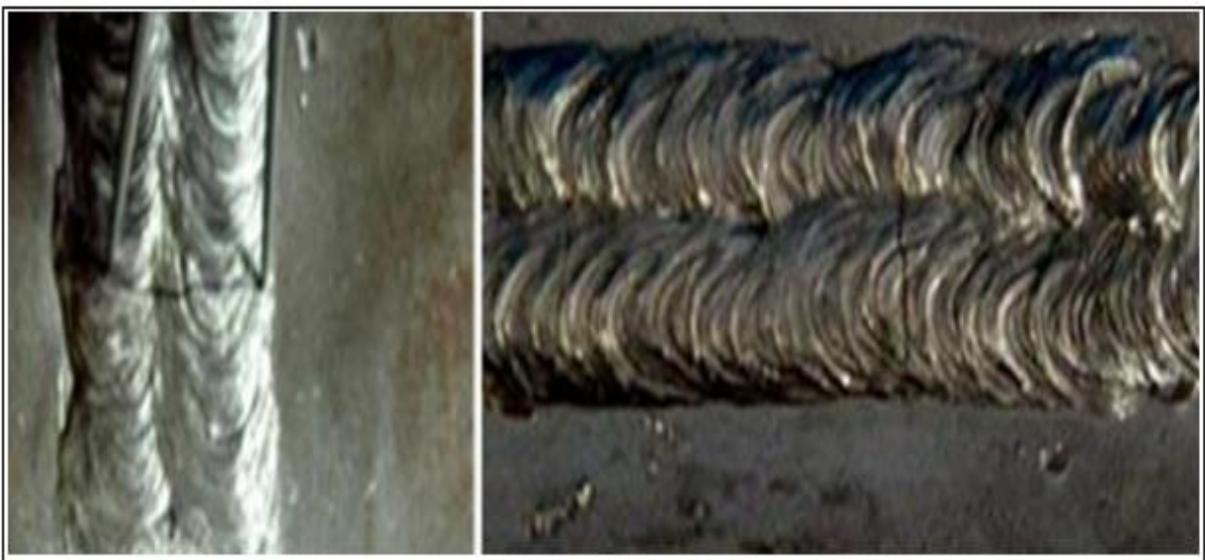


Figure. III.13 : fissure transversale.

### III.7.2 Cause de fissuration dans la soudure

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

### III.7.3 Effet des défauts de soudure sur la durée de vie de fatigue

Les fissures dans les joints de soudure réduisent de manière significative la résistance à la fatigue. Les résultats des essais de fatigue en présence des différents défauts sont montrés par la figure (III.14) (essais d'endurance). Ces essais d'endurance montrent qu'un joint de soudure avec une fissure de solidification (manque de pénétration), les défauts de porosité et de caniveau présentent une faible résistance à la fatigue comparativement par rapport aux éprouvettes ayant les joints idéals,

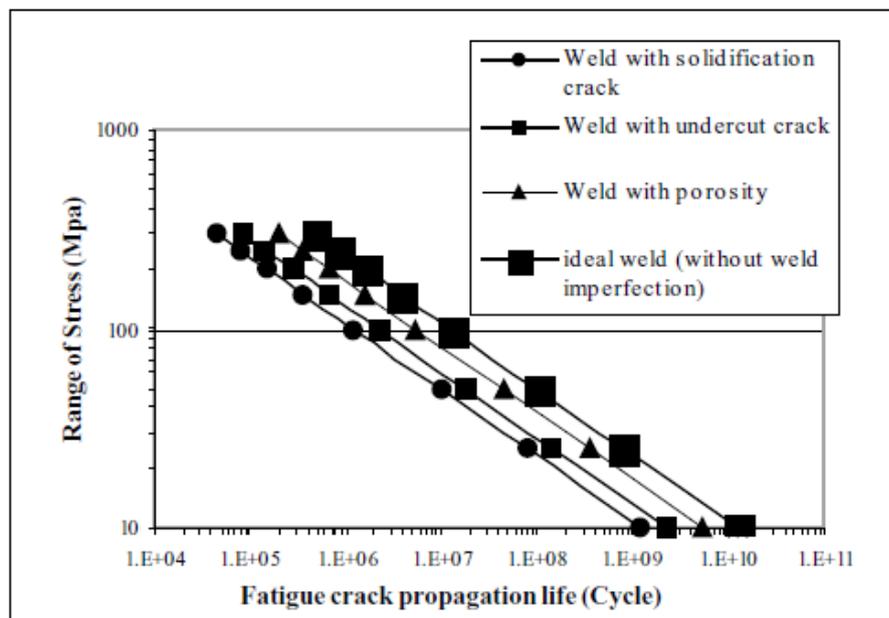


Figure III.14 Effet des défauts de soudure sur la vie de propagation de fissure de fatigue.

### III.8 Conclusion

Les canalisations transportant des gaz et des fluides contiennent souvent des défauts pouvant conduire à leur rupture. Ces défauts sont classés en cinq types majeurs : les piqures et cratères de corrosion, les fissures, les entailles (éraflures), les enfoncements (indentations) et les défauts dits combinés (enfoncements+éraflures).

La différence de géométrie et de nature des défauts ont amené les chercheurs à créer des outils spécifiques pour chaque type de défaut en se basant sur l'analyse limite, la mécanique de rupture et la mécanique de rupture d'entaille, ainsi que l'analyse par éléments finis et l'expérimentation.

### Référence bibliographique de chapitre –III-

- [1] J.C.SCULLY. «The Fundamentals of corrosion Engineering (McGraw Hill) », chapter 2 et 3.1967
- [2] Clément Fouquet « Détection et Reconnaissance de Défauts Structurels dans les Pipelines d'Hydrocarbure à partir d'Images Ultrasoniques » thèse de doctorat en Sciences et Techniques de l'Information et de la communication.
- [3] Mustapha ALLOUTI « Étude de la nocivité de défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaisons » thèse de doctorat en Sciences de l'Ingénieur de l'Université Paul Verlaine de Metz .2010
- [4] K.A. Macdonald, A. Cosham « Best practice for the assessment of defects in pipelines Gouges and dents », Engineering Failure Analysis Vol.12, 720–745. 2005.
- [5] A. A. Griffith, Phil Trans. Roy. Soc. London, A.221, pp163-198. 1920.
- [6] J. F. Kiefner, W. A. Maxey, R. J. Eiber, A.R. Duffy « Failure stress loads of flaws in Pressurised cylinders » ASTM STP vol. 536. Philadelphia, p. 461–81. 1973.
- [7] A. Cosham, P. Hopkins, «The Pipeline Defect Assessment Manual » International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada.2002.
- [8] Claude Basalo, « canalisation de l'eau et de gaz corrosion ; dégradation et protection, technique et documentation » (Lavoisier) .1987
- [9] A. Keith Escoe « Piping and Pipelines assessment guide», British Library Cataloguing-in-Publication Data, ELSEVIER .Volume I. 2006.

[10] Fekih « défaillances des structures de pipelines et réparation par renforcement par manchons composites ». Mémoire de master en génie mécanique option maintenance industriel. Université ABBT .2014

[11] Djdid Ibrahim « étude sur les défaillances des aciers API-5LX60 pour pipeline cas de la ligne GZ1 » Mémoire de master en génie mécanique option maintenance industriel. Université ABBT .2013

[12] D. G. Jones, «The Significance of Mechanical Damage in Pipelines » 3R International, 21, Jahrgang, Heft, 1982

[13] Beneddeb Mostefa « Étude les défauts de soudage des pipelines » Mémoire MASTER Université Mohamed Khider Biskra. 2012

[14] K.A. Macdonald, A. Cosham, C.R. Alexander and P. Hopkins, « Assessing Mechanical damage in offshore pipelines – Two case studies », Engineering Failure Analysis, In Press, Corrected Proof, Available online 21 December .2006.

[15] A. Cosham, P. Hopkins, « The effect of dents in pipelines - guidance in the pipeline Defect assessment manual », International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 81, 2004.

[16] Michael Baker Jr Inc«Mechanical Damage final report U.S». Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration Office of Pipeline Safety

[17] J.H. Liu, A. Francis, « Theoretical analysis of local indentation on pressured pipes », International Journal of Pressure Vessel and Piping, vol. 81, 931- 939, 2004.

[18] Orynyak, L. S. Shlapak, « Estimation of the limiting pressure in a pipe with an Indentation », Strength of material, Vol. 33, N° 5, 2001.

IV.I. ETAT DE L'ART DES EFFETS DES DEFAUTS (ENFONCEMENT,  
ERAFLURE) SUR LE COMPORTEMENT EN FATIGUE.

IV.I.1 Effet de l'enfoncement sur le comportement de fatigue

Il est reconnu que les enfoncements diminuent la durée de vie en fatigue des pipelines soumis à des chargements cycliques sur une longue période du temps [Denovitzer et al] ont étudié l'effet de la profondeur de l'enfoncement sur la durée de vie en fatigue figure (4.1-4.2-4.3- 4.4). [3]

Additionnement ils ont considéré l'effet de la forme de pénétrateur sur la durée de vie de fatigue en pipeline endommagé.

La figure 4.1) lustre la relation entre le nombre de cycle de rupture par fatigue et le rapport (D/t) pour deux pénétrateur (sphérique, cylindrique) pour différent profondeur d'enfoncement il a noté que de tous les cas, la durée de vie en fatigue est réduite avec la diminution du rapport D/t c'est-à-dire Pour un diamètre de pénétrateur faible un pipeline épais est trait fortement susceptible au problème de fatigue par apport un pénétrateur de diamètre large et un pipeline de faible épaisseur. [1]. [2].avec (t : épaisseur du tube).

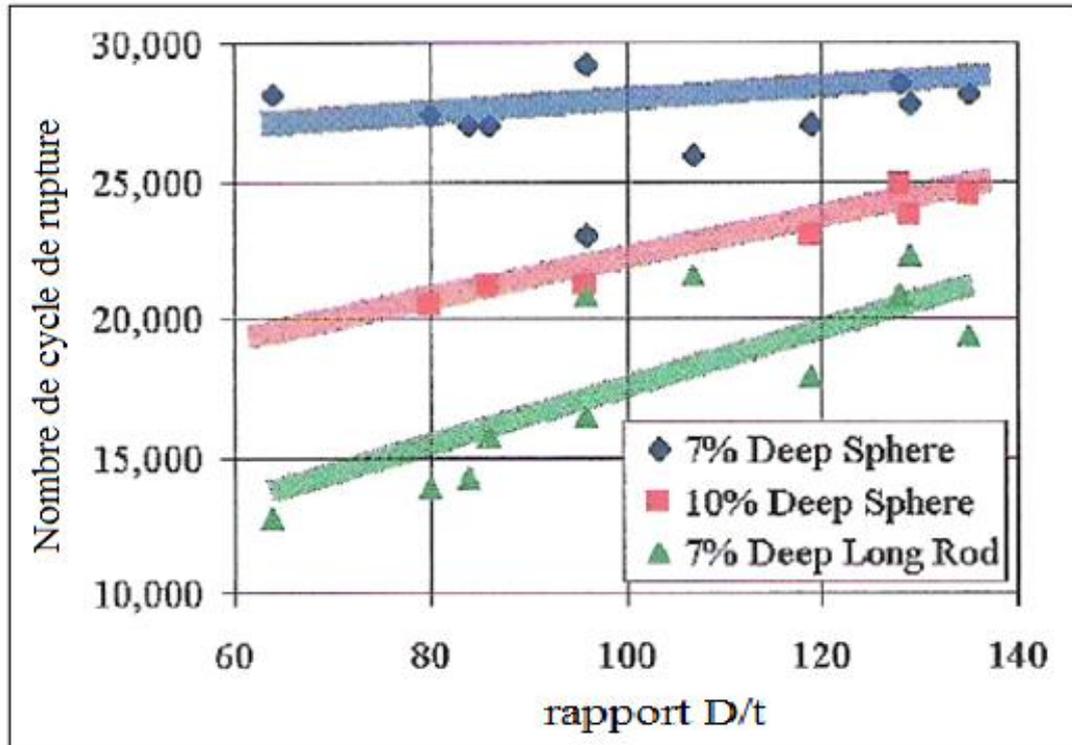


Figure 4.1 : effet de rapport D/t sur la durée de vie en fatigue des pipelines. [3]

La figure 4.1 induit que le pénétrateur cylindrique réduit la durée de vie en fatigue comparativement par rapport au pénétrateur sphérique.

Cela résulte de la différence en contrainte autour de l'enfoncement réduit ou large.

La figure 4.2 montre l'évolution entre le nombre de cycle de rupture et le rapport de la profondeur d'enfoncement (d/D).

Les résultats indiquent la diminution de la durée de vie en fatigue par l'augmentation de rapport de enfoncement (d/D), additionnement la durée de vie en fatigue du pipeline est réduit d'une façon significative quand le rapport d'enfoncement atteint (1%).

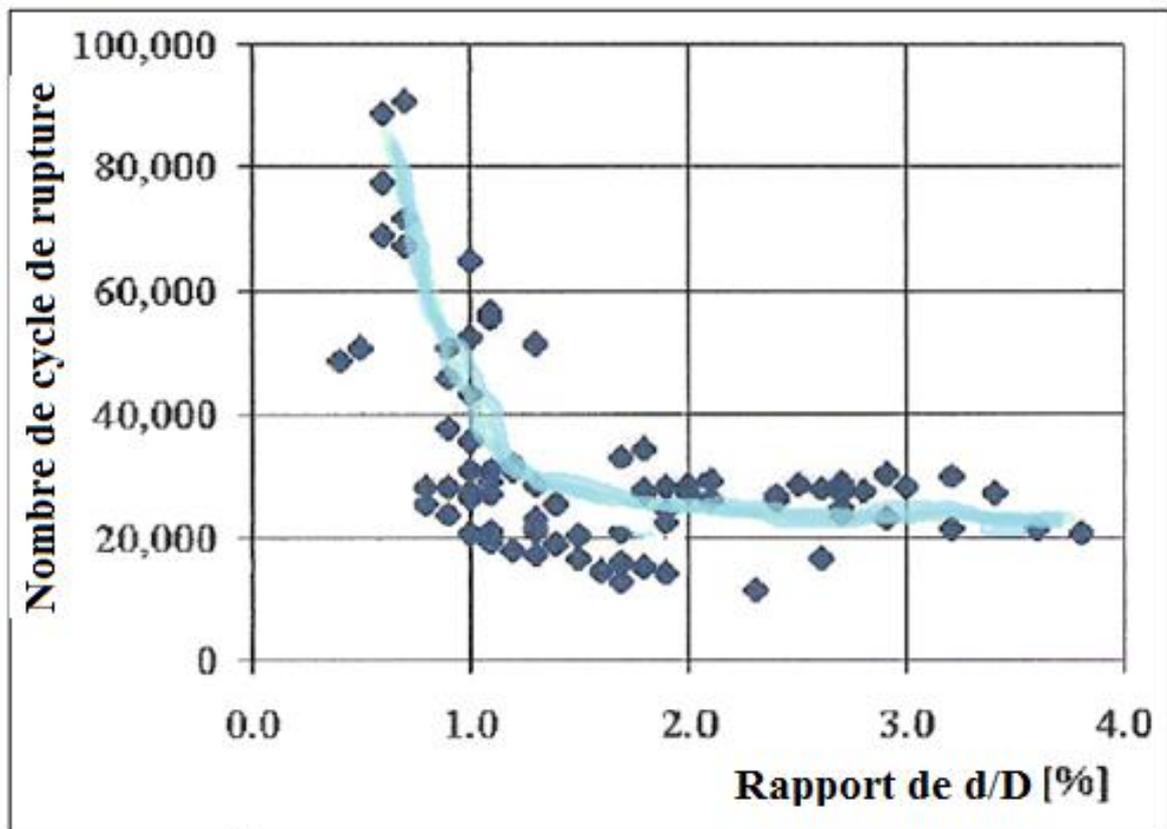


Figure 4.2 effet de profondeur de l'enfoncement sur la durée de vie en fatigue des pipelines. [3]

La figure 4.3 montre l'effet des profile de l'enfoncement (direction transversal) sur la durée de vie de fatigue en pipeline, généralement les résultats indique que l'augmentation de la pente du profil de l'enfoncement et de entaille conduite a une amélioration de la durée de vie en fatigue.

L'effet de pente peut se traduire par le rapport  $w/2d$  (acuité) (figure4.4)

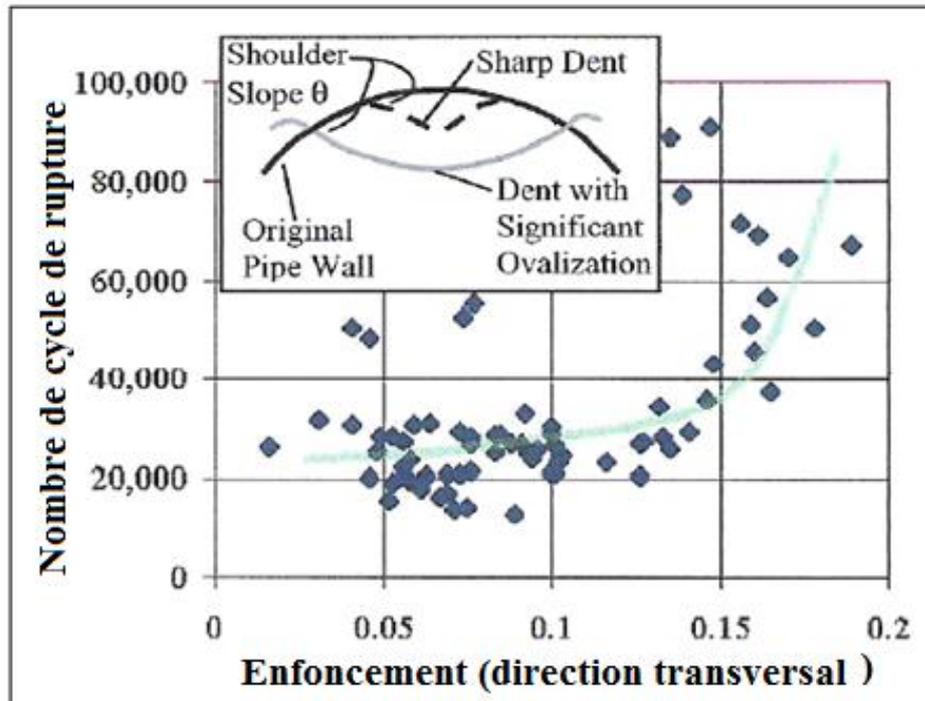


Figure 4.3 l'effet des profile de l'enfoncement sur la durée de vie de fatigue en pipeline [3]

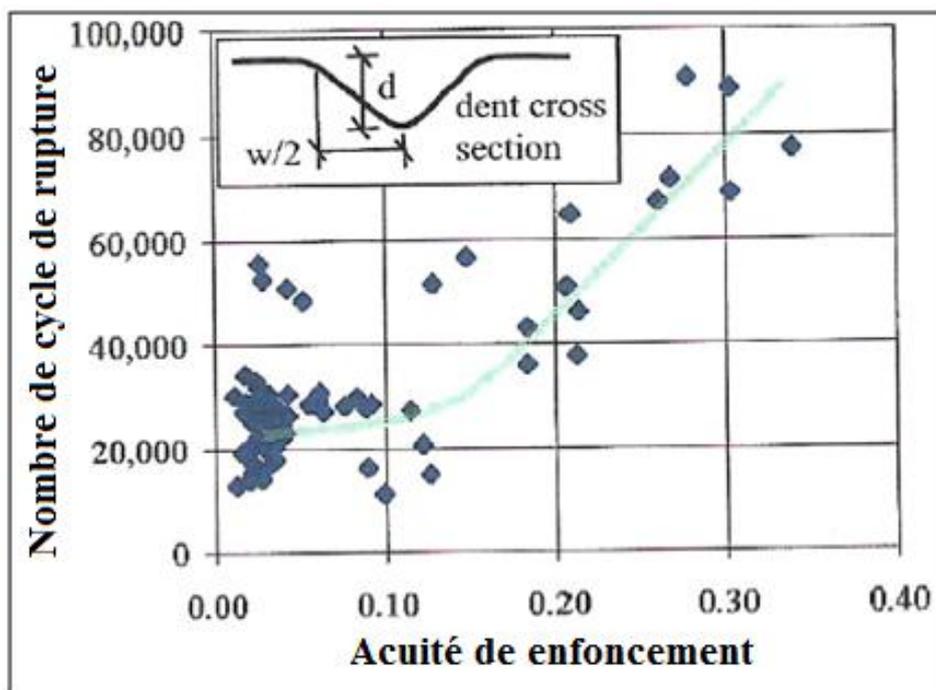


Figure 4.4 l'effet des (acuités)  $w/2d$  sur la durée de vie des enfoncements [3]

## IV.I.2 Effet des éraflures et défauts combiné (éraflure + enfoncement) sur le comportement en fatigue.

Fowler et al [4] ont montré que les éraflures ont une influence significative sur la durée de vie en fatigue. Ils ont montré également que le meulage sur une éraflure augmente la durée de vie en fatigue de 3 fois comparativement due à l'élimination de microfissure.

La combinaison des enfoncements et des éraflures réduit aussi la durée de vie de fatigue comparativement à l'enfoncement ou éraflures seul.

Leis, B.N., et Hopkins, [6] 2003 ont résumé le résultat des essais de fatigue effectué par plusieurs organisation et examiné par cosham [5], la comparaison des résultats des essaie a grand échelle avec le model développé par (british Gas) (figure 4.5) montre que la dispersion est considérable

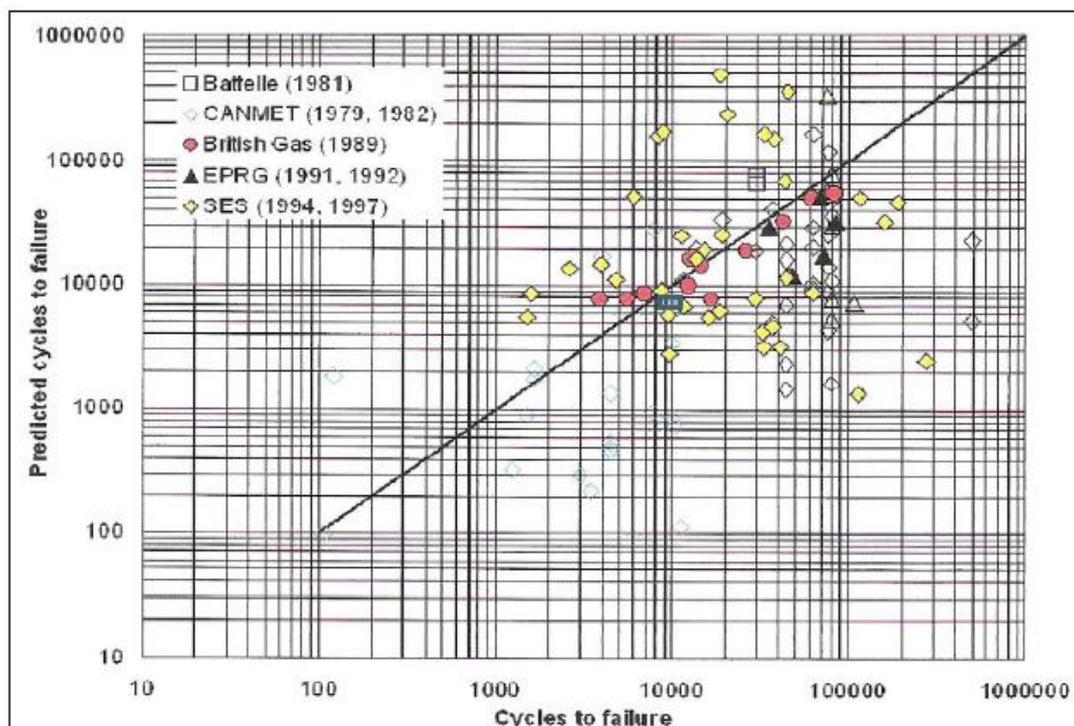


Figure 4.5 la comparaison des résultats des essaie a grand échelle avec le model développé par (british Gas)

### IV.I.3 Analyse de la durée de vie en fatigue des pipelines enfoncée

#### IV.I.3.1 Nombre de cycle de rupture et la durée de vie de fatigue

YING Wu et al [7] ont utilisé un code numérique (ANSYS) qui est basé sur la méthode des éléments finit, pour analyser la durée de vie en fatigue de pipeline soumis à un défaut d'enfoncement.

Pour une pression moyenne de (3.45Mpa), les résultats sont montrés dans Le tableau (4.1) et la figure (4.6.a et 4.6.b).

Tableau (4.1) rapport  $\Delta\sigma$  de variation de contrainte en fonction de (D/t) et (d/D) (pour 3.45Mpa) [7]

d/D (%)	D/t							
	18	20	25	30	35	40	45	50
1	14,44	16,88	23,69	31,47	40,22	49,94	60,62	72,25
2	20,56	24,41	35,32	48,06	62,60	78,91	96,94	116,68
3	23,99	28,59	41,68	56,99	74,43	93,94	115,44	138,85
4	27,92	33,37	48,80	66,68	86,80	108,94	132,90	158,58
5	31,04	37,08	53,95	73,08	94,05	116,45	139,89	164,02
6	33,55	39,93	57,42	76,58	96,77	117,43	138,11	158,47
7	35,16	41,59	58,71	76,61	94,56	112,00	128,62	144,23
8	36,04	42,27	58,26	74,08	89,06	102,87	120,90	141,84
9	36,15	41,96	56,25	69,55	86,04	105,22	122,52	146,27
10	35,59	40,82	53,48	70,15	88,70	107,97	127,60	147,52
11	34,43	39,01	54,56	72,15	90,44	109,08	127,95	147,04

Les figures (4.6.a) et (4.6.b) sont obtenues par le tableau (4.1). Ces derniers représentent la variation de la variation de contrainte en fonction de (D/t) et (d/D).

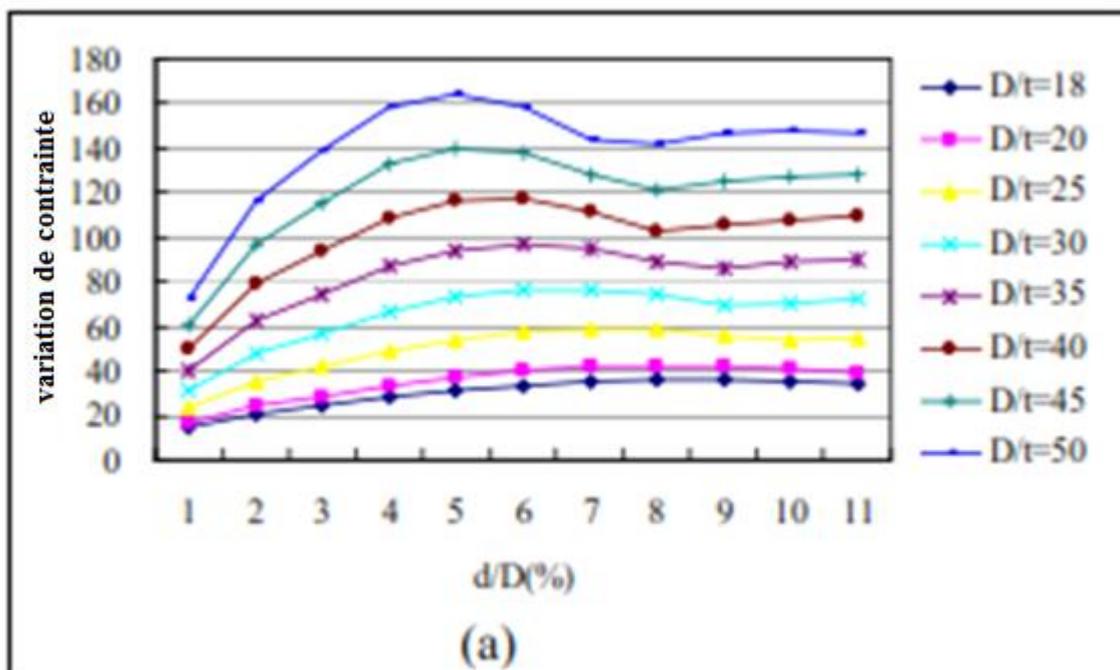


Figure (4.6.a) la variation de la variation de contrainte en fonction de ( $D/t$ ) et ( $d/D$ ). [7]

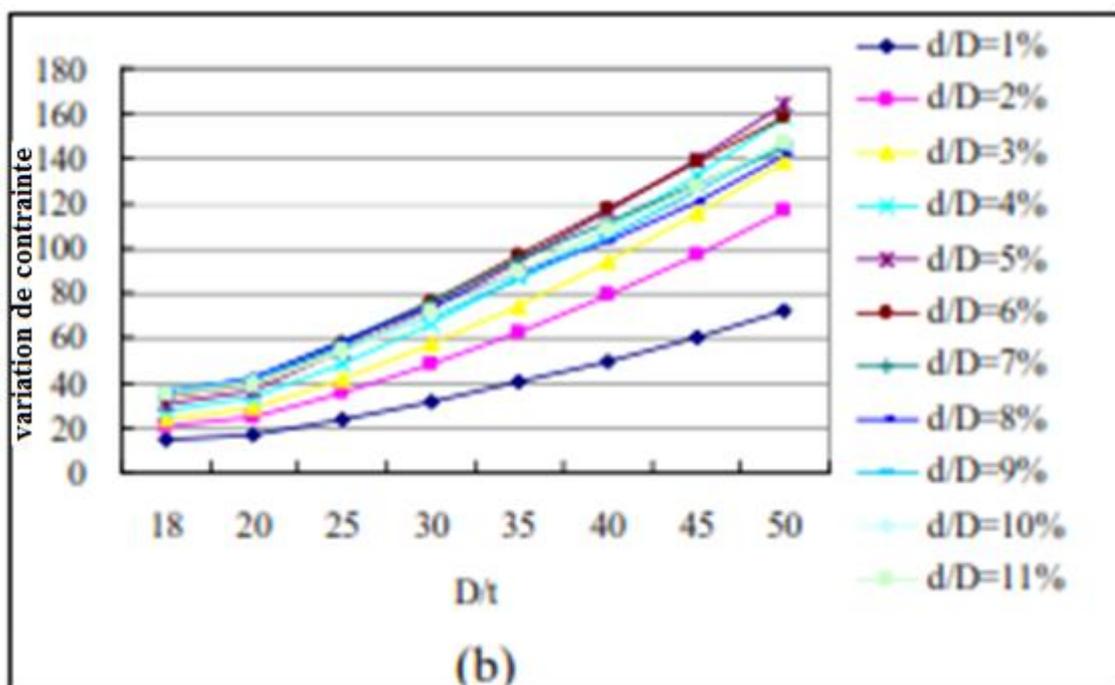


Figure (4.6.b) la variation de la variation de contrainte en fonction de ( $D/t$ ) et ( $d/D$ ). [7]

## CHAPITRE IV ETAT DE L'ART ET SIMULATION NUMERIQUE DE L'ENFONCEMENT

---

YING Wu, PENG Zhang, WU Liu montrent aussi que l'équation de la section AB de la courbe de fatigue de pipe enfoncée (figure 4.7) peut être écrite comme suite [8] :

$$N (\Delta\sigma_p)^m = c \quad (4.1)$$

C : est un constant

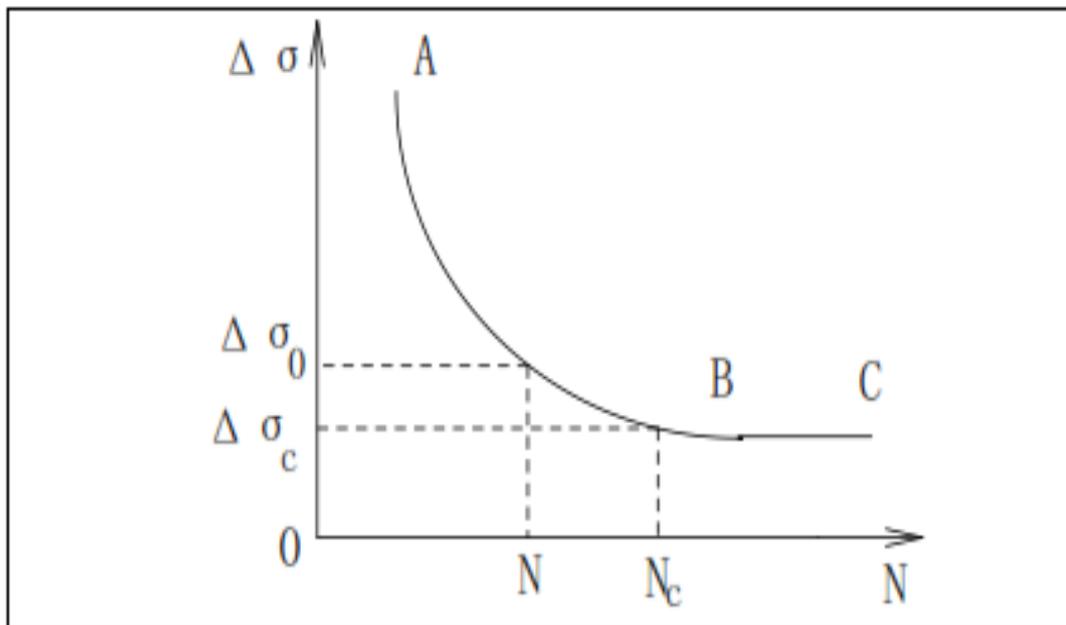
N : le cycle moyen de rupture

$\Delta\sigma$  : Variation de contrainte

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma_p}{\Delta p}$$

$$\Delta\sigma_p = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

$$\Delta p : \text{Variation de pression} = p_{max} - p_{min}$$



La figure 4.7. La courbe de fatigue de pipe enfoncée

A partir de la formule (4.1) et de la figure (4.6), ils ont écrit la formule (4.2), qui permettrait de déterminer les constants C et m.

$$N (\Delta\sigma_0)^m = N_c (\Delta\sigma_c)^m = c \quad (4.2)$$

Dans l'expérience, ils ont remplacé le cycle  $N_0 = 2 \times 10^6$  dont la contrainte correspondant est de  $\Delta\sigma_0 = 78.6$  MPa et le cycle  $N_c = 199.46 \times 10^6$  dont la contrainte correspondant est de  $\Delta\sigma_c = 199.46 \times 10^6$  pour obtenir  $m = 3.74$  et  $C = 2.454 \times 10^{13}$

Donc (4.2) est la formule pour calculer le nombre de cycle de rupture.

$$N = 2.454 \times 10^{13} (\Delta\sigma_p)^{-3.74} \quad (4.3)$$

Par conséquent, la durée de vie de fatigue X peut être calculée comme suit :

$$X = \frac{1}{\sum\left(\frac{n}{N}\right)} \quad (4.4)$$

Avec

n : nombre de cycle,

### VI.1.3.2 Exemple de calcul de la durée de vie de fatigue

Pour un enfoncement de ( $d/D=5\%$ ,  $D/t=50$ ), une variation de pression  $\Delta p = 0.69$  MPa, une pression moyenne de 3.45 MPa .en prend le nombre de cycle 1500 par exemple. La durée de vie de fatigue est calculée comme suit :

Du tableau 4.1 (3.45 Mpa), on a :

$$\frac{\Delta\sigma_p}{\Delta p} = 164.02$$

$$\Delta\sigma_p = 164.02 \times (\Delta p) = 164.02 \times (0.69) = 113.1738 \text{ MPa}$$

De la formule (4.3), on obtient :

$$N = 2.454 \times 10^{13} \times (113.1738)^{-3.74} = 51152$$

De la formule (4.4), on obtient :

$$X = \frac{1}{1500/51152} = 34.1 \text{ année}$$

### IV.I.3.3 Autres model de calcul le nombre de cycle de fatigue

J.F. Kiefner, [9] détermine le nombre de cycle de fatigue en se basant sur la formule suivante :

$$N = \exp \left[ 43.944 - 2.971 \ln \left( \frac{\Delta\sigma}{2} \right) \right] \quad (4.5)$$

Avec

N : le nombre de cycle de la fatigue

$\Delta\sigma_p$  : La contraint =  $\Delta\sigma \times \Delta P$

$\Delta\sigma$  = rapport de variation de contrainte

### IV.I.4 Paramètres régissant la résistance à la fatigue d'enfoncement

Comme présenté précédemment, la profondeur d'enfoncement seule n'est généralement pas un facteur prédictif précis de la sévérité de l'enfoncement en terme de son impact sur la durée de vie de la fatigue en pipeline. Par conséquent la durée de vie de la fatigue, est affectée par un certain nombre de paramètres, incluant :

- Profondeur d'enfoncement
- Longueur d'enfoncement
- Largeur d'enfoncement
- Rapport de profondeur (d/D)
- Rapport de longueur (L/D)

## IV.II. SIMULATION NUMERIQUE D'ENFONCEMENT

Afin de mener notre étude numérique en a utilisé le code «Solidworks version 2013 ».il nous permet de déterminer l'évolution des contraintes et les déformations.



Figure 4.8 Interface de Solidworks

### IV.II.1 Simulation numérique

Afin d'étudier l'évolution des enfoncements, nous avons considéré un pipeline d'une longueur de 1 m et dont les diamètres et l'épaisseur dépend du matériau utilisé. Quatre matériaux de types API 5L sont utilisés à savoir le X52, X60, X70 et X80.

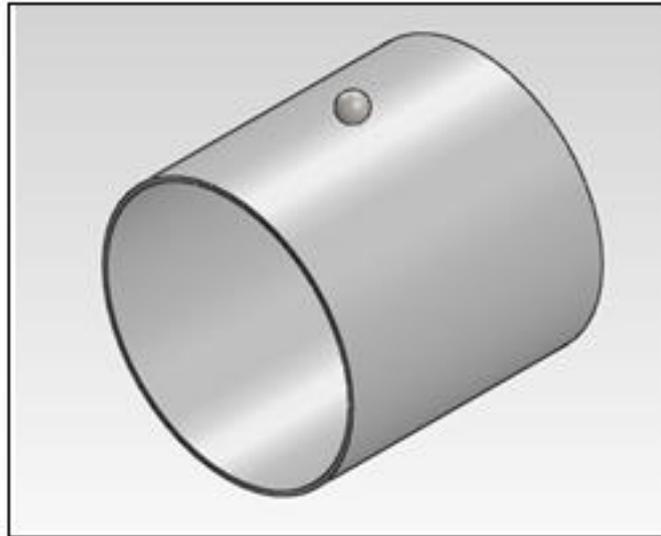
Les caractéristiques géométriques des pipelines étudiés, sont données par le tableau 4.2

Tableau 4.2 caractéristique géométrique des tubes utilisés

acier	Epissure (mm)	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Pression max (bar)
X52	8	700	1000	52
X60	8	700	1000	60
X70	25	1300	1000	100
X80	25	1400	1000	130

## IV.II.2 Méthodologie de création d'un enfoncement :

Une charge de 100 KN est appliquée pour créer un défaut d'enfoncement par l'utilisation d'un pénétrateur de forme sphérique de diamètre 100 mm (Figure 4.9).



La figure 4.9 processus d'enfoncement sous la charge

## IV.II.3 Différentes étapes du comportement mécanique du matériau :

Il est reconnu qu'un matériau ductile présente trois zones à comportement différent durant son déformation : zone à comportement élastique, zone à comportement plastique et zone de striction (figure 4.10).

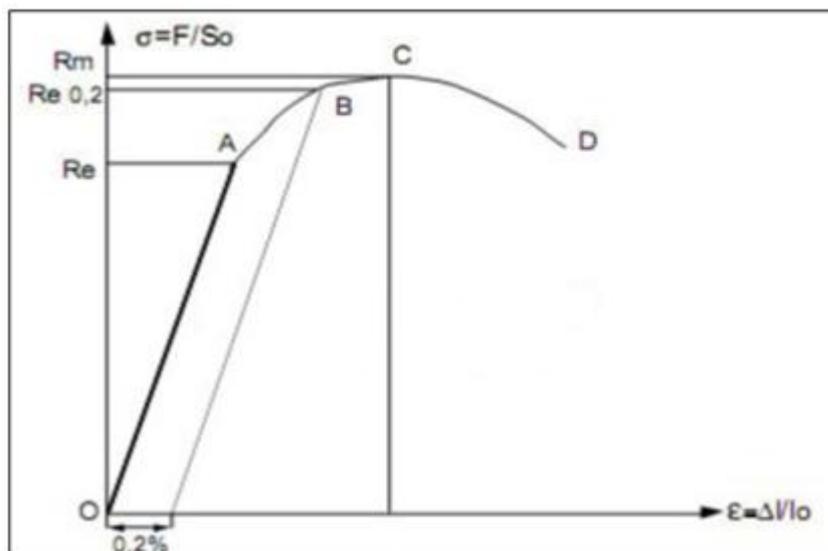


Figure 4.10 : Comportement d'un acier au carbone.

## IV.II.4 Contrainte dans le tube

Durant le transport du gaz ou du pétrole, les pipelines sont soumis à des pressions internes. Ses pressions génèrent des contraintes et des déformations (figure4.11). Les contraintes sont de types radiale  $\sigma_r$ , circonférentielle  $\sigma_\theta$  et de traction  $\sigma_z$ .

$$\sigma_{rr} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_e^2}{r_i^2}\right) \quad (4.6)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_e^2}{r_i^2}\right) \quad (4.7)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \quad (4.8)$$

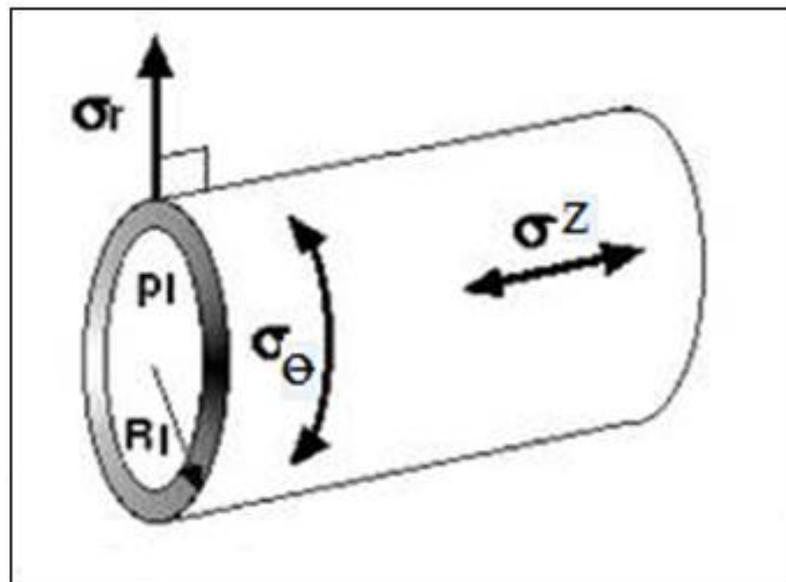


Figure 4.11 les contrainte dans un pipeline

## IV.II.5 Caractéristique mécanique des aciers utilisés

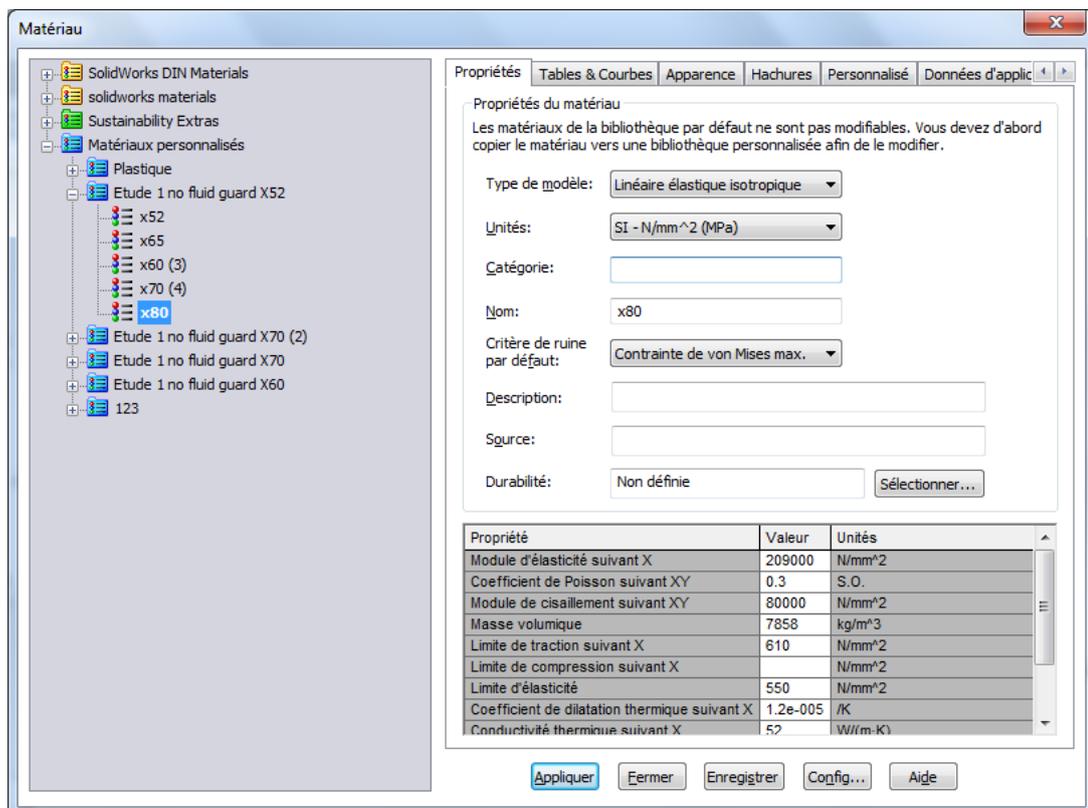
Les caractéristiques mécaniques de métaux étudiés sont représentées dans le tableau (4.3)

# CHAPITRE IV ETAT DE L'ART ET SIMULATION NUMERIQUE DE L'ENFONCEMENT

Tableau 4.3 caractéristique mécanique des aciers

acier	Module de yong « E » (GPa)	Limite élastique 0,2 % (MPa)	Résistance rupture (MPa)	Coefficient de poisson « ν »
X52	200	358	455	0.3
X60	200	414	517	0.3
X70	206	482	565	0.3
X80	209	550	610	0.3

Ces caractéristiques mécaniques sont introduites dans le code Solidworks à travers l'interface donnée par figure (4.12).



*Figure 4.12 Interface matériaux*

## IV.II.6 Choix de l'élément

L'élément qu'on a utilisé est un élément triangulaire parabolique est défini par 3 nœuds aux sommets, 3 nœuds médians et 3 arêtes paraboliques. Pour les études structurales, chaque nœud d'un élément coque possède 6 degrés de liberté, 3 translations et 3 rotations. Les degrés de liberté en translation sont les translations dans les trois directions X, Y et Z. Les degrés de liberté en rotation sont les rotations autour des trois axes X, Y et Z.

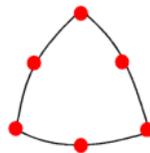
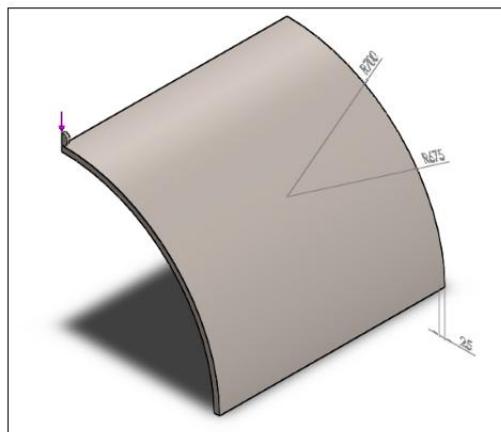


Figure 4.13 Elément triangulaire parabolique

## IV.II.7 Discrétisation du domaine d'étude en éléments finis :

L'analyse est réalisée par la méthode des éléments finis tridimensionnels. Un maillage automatique sera effectué sur la structure et le type d'élément employé pour la modélisation est Un élément triangulaire parabolique. La figure (4.15) représente le maillage de la structure.

**Note :** On utilise un quart de coque cylindrique (figure4.14) pour faciliter les calculs (Diminuer le Nombre des nœuds après le maillage), et pour aussi réduire les pourcentages d'erreur de Calcule même aussi pour créer le défaut d'enfoncement aux structures étudiées Sans aucun problème.



La Figure 4.14. Dimensionnement du tube cylindrique étudié sur Solidworks (Quart de structure).

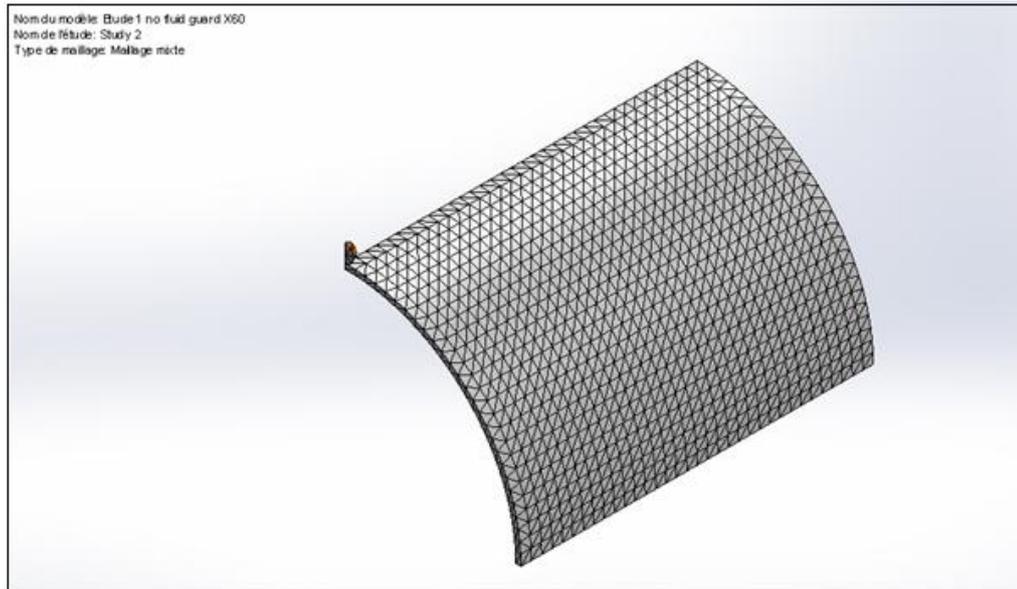


Figure 4.15 : Maillage d'un domaine cylindrique en éléments finis.

## IV.II.8 Condition aux limites

La figure 4.16 montre les conditions au limite qui Nous avons appliqué :

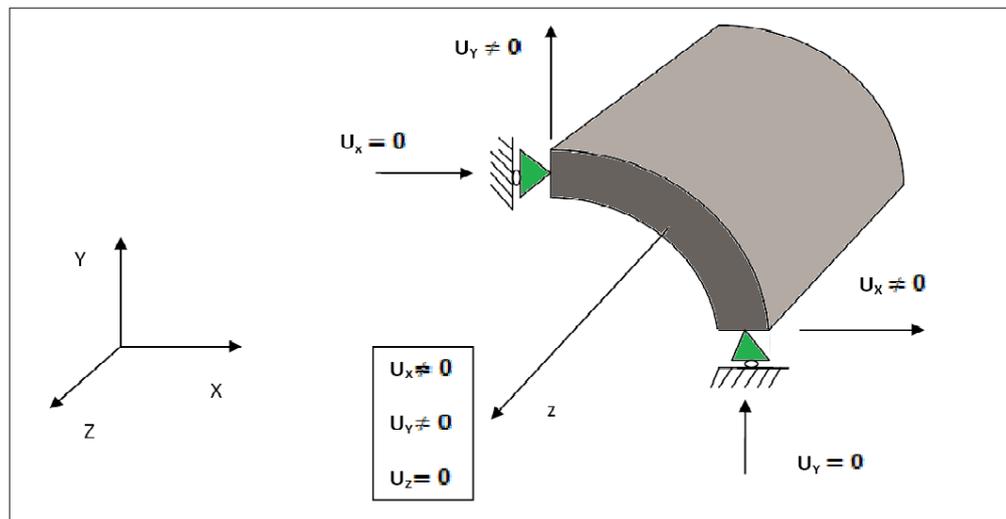


Figure 4.16 conditions aux limites.

## IV.II.9 Application des charges

La configuration étudiée (tube cylindrique), représente une composante de structure soumise à une charge de 100KN (figure 4.17) et un chargement de pression interne (. Les champs de contraintes et

de déplacements pour chaque cas considéré sont obtenus par un calcul aux éléments finis, qui englobe des éléments solides iso paramétriques en trois dimensions.

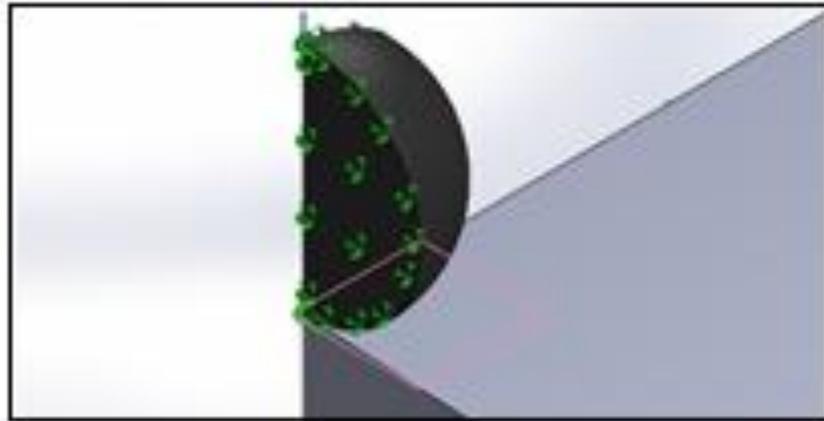


Figure 4.17 l'effet de la charge de pénétrateur sur le tube

## IV.II.10 Analyse et l'interprétation des résultats

La figure 4.18 représente le résultat de l'étude sur l'acier X80, elle montre que la profondeur maximale de l'enfoncement de l'acier X80 est 17 (mm) lorsque le tube est soumis à une charge de 100KN et une pression interne de 130 (bar).

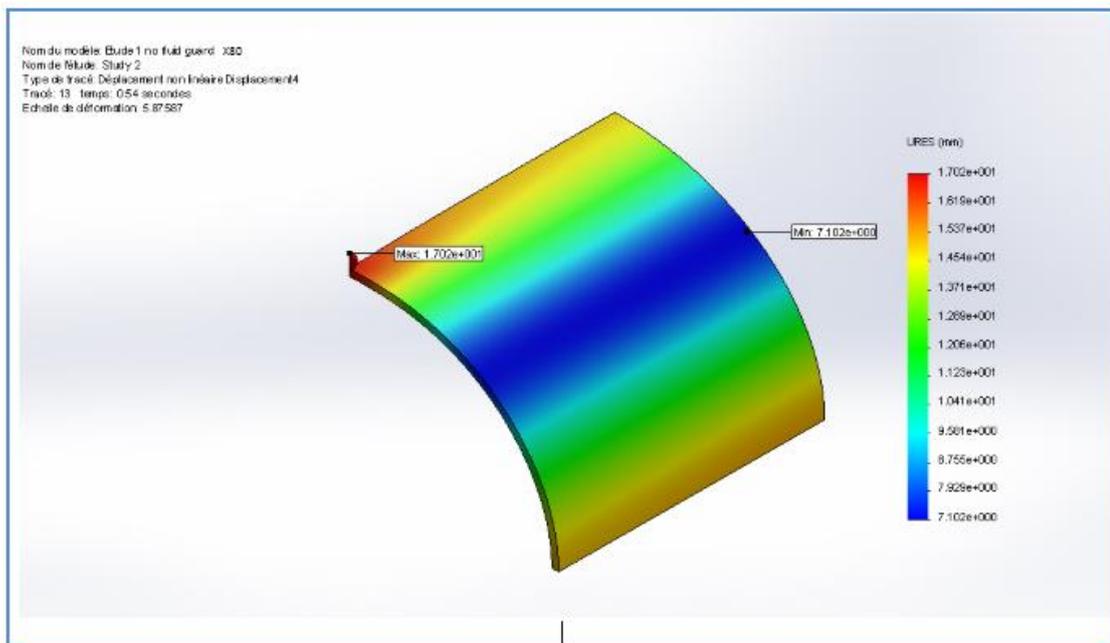


Figure 4.18 : résultat de l'étude sur X80

## CHAPITRE IV ETAT DE L'ART ET SIMULATION NUMERIQUE DE L'ENFONCEMENT

---

Les résultats présentés par figure 4.19 montrent que la profondeur de l'enfoncement varie en fonction du matériau et de la géométrie du pipeline.

La comparaison entre le comportement de l'acier X52 et X60 pour les mêmes dimensions des pipelines (diamètre et épaisseur) montre une légère différence sur la profondeur de l'enfoncement. Cette différence dépend de la pression maximale permise.

Le pipeline en X70 avec un diamètre et une épaisseur supérieurs à ceux du X52 et X60 présente un comportement mécanique différent. Ce comportement se caractérise par une diminution de la profondeur de l'enfoncement.

Les pipelines fabriqués en X70 et X80 présentent les mêmes épaisseurs (25 mm) avec des diamètres différents de pression maximales autorisés de 100 bars et 130 bars respectivement. L'évolution de la profondeur de l'enfoncement montre que cette dernière diminue avec augmentation du rapport  $t/D$ .

L'évolution de la contrainte maximale au point d'application de l'outil d'enfoncement est montrée par la figure (4.20). On constate que la contrainte diminue avec l'augmentation du rapport  $t/D$ . Pour le pipeline en X70 ayant un rapport  $t/D=1.9$  %, la contrainte est nettement inférieure à celle du pipeline en X52, X60 et X80 ayant respectivement les rapports géométriques suivants 1.14 %, 1.14 % et 1.7 %.

Les tableaux 4.4 et 4.5 représentent respectivement les profondeurs de l'enfoncement et les contraintes au point d'application d'enfoncement pour les différents matériaux.

## CHAPITRE IV ETAT DE L'ART ET SIMULATION NUMERIQUE DE L'ENFONCEMENT

Tableau 4 .4 variation de profondeur d'enfoncement (mm) en fonction de temps

Aciers Temps (sec)	X52	X60	X70	X80
0	0	0	0	0
0,04	8,395	8,1856	1,5693	1,9019
0,12	25,185	24,557	4,7079	5,7057
0,26	54,567	53,206	10,2	12,362
0,31	62,248	60,695	11,628	14,09
0,36	68,529	66,818	12,789	15,493
0,365	69,158	67,431	12,905	15,633
0,37	69,57	67,833	12,98	15,724
0,38	70,396	68,638	13,131	15,905
0,4	72,047	70,247	13,432	16,268
0,43	74,524	72,611	13,883	16,811
0,46	75,503	73,614	14,05	17,008
0,5	76,809	74,886	14,273	17,271
0,54	75,475	73,583	13,994	16,924
0,57	74,475	72,585	13,785	16,664
0,6	71,977	70,305	13,291	16,058

# CHAPITRE IV ETAT DE L'ART ET SIMULATION NUMERIQUE DE L'ENFONCEMENT

Tableau 4.5 de variation de contrainte on fonction de temps

Aciers Temps (sec)	X52	X60	X70	X80
0	0	0	0	0
0,04	92,531	91,316	43,748	67,834
0,12	277,59	273,95	131,25	203,5
0,26	601,45	593,55	284,37	440,92
0,31	686,22	677,21	324,43	503,07
0,36	755,61	745,7	357,22	553,95
0,365	762,55	752,55	360,5	559,04
0,37	767,12	757,06	362,66	562,4
0,38	776,27	766,09	366,98	569,11
0,4	794,56	784,15	375,61	582,53
0,43	822	811,24	388,57	602,66
0,46	832,99	822,1	393,75	610,74
0,5	847,65	836,58	400,64	621,51
0,54	833,31	822,45	393,82	611,04
0,57	822,55	811,86	388,71	603,18
0,6	795,35	785,03	375,81	583,27

## CHAPITRE IV ETAT DE L'ART ET SIMULATION NUMERIQUE DE L'ENFONCEMENT

Les figures 4.19 et 4.20 représente respectivement les profondeurs d'enfoncement et les contraintes au point d'application d'enfoncement pour les différents matériaux.

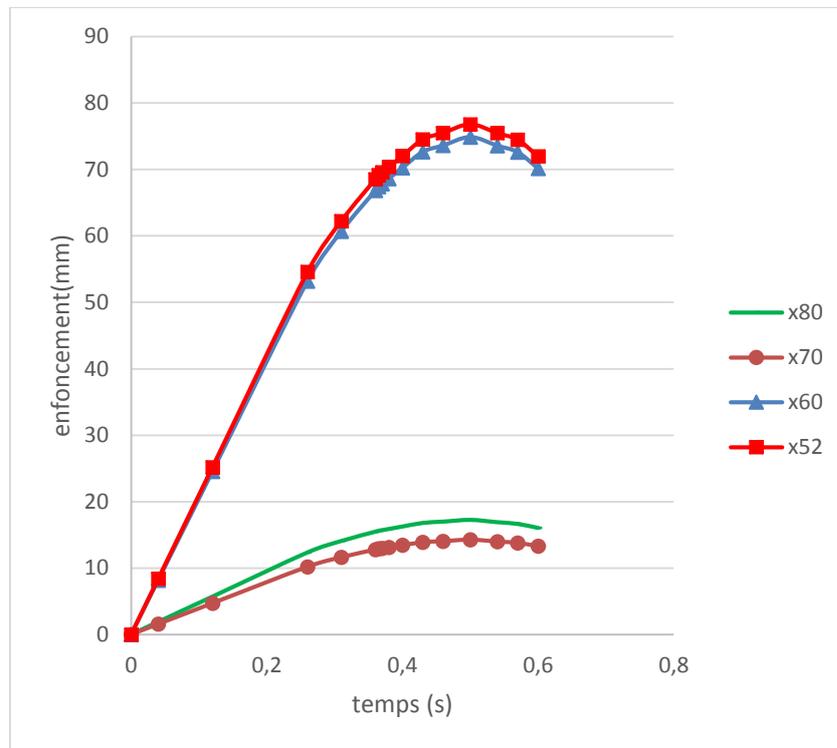


Figure 4.19 Variation de l'enfoncement en fonction de temps

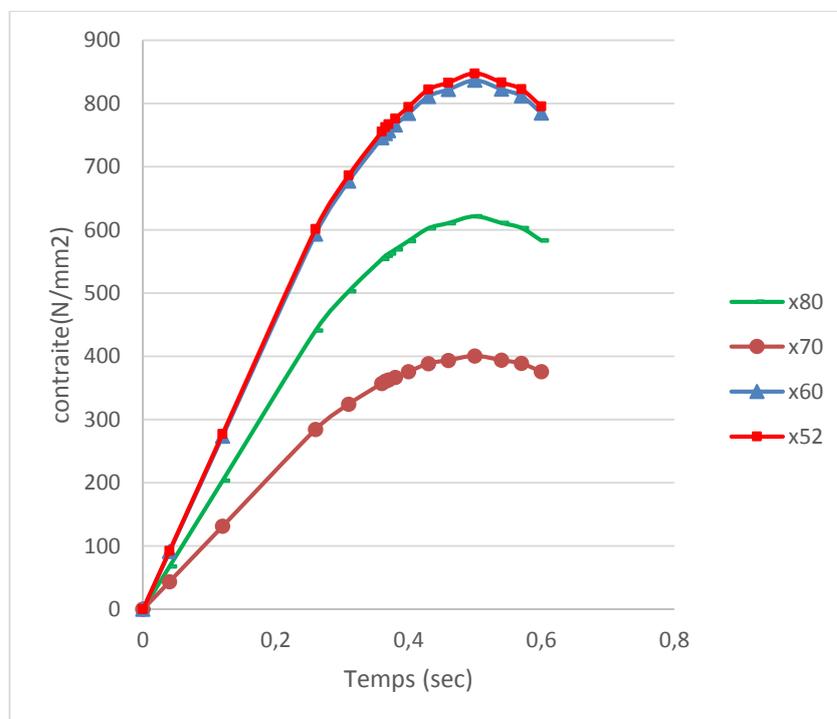


Figure 4.20 Variation de contrainte en fonction de temps

## IV.III Conclusion

Les résultats principaux ont inclus ce qui suit :

- Pour la combinaison des enfoncements et des éraflures, la durée de vie de la fatigue était courte comparativement à l'enfoncement ou éraflures seul.
- Pour les enfoncements, la durée de vie de la fatigue était courte pour des enfoncements plus profonds.
- La durée de vie de la fatigue diminue avec l'augmentation de diamètre de pénétrateur
- La durée de vie de la fatigue augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de pipeline,

## Référence bibliographique de chapitre IV

- [1] Rosenfeld, M.J., Pepper, J.W., Leewis, K.” Basis of the new criteria in ASME B31.8 for prioritization and repair of mechanical damage”. Paper 27122. (2002, October).
- [2] Ironside, S.D., and Carroll, L.B. “Pipeline dent management program”. International Conference on Pipeline Technology Paper 27260 presented at 4th, Calgary. (2002, October).
- [3] Dinovitzer, A., Lazor, R., Carroll, L. B., Zhou, J., McCarver, F., Ironside, S.D., Raghu, D., et Keith, K.” Geometric dent characterization” International Conference on Pipeline Technology. Paper 27076 presented at 4th, Calgary. (2002, October).
- [4] J.R. Fowler, C.R. Alexander, P.J. Kovach, and L.M. Connelly, “Cyclic Pressure Fatigue Life of Pipelines with Plain Dents, Dents with Gouges, and Dents with Welds”, Report PR-201-927 and PR-201-9324, American Gas Association, June 1994.
- [5]. Cosham, A. and Hopkins, P.” The Pipeline Defect Assessment Manual.” International Pipeline Conference” Paper. 27067 presented at ASME 4th, Calgary. (2002, September)
- [6] Leis, B.N., and Hopkins, P.” Mechanical damage gaps analysis”. PRCI Report PR-3-0277. (PRCI Catalogue No L52013). (2003, March)
- [7] YING Wu, , PENG Zhang,, WU Liu,” Fatigue Life Calculation of the In-Service Dented Pipeline “ School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, China 2011.
- [8] Eiber R.J., Maxey W.A., Bert C.W., McClure G.M..”The effect of dents on the failure characteristic of line pipe”, Battelle Columbus Laboratories, NG-18 report No.125 (1981)
- [9] Alexander, C.R., & J.F. Kiefner, “Effects of Smooth and Rock Dents on Liquid Petroleum Pipelines”, American Petroleum Institute, API Publication 1156, November 1997.

# Conclusion Générale

---

## Conclusion générale & Perspectives

Les enfoncements les éraflures, les fissures et les cratères de corrosion présentent des sites préférentiels de la rupture des pipelines. Notre étude est une présentation des différents défauts précurseurs de la rupture des pipelines, ainsi que les méthodes et les outils existants pour leur traitement. Ces méthodes et outils sont basés par l'amélioration de caractéristiques mécaniques et chimiques de l'acier des pipelines. 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 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. L'analyse des défauts dans les pipelines et leurs effet sur le comportement en fatigue a montré que :

- Les fissures dans les joints de soudure réduisent de manière significative la résistance à la fatigue.
- La présence de la corrosion accroît les vitesses de propagation des fissures de fatigue dans la plupart des métaux et alliages.
- la combinaison des enfoncements et des éraflures, réduit considérablement la durée de vie de la fatigue comparativement à l'enfoncement ou éraflure seul.
- Pour les enfoncements, la durée de vie en fatigue dépend de la profondeur d'enfoncement
- La durée de vie de la fatigue diminue avec l'augmentation de diamètre de l'enfoncement de l'enfoncement.
- La profondeur de l'enfoncement dépend de la durée d'application de la charge.

En perspective :

L'effet des paramètres peuvent faire l'objet d'un travail numérique.

- effet de la pression de service
- effet de la forme de l'enfoncement sur la géométrie de l'enfoncement
- effet de l'enfoncement sur la durée de vie en fatigue (amorçage)

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

---

**CHAPITRE I**

**GENERALITES SUR LES PIPELINES ET**

**LES ACIERS**

---

---

**CHAPITRE II**

**APERÇU SUR LA FISSURATION PAR**

**FATIGUE**

---

---

**CHAPITRE III**

**LES DEFAUTS DANS LES**

**PIPELINES**

---

---

**CHAPITRE IV**

**ETAT DE L'ART ET SIMULATION  
NUMERIQUE DE L'ENFONCEMENT**

---

---

# **CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES**

---