

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen
Faculté Des Sciences De L'ingénieur
Département De Génie Mécanique

MEMOIRE

De fin d'étude pour l'obtention du diplôme

INGENIEUR D'ETAT

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Thème

**ETUDE DU COMPORTEMENT EN FATIGUE
DES MATERIAUX POUR PIPELINES**

Présenté par :

LAYATI Mohammed
SALAH Aissa

Devant le jury :

Président : Mr. SEBAA Fethi

Encadreur : Mr. BENACHOUR Moustapha

Examineur : Mr. HADJOUI Fethi

Examineur : Mr. KARA Ali

U.A.B.B TLEMCEN

U.A.B.B TLEMCEN

U.A.B.B TLEMCEN

U.A.B.B TLEMCEN

Soutenu le : 04/07/2012

Dédicace

Je remercie dieu tout puissant qui ma permit d'arriver à ce but.

Chaleureusement je dédie ce modeste travail :

À mes chères parents en témoignage pour leur amour et leur sacrifie sans limite à qui je souhaite la bonne santé et qui dieu me les garde.

À mes frères (FOUZI, SAMIR, NASRO) et touts ma famille.

À mon binôme AISSA et leur famille.

À tous mes amis qui n'ont jamais cessé de m'encourager et me soutenir dans les moments difficiles.

À Tous ceux que j'aime et je respecte.

LAYATI Mohammed

Dédicace

Quoi que de plus que de pouvoir partager les meilleurs moments de sa vie avec les êtres que j'aime.

Arrivé au terme de mes études, j'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

A mes chers parents.

A mes frères SIDI MOHAMED, MOMO, ABDALLAH et mes sœurs AMARRA et ces enfant IMAN, MANAL, DJAMILA, CHAHIRA, SABINA, LATIFA et sa fille KHADIJA.

Et SIHAM, YASMINE, AMAL, NARGIS...

A mon binôme MOHAMMED et leur famille.

A tous mes amis qui j'ai connue durant tout mon cycles d'étude.

A tous ceux qui ont cédé leur temps et leurs connaissances pour satisfaire mes interrogations.

SALAH Aissa

Remerciements

Au terme de la réalisation de ce mémoire, nous tenons à remercier le bon Dieu de nous avoir donné le courage pour mener à terme ce travail.

Il nous est agréable d'exprimer notre reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, plus particulièrement notre encadreur Mr BENACHOUR Moustapha qui a bien voulu diriger ce travail, et qui nous a beaucoup aidés au cours de notre mémoire.

Nous voudrions également exprimer nos vives gratitudee et nos sincères remerciements:

- *Aux membres de jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*
- *Au personnel de l'entreprise NAFTAL de Remchi pour nous avoir aidés à effectuer nos analyses et pour avoir rendu agréable nos conditions de travail et surtout pour leur chaleureuse sympathie.*

Nous n'oublierons pas de remercier tous les enseignants de l'université Abou Bakr Belkaid qui ont assuré notre formation au cours de ces dernières années d'études, ainsi que toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à vous tous!

RESUME

Le but de ce projet est d'analyser le comportement en fatigue des aciers API 5L utilisés pour le transport du gaz et pétrole pipelines à travers une recherche bibliographique. Une synthèse des propriétés métallurgiques des différents aciers à savoir X42, X52, X60, X65 et X70 a été présentée et l'influence de la composition chimique sur les différents comportements mécaniques. L'analyse bibliographique sur le comportement en fissuration par fatigue de quelques nuances d'aciers a montré l'effet des paramètres de chargement (rapport de charge) et d'environnement (Air, Hydrogène, Azote).

Les tubes en service soumises sous pressions, présentent plusieurs défauts qui peuvent être considérés comme des fissures initiales, la présente étude considère l'étude un tube soumis sous pression avec défaut circonférentiel en flexion. Basé sur des données expérimentales, l'effet du chargement est mis en évidence par utilisation du code AFGROW en combinant le modèle de Harter et de Walker. Les résultats ont montrés que la pression interne n'a aucun effet sur la durée de vie et la vitesse de propagation par rapport au chargement de flexion appliqué.

ABSTRACT

The purpose of this work is to analyze the fatigue behavior of API 5L steels used for transporting gas and oil through a bibliographic search. A summary of the metallurgical properties of different steels namely X42, X52, X60, X65 and X70 was presented and the influence of chemical composition on the different mechanical behaviors was investigated. The literature on fatigue crack growth of a few shades of pipeline steel showed the effect of loading parameters (stress ratio) and environmental (Air, Hydrogen, Nitrogen).

The pipeline in service submitted under pressure, exhibit multiple defects that can be considered as initial cracks, this study considers the study of pipeline subjected to internal pressure with circumferential defect in bending. Based on experimental data, the effect of loading is demonstrated by use of AFGROW code by combining the model of Harter and Walker. The results showed that the internal pressure has no effect on fatigue life and crack growth relative to the applied bending load.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	I
DEDICACE.....	II
REMERCIENMENT.....	III
RESUME.....	IV
TABLE DES MATIERES.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
LISTE DES SYMBOLES.....	XVII
LISTE DES ABRIVIATIONS.....	XVII
INTRODUCTION GENERALE.....	2

**CHAPITRE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

I.1.INTRODUCTION.....	4
I.2. HISTOIRE ET TECHNOLOGIE DES PIPELINES.....	4
I.3. LES CARACTERISTIQUES D'UN PIPELINE.....	5
I.4. LE DISPATCHING.....	6
I.5. FONCTIONNEMENT D'UN PIPELINE.....	6
I.6. TRANSPORT PAR PIPELINE.....	7
I.6.1. Quel est l'intérêt d'un transport par pipeline.....	7
I.6.2. Composants des réseaux de transport par pipeline.....	8
I.6.3. Exploitation d'un système de transport par pipeline.....	8
I.6.4. Sécurité industrielle du transport par pipeline.....	9
I.6.5. Transport par oléoducs et gazoducs.....	10
I .7. PROCEDE DE FABRICATION DES TUBES DE PIPELINES.....	11
I.7.1. Les tubes soudés sous forme spiral.....	11
I.7.2. Les tubes soudés sous forme longitudinale.....	12
I.7.2.1. Formage	12
I.7.2.2. Soudage.....	13
I.7.2.3. Expansion et calibrage.....	13
I.7.3. Les tubes sans soudure.....	14
I.8.CAUSE DES DEFAILLANCES DES TUBES.....	15

I.9.PROTECTION DES PIPELINES.....	15
I.9.1. Revêtement des tubes.....	15
I.9.1.1. Revêtements extérieurs.....	16
I.9.1.1.1. Revêtement Fusion Bonded Epoxy.....	16
I.9.1.1.2. Revêtement extérieur polyoléfine 3 couches.....	16
I.9.1.2. Revêtements intérieurs.....	16
I.9.1.2.1. Revêtements pour l'amélioration du débit	16
I.9.2. La Protection Cathodique.....	17
I.10. INSPECTION ET MAINTENANCE DES PIPELINES EN SERVICE.....	19

CHAPITRE II
PROPRIETES METALLURGIQUES

II.1. INTRODUCTION.....	21
II.2. FACTEURS DETERMINANT LA FIABILITE DES ACIERS DES TUBES.....	21
II.3. FACTEURS METALLURGIQUES DETERMINANT LES PROPRIETES DES TUBES.....	22
II.4. INFLUENCE DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LES PROPRIETES DES ACIERS DES TUBES.....	29
II.5. INFLUENCE DU FORMAGE DES TUBES SUR LEURS PROPRIETES MECANIQUES.....	30
II.6. ANALYSE TENDANCIELLE DES AMELIORATIONS DES ACIERS DES PIPELINES.....	32
II.6.1. Evolution des dimensions des tubes et des conduites.....	32
II.6.2. Evolution des caractéristiques mécaniques des tubes.....	33
II.6.3. Evolution de la composition chimique des aciers des tubes.....	34
II.7.OBSERVATION METALLOGRAPHIQUE.....	35
II.7.1. Microstructure de X42.....	35
II.7.2. Microstructure de X52.....	35
II.7.3. Microstructure de X60.....	36
II.7.4. Microstructure de X65.....	37
II.7.5. Microstructure de X70.....	38
II.7.6. Microstructure de X80.....	39

CHAPITRE III
SOLLICITATIONS SUR LES TUBES SOUS PRESSIONS

III.1. INTRODUCTION.....	42
III.2. DIFFERENTES ETAPES DE COMPORTEMENT DU MATERIAU.....	42
III.3. SOLLICITATION DU CORPS DU TUBE.....	43
III.3.1. Contraintes dans un tube à parois épaisses	43
III.3.1.1. Tube à parois épaisses soumis à la pression (P_0 et P_1).....	43
III.3.1.2. Tube à parois épaisses soumis à la pression interne P_1 ($P_0 = 0$)	44
III.3.1.3. Tube à parois épaisses soumis à la pression externe P_0 ($P_1 = 0$)	46
III.3.2. Contraintes dans un tube à parois minces soumis à une pression interne.....	46
III.3.2.1. Contrainte tangentielle dans la paroi du tube X70.....	49
III.4. LES TYPES DES FISSURES.....	50
III.4.1. Fissuration longitudinale dans un tube.....	51
III.4.2. Les fissures circonférentielles dans un tube.....	51

CHAPITRE IV
COMPORTEMENT EN FATIGUE DES PIPELINES

IV.1. INTRODUCTION.....	54
IV.2. L'AMORÇAGE	54
IV.3. FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTE.....	55
IV.4. COURBE DE WÖHLER (S-N)	55
IV.5. MODES DE RUPTURE.....	56
IV.6. RISQUE DE FISSURATION PAR FATIGUE AU-DELA DE 10^7 CYCLES.....	57
IV.7. MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT.....	58
IV.7.1. Stades d'endommagement.....	58
IV.7.2. Phase d'amorçage sur défaut.....	59
IV.7.3. Phase de propagation.....	60
IV.8. MECANISMES ET MODELES DE FISSURATION.....	61
IV.9. CONTRAINTES APPLIQUES.....	61
IV.9.1. Contrainte nominale.....	61
IV.9.2. Cycle de contrainte et types de sollicitations.....	62
IV.9.3. Limite de fatigue.....	63

IV.10. EVOLUTION PHYSIQUE ET STRUCTURALE.....	64
IV.10.1. Evolution physique.....	64
IV.10.1.1. Influence du niveau de contrainte.....	64
IV.10.1.2. Influence du nombre de cycles.....	65
IV.10.2. Evolution structurale.....	66
IV.10.2.1. Modifications superficielles en cours de fatigue.....	66
IV.10.2.2. Modification interne.....	67
IV.10.2.3. Propagation des fissures.....	68
IV.10.2.3.1. Méthode de mesure de la vitesse de propagation d'une fissure en fatigue.....	70
IV.10.2.3.2. Principe du calcul de la durée de vie.....	71
IV.11. COURBES DE PROPAGATION DES FISSURES POUR LES MATERIAUX PIPELINES.....	73
 CHAPITRE V PREDICTION DU COMPORTEMENT EN FATIGUE	
V.1. INTRODUCTION.....	80
V.2. PRESENTATION DU CODE.....	80
V.2.1 Modèle de Harter	82
V.2.2 Modèle Géométrique.....	83
V.3. Matériaux d'étude.....	85
V.4. RESULTAT & DISCUSSION.....	86
V.4.1. Effet du rapport de charge R.....	86
V.4.2. Effet de l'amplitude de chargement	87
V.4.3. Effet de la pression à R = 0.1.....	89
V.4.4. Effet de la fissure initiale	90
V.4.5. Comparaison des vitesses de fissuration pour deux types de matériaux X70 et X65.....	91
CONCLUSION GENERALE.....	93
BIBLIOGRAPHIE.....	95

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Pipelines.....	4
Figure I.2 : Déclassement du mélange.....	7
Figure I.3 : Poste de coupure	8
Figure I.4 : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale.....	11
Figure I.5 : Les étapes de fabrication de tubes soudés longitudinalement.....	12
Figure I.6 : Formage en U.....	13
Figure I.7 : Formage en O.....	13
Figure I.8 : soudage de la fabrication des tubes soudés en long.....	13
Figure I.9 : Machine d'expansion.....	14
Figure I.10 : Fabrication de pipe sans soudure « Schéma du filage sur aiguille permettant d'obtenir un tube sans soudure »	14
Figure I.11 : Causes des ruptures de pipelines en cours d'exploitation enregistrées par les membres de L'ACPRÈ de 1985 à 1995 (Association Canadienne des Pipelines de Ressources Energétiques).....	15
Figure I.12 : Revêtement FBE.....	16
Figure I.13 : Revêtement extérieur.....	16
Figure I.14 : Revêtements en résine époxy liquide pour les pipelines d'eau.....	17
Figure I.15 : Schéma simplifié de protection cathodique par générateur de courant ..	18
Figure I.16 : Outil d'inspection de pipeline.....	19

Chapitre II

Figure II.1 : Schéma de la rupture fragile et de la rupture ductile d'un acier en fonction de la température d'essai	22
Figure II.2a : Durcissement par solution solide.....	25
Figure II.2b : Influence des éléments sur R_e et $T_{50/50}$	25
Figure II.3 : Influence de la taille du grain α sur R_e et $T_{50/50}$	26
Figure II.4 : Mise en solution des éléments dispersoïdes	27

Figure II.5 : Evolution du grain avec la température et la taille des précipités de AlN.....	28
Figure II.6 : Evolution de Re avec la teneur en N libre à l'austénitisation	29
Figure II.7 : Courbe d'élasticité pour diverses classes d'aciers des tubes.....	31
Figure II.8 : La microstructure de l'acier X42	35
Figure II.9 : Microstructure de l'acier API 5L X52, analyse longitudinale, avec un grossissement de X570 et de X1150	36
Figure II.10 : Microstructure de l'acier API 5L X52, analyse transversale, avec un grossissement de X570 et de X1150.....	36
Figure II.11 : Microstructure des échantillons de l'acier X60 après le laminage	37
Figure II.12 : Microstructure des échantillons de l'acier X60 après le traitement thermique, coupe dans le sens longitudinal	37
Figure II.13 : microstructure de l'acier X65 Sens travers du laminage.....	38
Figure II.14 : Microstructure ferrito-perlitique de l'acier de type X70, plan LT	38
Figure II.15 : La microstructure de l'acier X80, pris dans le coeur de la tôle, dans le plan d'observation TL	39
Figure II.16 : Observations en microscopie optique de la peau de la tôle perpendiculairement à l'épaisseur(a), au sens longitudinal(b) et au sens transverse(c).....	40

Chapitre III

Figure III.1 : Comportement d'un acier au carbone (vierge).....	42
Figure III.2 : Direction des contraintes dans un tube.....	43
Figure III.3 : La pression interne et externe agit sur le tube.....	44
Figure III.4 : La pression interne agit sur le tube.....	45
Figure III.5 : Les contraintes agissent dans un tube à parois épaisse soumis à une pression interne.....	45
Figure III.6 : La pression externe agit sur le tube.....	46
Figure III.7 : Géométrie du tube considéré.....	47
Figure III.8 : Variation du rapport contrainte circonférentielle / contrainte équivalente en fonction du rapport contrainte longitudinale / contrainte irconférentielle.....	48
Figure III.9 : Etats de contraintes dans un tube soumis à la pression intérieure.....	49
Figure III.10 : Equilibre d'une demi-section de tube soumis à la pression interne....	50

Figure III.11 : Différentes géométries des fissures.....	50
Figure III.12 : Mode de rupture d'une canalisation dans le cas d'une fissuration Longitudinale.....	51
Figure III.13 : Géométrie d'un tube avec une fissure circonférentielle étudiée.....	51

Chapitre IV

Figure IV.1 : Courbe de Wöhler et les différents domaines de fatigue.....	55
Figure IV.2 : Les trois modes de rupture.....	57
Figure IV.3 : (a) illustration des trois stades de la rupture par fatigue, l'amorçage, la propagation par fatigue, la rupture brutale, (b) exemple d'une rupture par fatigue....	58
Figure IV.4 : Amorçage de micro-fissures de fatigue dans une fonte à graphite sphéroïdal, les fissures s'amorcent sur les nodules ou sur les porosités, les porosités sont sévères.....	59
Figure IV.5 : Amorçage d'une fissure de fatigue par corrosion sous contrainte.....	60
Figure IV.6 : Fissuration par fatigue en stade I.....	60
Figure IV.7 : (a) Stries de fatigue dans l'alliage de Titane TA6V ($K_{max}=40$ MPa(m ^{1/2}), 20°C), (b) Stries de fatigue dans un alliage d'aluminium	61
Figure IV.8 : Cycle de contrainte de la fatigue.....	62
Figure IV.9 : Différents types de sollicitations.....	63
Figure IV.10 : Définition de la limite de fatigue.....	64
Figure IV.11 : Variation de la résistance électrique et la température d'une éprouvette, mesurées au cours d'un essai de flexion relative, sous charge croissante, d'un acier doux.....	65
Figure IV.12 : Variation de la résistance électrique de l'éprouvette du couple de torsion exercé sur une éprouvette entaillée au cours d'un essai de fatigue en torsion alternée.....	66
Figure IV.13 : Défaut de la paroi externe d'une canalisation métallique.....	67
Figure IV.14 : Exemple de réservoirs sous pression contenant une fissure axiale et circonférentielle.....	68
Figure IV.15 : Détail du faciès de rupture d'une éprouvette d'acier de type X65. a) zone ductile b) fissure interne.....	68
Figure. IV.16 : Représentation générale de l'évolution du taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes : $da/dN = f(\Delta K)$...	70

Figure IV.17 : Principe de la détermination de la vitesse de propagation d'une fissure en fatigue.....	71
Figure IV.18 : Contribution de l'amorçage et de la propagation de fissure.....	72
Figure IV.19 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X42, et X70	73
Figure IV.20 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X52.....	74
Figure IV.21 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X70	75
Figure IV.22 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X60.....	76
Figure IV.23 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X65 (Sens T-L et T-S).....	77
Figure IV.24 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X80 et A516	78

Chapitre V

Figure V.1 : Interface géométrie	80
Figure V.2 : Interface matériau	81
Figure V.3 : Interface chargement	81
Figure V.4 : Taux de propagation de la fissure de T-méthode de Harter décalant en fonction de R.....	82
Figure V.5 : Géométrie de l'éprouvette.....	84
Figure V.6 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue du pipeline en X70.....	86
Figure V.7 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration du pipeline en X70.....	87
Figure V.8 : Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue du pipeline en X70 à $R = 0.1$	88
Figure V.9 : Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration du pipeline en X70 à $R = 0.1$	88
Figure V.10 : Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue du pipeline en X65 à $R = 0.1$	89

Figure V.11 : Effet de la pression interne sur la durée de vie en fatigue du pipeline en X70.....89

Figure V.12 : Effet de la longueur initiale de la fissure la durée de vie en fatigue du pipeline en X70.....90

Figure V.13 : Comparaison des vitesses de fissuration pour les matériaux X65 et X70.....91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1.....23

Tableau II.2.....23

Tableau II.3.....24

Tableau II.4.....24

Tableau V.1.....85

Tableau V.2.....85

Tableau V.3.....90

LISTE DES SYMBOLES

- a : Rayon intérieur du cylindre
b : Rayon extérieur du cylindre
B : La largeur de bande
C : Coefficient de Paris dépend de matériau
 D_{ext} : Le diamètre extérieur de tube formé
d : Diamètre interne de tube
e : Epaisseur du tube
F : Force de traction
 F_t : Facteur géométrique correspondants à σ_t
 F_b : Facteur géométrique correspondants à σ_b
K : facteur d'intensité de contrainte
M : Moment fléchissant
m : Paramètre de matériau
 N_R : Nombre de cycles à rupture
 P_i : Pression interne
 P_0 : Pression externe
R : Rapport de charge
r : rayon
 K_I : Facteur d'intensité de contraintes
 σ_r : Contrainte normale radiale
 σ_θ : Contrainte normale circonférentielle
 σ_z : Contrainte normale longitudinale
 σ_t : Contrainte de traction
 σ_b : Contrainte de flexion
 σ_a : L'amplitude de contrainte
 σ_m : Contrainte moyenne
 σ_D : Limite de fatigue
 σ_{max} : Contrainte maximale
 σ_{min} : Contrainte minimale
 $\sigma_{0,2}$: Limite d'élasticité (0,2% de déformation plastique)
 σ_R : Résistance à la rupture
 σ_V : La contrainte équivalente au sens de Von Mises
 β : L'angle d'introduction de la bande par rapport au l'axe symétrique
 ε : Déformation

LISTE DES ABRIVIATION

API : American Petroleum Institute

FBE : Fusion-Bonded Epoxy

PE : Polyéthylène

PP : Polypropylène

PSL : Pipes Steel Line (tube de conduite)

HLE : Haute Limite d'Elasticité (l'acier)

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

De nombreuses structures mécaniques sont soumises à des sollicitations cycliques, au cours de leur fonctionnement. L'endommagement par fatigue apparaît lorsqu'un matériau est souvent soumis à des efforts inférieurs à la limite d'élasticité du matériau (domaine d'endurance), une rupture survient au bout d'un certain nombre de cycles. Il peut conduire à la rupture des pièces par l'amorçage et la propagation des fissures. Lorsqu'une structure mécanique présente une fissure de fatigue, un contrôle continu de suivi de sa propagation est souvent nécessaire afin d'intervenir avant que celle-ci n'atteigne une taille critique.

Le but du présent mémoire est «L'étude de la fissuration des pipelines en acier API 5L X65 et API 5L X70 utilisés pour le transport du gaz et du pétrole basé sur des résultats expérimentaux ». La prédiction des durées de vie en fatigue et des vitesses de fissuration est basée sur des techniques d'interpolation en utilisant de méthode de HARTER qui utilise le modèle de propagation de Walker.

Ce manuscrit est divisé en cinq parties :

Le premier chapitre nous avons donné une idée sur l'importance et fonctionnement des pipelines.

Le deuxième chapitre présente les différentes caractéristiques métallurgiques des matériaux pipelines.

Le troisième chapitre nous avons présenté différents contraintes soumis dans un tube, et la détermination de la contrainte de flexion et la contrainte de traction en mode I pour un défaut circonférentiel.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation du phénomène de fatigue, les paramètres d'effets (matériau, géométrie et chargement, ...etc.) et les mécanismes de propagations des fissures.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation et discussion des résultats obtenus dont les effets de chargement et la fissuration d'un pipeline en X70 et X65 pour une fissure circonférentielle.

Chapitre I :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION :

Un pipeline (de l'anglais) est un ensemble de canalisations en acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement, presque toujours enterrées, destinée à l'acheminement de matières gazeuses ou liquides, d'un endroit à un autre.

Un pipeline permet l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires. Sa longueur peut varier de quelques kilomètres à des centaines, voire des milliers de kilomètres. Bien souvent les pipelines sont interconnectés entre eux pour former un réseau parfois très dense, formant une sorte de « toile d'araignée ».

Ces réseaux mettant en communication différents points d'entrée des produits avec différents points de sortie, permettent de diversifier les sources d'approvisionnement aux meilleures conditions économiques possibles et avec un maximum de sécurité de la livraison en temps voulu.



Figure I.1 : *Pipelines*

Selon le produit transporté, les pipelines ont des noms ainsi que des réglementations, des techniques de construction et d'exploitation différentes.

Les principaux systèmes de transport par pipeline concernent :

- le gaz naturel, transporté par gazoduc.
- les hydrocarbures liquides, dont surtout le pétrole, transportés par oléoduc.
- l'eau douce, principalement pour l'irrigation, dans des conduites ou émissaires ou aqueducs.

I.2. HISTOIRE ET TECHNOLOGIE DES PIPELINES :

Le premier pipeline a été construit en 1869 par Benson [1] pour éviter le monopole du transport de pétrole par chemin de fer que Rockefeller s'était assuré. Des progrès technologiques énormes ont été réalisés dans tous ces domaines, surtout depuis 1950.

Les coûts de transport ont été réduits partout mais certaines méthodes restent beaucoup plus chères que d'autres.

La technologie des tuyauteries a été révolutionnée, surtout par les progrès de la soudure. Des machines automatiques produisent de grands tuyaux de diamètre précis. Ils sont acheminés sur place et mis dans des tranchées ou sur des supports par des grues spéciales. Des systèmes permettent d'emboîter les tuyaux avec précision. Les tubes soudés peuvent suivre le relief du terrain et n'ont pas de fuites malgré des pressions internes de plus de 10 atmosphères. La construction d'un pipeline peut ainsi progresser de un km par jour.

Les pointes de pression causées par des coups de bélier ou autres peuvent être importantes. La structure, les parois et les soudures doivent résister à des pressions très élevées, de l'ordre de 100 atmosphères. Des stations de pompage sont installées tous les, disons, 40 km. Elles comprennent des pompes centrifuges de grande puissance, des valves commandées à distance et des réservoirs préfabriqués. L'entretien est réduit. Des sections de pipelines peuvent être isolées pour vérification, nettoyage ou réparation. Des chariots robots circulent dans les pipelines pour les inspecter ou les nettoyer.

I.3. LES CARACTERISTIQUES D'UN PIPELINE :

Un pipeline se caractérise tout d'abord par sa ligne qui est constituée de tubes d'acier pouvant résister à une pression de 100 bars environ. Son diamètre courant est compris entre 15 cm à 1 mètre. Son épaisseur varie de 4 à 13 mm. La profondeur d'enfouissement dans le sol varie de 0,6 à 1 mètre selon son ancienneté et ses lieux de passages.

Les caractéristiques des tubes (diamètre, épaisseur, type d'acier) sont définies par calcul en fonction de plusieurs paramètres tels que : le débit souhaité, le profil du terrain, les zones environnementales traversées, la réglementation en vigueur, etc....

Les pipelines sont protégés extérieurement par un revêtement isolant (brai, bandes, polymère, etc...) leur évitant toute agression venant du milieu environnant ; cette protection est complétée par l'imposition d'un potentiel électrique (procédé dit de « protection cathodique ») empêchant les courants vagabonds de provoquer une corrosion extérieure à la conduite.

Des stations de pompage permettent de faire avancer le ou les liquides contenus dans la ligne. Elles sont composées de pompes entraînées par des moteurs électriques ou thermiques (plus rarement), d'une puissance allant de 200 à 1500 KW. Dans ces conditions, les débits réalisables peuvent fluctuer de quelques centaines de m³/h à 2500 m³/h, ce qui représente des volumes considérables comparés aux autres moyens de transport. La vitesse de déplacement de la veine fluide, quant à elle, reste faible : 1 à 3 m/s (soit 3,6 à 10 Km/h).

On distingue les stations de pompage expéditrices (dites aussi « de tête ») prenant en charge les produits confiés au pipelineur (transporteur), des stations intermédiaires (dites « relais ») situées le long de la ligne et capables d'assurer le débit de pompage souhaité.

Des terminaux, situés en entrée et en sortie de chaque pipeline, permettent de prendre en compte les volumes des produits pris en charge ainsi que leurs caractéristiques physico-chimiques.

Toutes les installations du pipeline sont téléconduites à partir d'un dispatching capable de détecter des anomalies pouvant survenir et de réagir en conséquence.

I.4. LE DISPATCHING :

L'ensemble des installations d'un pipeline est contrôlé depuis un point central, le dispatching, véritable centre nerveux du système d'exploitation.

Le dispatching coordonne en temps réel et 24 heures sur 24 toutes les opérations nécessaires à l'exécution des plans de pompage transmis par le planning. Il assure également la télésurveillance de sécurité des lignes et des installations.

Le dispatching utilise un système de télécontrôle et de télécommande conçu pour manœuvrer à distance toutes les installations automatisées du pipeline (stations expéditrices, stations relais et terminaux).

Ce système permet de surveiller en permanence les paramètres témoins du bon fonctionnement du réseau et notamment l'état des vannes et des groupes motopompes, les paramètres hydrauliques des lignes, le comptage et l'instrumentation associée.

I.5. FONCTIONNEMENT D'UN PIPELINE :

Le transport de produits impose que la ligne soit toujours pleine (un produit en pousse un autre) et que l'on trouve en sortie des capacités suffisantes pour pouvoir le recevoir.

Lorsqu'un pipeline transporte plusieurs produits différents, il est dit multiproduits. Les produits se poussent selon des séquences prédéfinies. Celles-ci sont organisées en fonction de la compatibilité et des spécifications des produits transportés (gasoil et fioul domestique, essence Sans Plomb 95 avec essence Sans plomb 98...). Seul le jet ou kérosène ne supporte aucun mélange pour des questions de sécurité.

Au sein d'une séquence, les deux produits en contact se mélangent au cours du transport, deux cas de figure I.2 se présentent alors :

- a) la zone de mélange est compatible avec l'un des deux produits, celle-ci est alors injectée dans le produit compatible, en général, le moins « noble » (exemple : le

mélange issue d'une contamination du Sans Plomb 95 avec du Sans Plomb 98 est reclassé dans le Sans Plomb 95).

- b) la zone de mélange est totalement incompatible avec les deux autres produits, alors, celle-ci (appelée contaminat) est soutirée et stockée dans un bac spécifique (dit « bac conta ») en vue de son retour en raffinerie pour retraitement ultérieur.

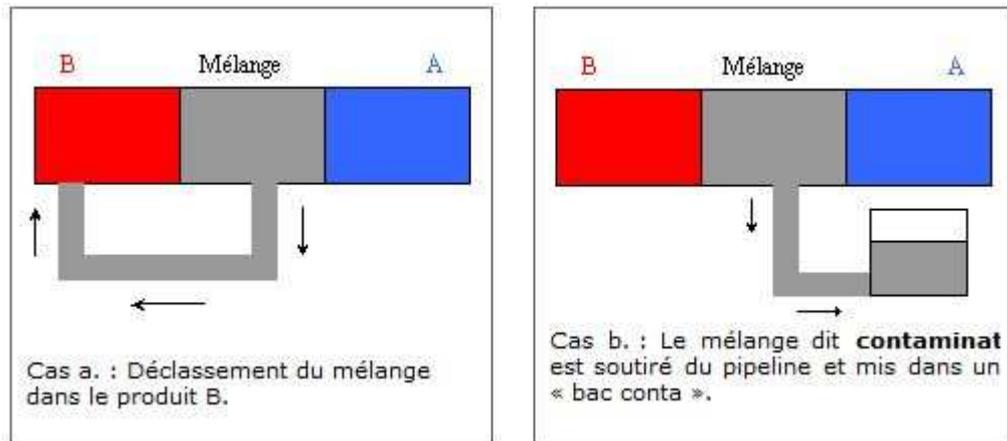


Figure I.2 : Déclassement du mélange [24].

I.6. TRANSPORT PAR PIPELINE :

Le pétrole et le gaz fournissent 60% du carburant primaire du monde. Par conséquent, il n'étonne pas pour découvrir qu'il y a plus de 1 million de tonnes d'huile et de 250 millions mètres cubique de gaz consommés chaque heure dans le monde.

La majeure partie de ce pétrole et gaz est transportée dans des pipelines. Les plus grands de ces pipelines s'appellent les pipelines de transmission, le grand public ne verra pas normalement ces lignes comme elles sont sous la mer, ou enterré sur la terre, mais elles sont les artères principales des systèmes de transport de pétrole et de gaz.

I.6.1. Quel est l'intérêt d'un transport par pipeline :

Un pipeline présente de nombreux avantages, dont certains sont décisifs, par rapport aux autres moyens de transport. En effet, c'est :

- Un mode de transport massif (60 M.litres/Jour par exemple).
- Un transport à haut degré de sécurité avec moins de deux incidents pour 10.000 Km de pipeline par an.
- Un approvisionnement sûr, insensible aux intempéries et aux conditions atmosphériques, fonctionnant 24 heures sur 24 tous les jours de l'année.
- Le mode de transport massif le moins cher sur moyenne et longue distance, ne nécessitant pas d'opération de manutention. A titre de comparaison les coûts moyens par tonne et pour 100 Km sont :

- Pipeline : 1,8 à 2,1 €
- Train (2000 T) : 2,7 €
- Barge : 2,7 à 4,1 €
- Camion (38 T) : 4,1 €

I.6.2. Composants des réseaux de transport par pipeline :

Les réseaux de transport par canalisation sont composés de tronçons de conduites et d'ouvrages connexes remplissant des fonctions précises :

- **Les stations d'injection ou de départ** constituent les points d'entrée du réseau de transport. Suivant leur configuration et leur position géographique ce peuvent être des stations d'atterrage, des terminaux, des stations d'entrée.
- **Les stations de compression** (pour les gaz) ou stations de pompage (pour les liquides) sont réparties régulièrement le long des réseaux de transport pour maintenir la pression et la vitesse du fluide dans les canalisations.
- **Les postes de livraison** permettent de mettre la matière transportée à disposition des destinataires intermédiaires ou finaux.
- **Les postes de détente ou poste de régulation** permettent de diminuer la pression de fluide à l'aval. Ces postes sont souvent associés à des postes de livraison. Ils peuvent aussi séparer des portions de réseau exploités à des pressions différentes.
- **Les stations d'arrivée** marquent l'extrémité d'un réseau de transport. Ce peut être un réservoir de stockage ou le début d'un réseau aval de transport ou de distribution.

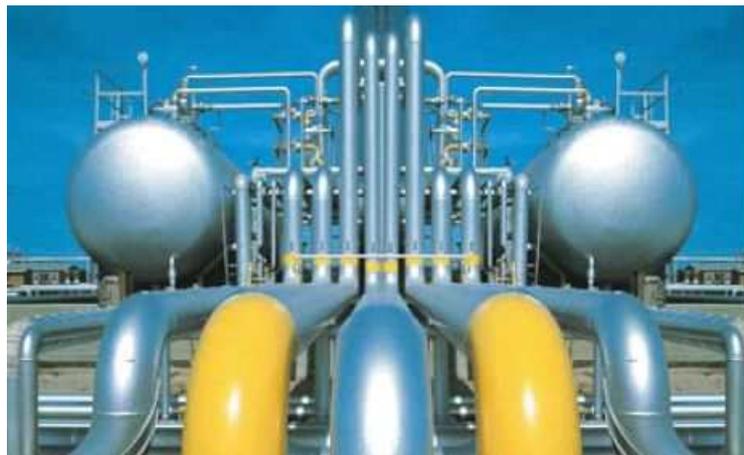


Figure I.3 : *Poste de coupure*

I.6.3. Exploitation d'un système de transport par pipeline :

Une fois le modèle économique défini et les ouvrages construits (ou acquis), la pérennité du transport par canalisation implique l'exploitation (conduite, au sens utilisation) et la maintenance (entretien) du réseau de transport.

Pour cela, l'opérateur définit des règles techniques et organisationnelles, rassemblées dans un système de management de la qualité, de la sécurité et de l'environnement conforme aux réglementations et règles de l'art en vigueur.

La conduite des flux de produits, par l'intermédiaire d'organes tels que robinets, vannes, régulateurs, événements, compteurs, ... se fait de plus en plus souvent à distance depuis un centre de répartition (dispatching en anglais), à l'aide d'un système de supervision et de télécommandes.

Les systèmes de télégestion et télésurveillance des réseaux sont de plus en plus sophistiqués avec les progrès techniques réalisés. Certains opérateurs mettent en œuvre des systèmes intelligents voire des systèmes experts qui auscultent périodiquement l'état de la canalisation et préconisent des actions préventives ou curatives de conduite ou de réparation.

L'entretien ou le remplacement physique des organes est réalisé suivant des programmes de maintenance définis par l'opérateur et mis en œuvre par son personnel propre et/ou par des prestataires externes.

Le nettoyage ainsi que la vérification de la cylindricité des canalisations sont réalisés par le passage de pistons de conception adaptée à la fonction recherchée (piston racleur, nettoyeur, gabarit,..)

I.6.4. Sécurité industrielle du transport par pipeline :

Le transport par pipeline mobilise des fluides et des énergies qui représentent, comme toute activité industrielle, un danger. Le risque industriel lié à ce danger est estimé et traité, dans le cadre des réglementations locales et internationales en vigueur, pour être ramené à un niveau résiduel acceptable par la société, représentée par les organismes de contrôle et diverses associations.

Au delà des opérations classiques d'entretien faisant partie de l'exploitation de l'ouvrage, un diagnostic poussé des ouvrages de transport est réalisé périodiquement, en fonction des réglementations nationales et des pratiques locales. En particulier, l'intégrité physique des canalisations est contrôlée par des mesures électriques de surface et par des auscultations électromagnétiques réalisées à partir de pistons instrumentés.

Quel que soit le niveau de sécurité visé et les moyens mis en œuvre pour l'obtenir, l'accident reste toujours possible. Tous les scénarios d'accident se ramènent à une perte

de confinement du produit transporté et à une interaction néfaste du produit libéré avec l'environnement inerte ou vivant. Des plans d'urgence sont établis, en relation avec les pouvoirs publics.

I.6.5. Transport par oléoducs et gazoducs :

Le transport par canalisation est généralement le moyen le plus économique de transporter du pétrole ou du gaz naturel sur de grandes distances terrestres.

Pour traverser de grandes distances maritimes, bien que des techniques sous-marines existent, le transport maritime par pétrolier ou méthanier est plus économique.

Le transport par canalisation de ces hydrocarbures utilise majoritairement des tubes en acier, soudés bout à bout et revêtus pour mieux résister à la corrosion et aux agressions chimiques et mécaniques.

Le fluide transporté dans les canalisations se déplace généralement sous pression, à des vitesses variant de 1 à 6 m/s. La pression et la vitesse de circulation (ou le débit) sont créés par des pompes (pour les liquides) ou des compresseurs (pour les gaz).

Les oléoducs transportent souvent plusieurs natures de liquides, en séquences appelés trains. A l'interface entre deux trains, un mélange partiel de produits se crée. Le bouchon (zone) de mélange est éliminé à l'arrivée dans la station de réception.

Les systèmes de gazoducs, au contraire, transportent le plus souvent du gaz de composition stable dans le temps.

I.7. PROCEDE DE FABRICATION DES TUBES DE PIPELINES :

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

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

I.7.1. Les tubes soudés sous forme spirale :

La fabrication des tubes soudés en spirale est réalisée en continu sur des machines à souder.

Après déroulement de la bobine en bande par un train d'entraînement, la tôle est poussée dans la cage de formage ou elle subit une déformation de cintrage sous l'action d'un vérin. L'obtention du formage en spirale est réalisée par l'inclinaison d'angle β entre l'axe initial de la bande et l'axe de sortie du tube (figure I.4).

L'enroulement des tubes en spirale permet d'obtenir des tubes calibrés sans avoir besoin de recourir à des étapes de fabrication supplémentaires telles que l'expansion

ou le calibrage. De ce fait, le tube précontraint lors de la phase de pliage, le reste par la suite.

Pour des épaisseurs de paroi au dessus de 20 mm, on utilise habituellement des tôles fortes.

Ce procédé permet une exploitation économique optimale de la largeur de bande disponible, de par le rapport largeur de bande-diamètre allant jusqu'à environ 2,2.

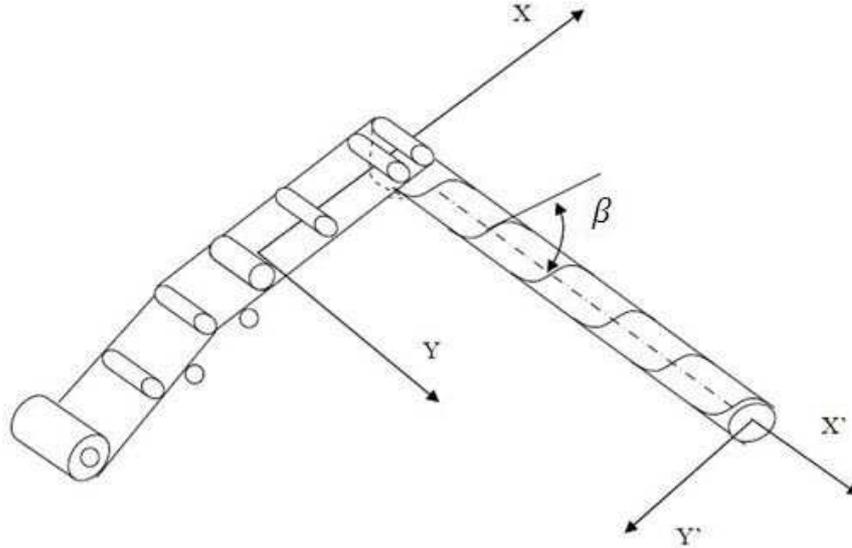


Figure I.4 : *Technique de fabrication des tubes soudés en spirale [3].*

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

$$\sin \beta = \frac{B}{D_{\text{ext}} \times \pi} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

B : La largeur de bande

D_{ext} : Le diamètre extérieur de tube formé

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

Les limites théoriques d'angle ne peuvent, en pratique, pas être exploitées. Si l'angle est trop aigu, il s'en suit une instabilité du processus de cintrage. Les valeurs limitent pour la fabrication sont comprises entre 15° et 50°.

La gamme des diamètres, dans laquelle les tubes spirale sont fabriqués, s'étale de 400 à 3000mm environ, avec des épaisseurs allant jusqu'à 30 mm.

Donc La fabrication des tubes spirale peut être subdivisée en opérations principales suivantes :

- La préparation de la bande
- La bande de rabouillage
- Le cintrage

- Le soudage
- La parachèvement
- La réception et inspection

I.7.2. 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 procédé comporte trois étapes principales: formage, soudage et expansion et calibrage. De plus, la première étape est divisée en trois sous étapes: croquage, formage en U et formage en O (Figure I.5).

Le formage des gros tubes soudés longitudinalement s'effectue à partir de tôles dont la largeur est voisine du périmètre du tube fabriqué et l'épaisseur égale à celle du tube. La mise en forme de la tôle est réalisée de façon unitaire par croquage des rives (C-forming) et formage à la presse .

Plus précisément, la tôle est cisailée en largeur et chanfreinée. Les rives sont croquées au rayon du tube, soit à la presse, soit par des galets. La tôle est ensuite formée en "U" et "O" par des presses extrêmement puissantes (2000 à 20000 tonnes).

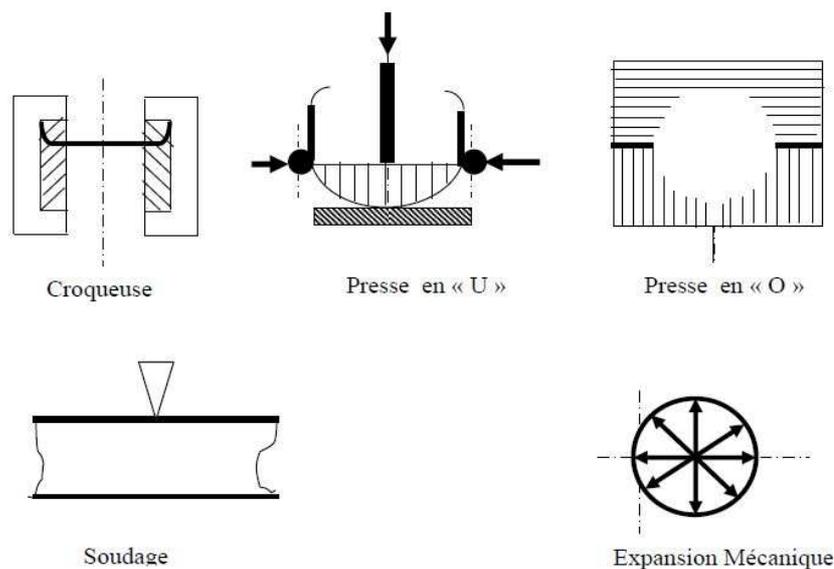


Figure I.5 : Les étapes de fabrication de tubes soudés longitudinalement [3].

La fabrication des tubes soudés longitudinalement comporte trois étapes :

I.7.2.1. Formage : Après croquage des rives de la tôle, celle-ci est pliée en deux étapes en utilisant deux presses de forme différente. La première confère au tube une forme en 'U', tandis que seconde lui donne une forme circulaire (figure I.6 et I.7).

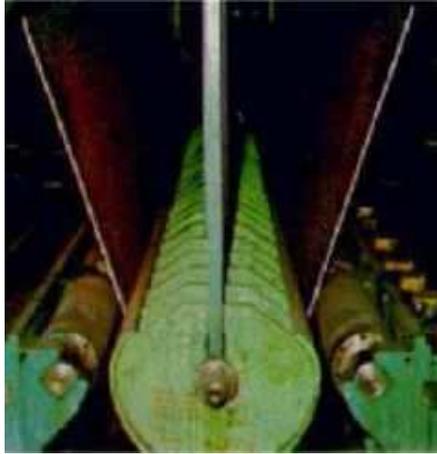


Figure I.6 : *Formage en U*



Figure I.7 : *Formage en O*

I.7.2.2. Soudage : Le soudage est effectué intérieurement et extérieurement à l'aide de têtes soudeuses automatiques en utilisant la technique de soudage à l'arc sous flux. Le cordon intérieur est en général réalisé le premier (figure I.8).



Figure I.8 : *soudage de la fabrication des tubes soudés en long*

I.7.2.3. Expansion et calibrage : Dans le but d'obtenir des tubes de section parfaitement circulaire, ceux-ci sont soumis à une expansion mécanique qui leur fait

subir une augmentation de diamètre de 1 à 1.5 % (figure I.9). Cette opération a pour conséquence de relaxer les contraintes résiduelles.

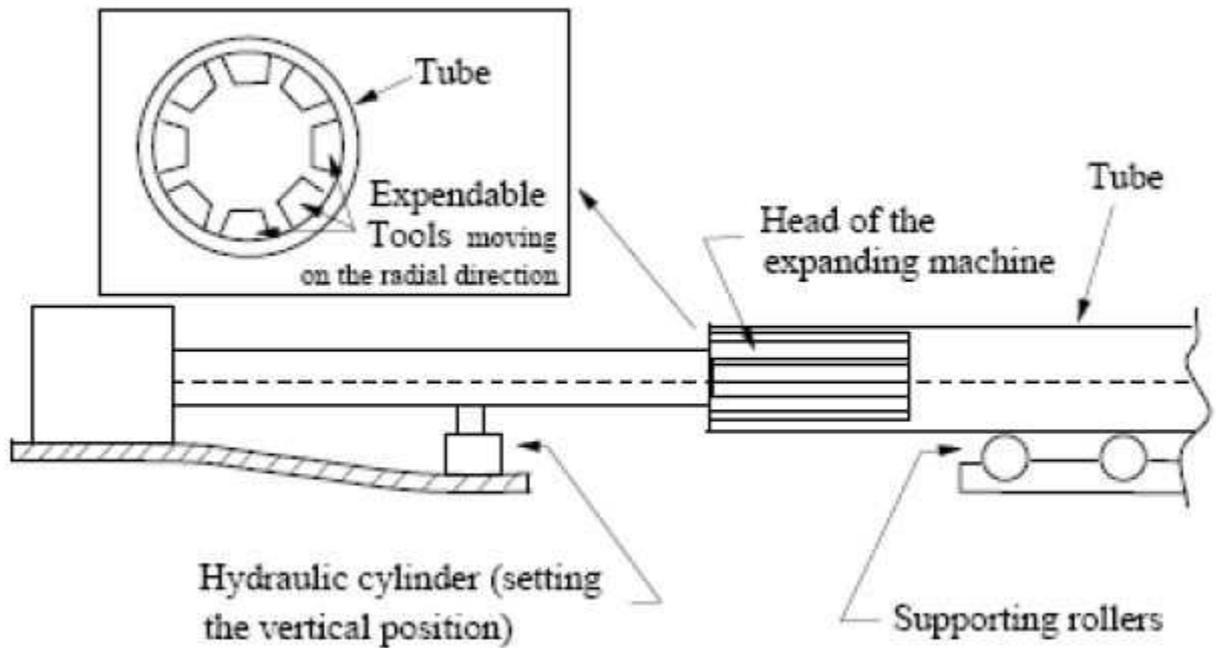


Figure I.9 : Machine d'expansion.

I.7.3. Les tubes sans soudure :

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

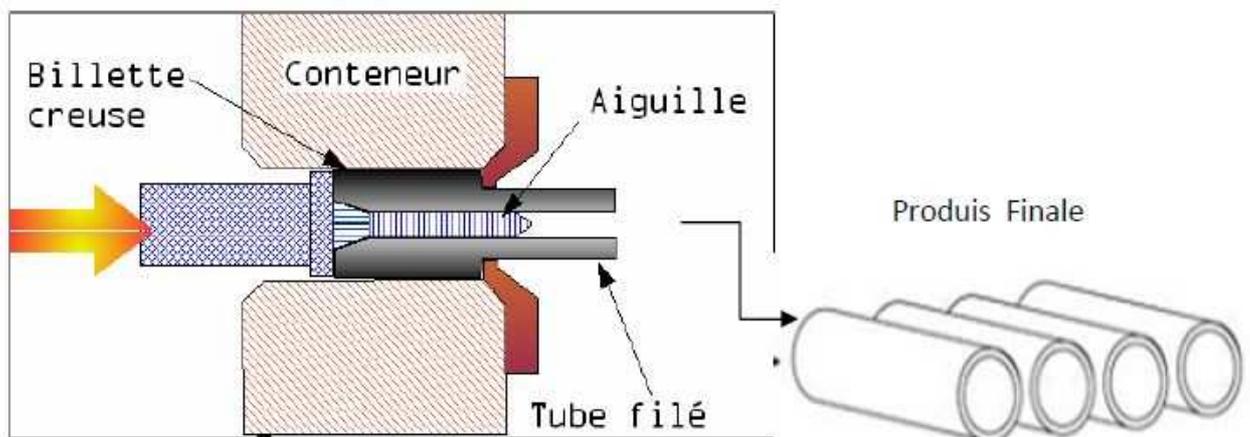


Figure I.10 : Fabrication de pipe sans soudure « Schéma du filage sur aiguille permettant d'obtenir un tube sans soudure »

I.8. CAUSES DES DÉFAILLANCES DES TUBES :

Les causes des défaillances des tubes sous pression sont de diverses natures. Elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite « fissure ». La plupart de ces défaillances sont causées par des piqûres de corrosion ou par des fissurations de corrosion sous contrainte, mais il existe également des problèmes liés aux défauts de soudage. Les mouvements de terrain (glissements du sol, tremblement de terre,...) peuvent aussi être la cause de dommage sur tubes enterrés. Les exploitants des tubes étudient ces problèmes depuis longtemps et possèdent une bonne connaissance des méthodes permettant de les gérer (Figure I.11).

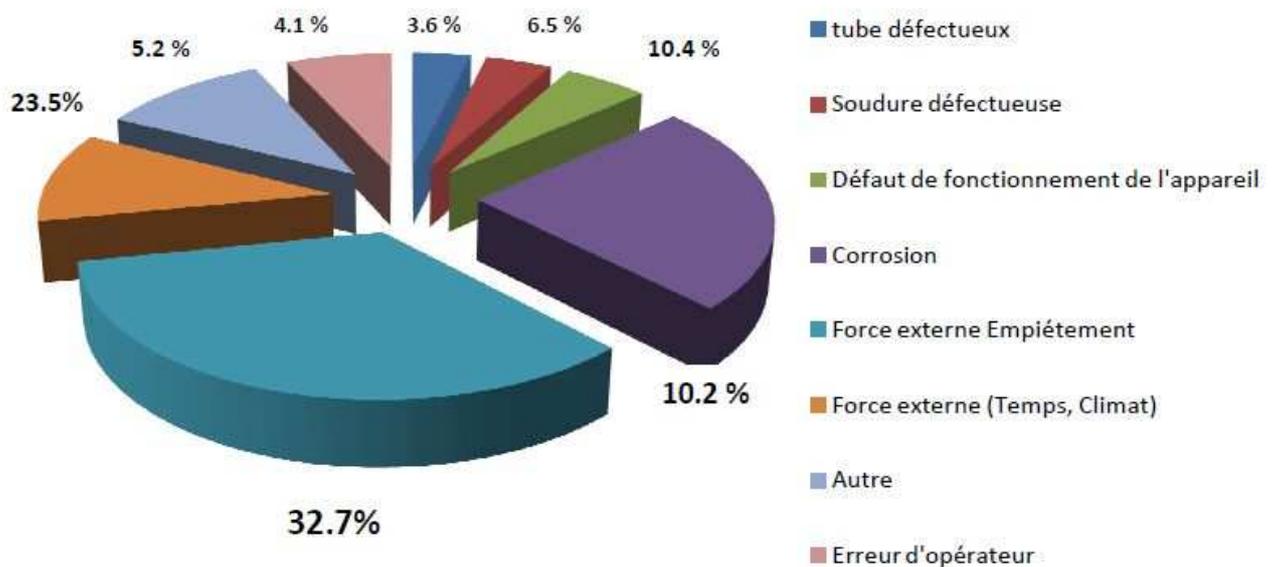


Figure I.11 : Causes des ruptures de pipelines en cours d'exploitation enregistrées par les membres de L'ACPRÈ de 1985 à 1995 (Association Canadienne des Pipelines de Ressources Énergétiques).

I.9. PROTECTION DES PIPELINES :

La longévité et la sécurité des ouvrages en acier sont des éléments importants pour le transport et la distribution de gaz. Les canalisations en acier enterrées peuvent être exposées aux attaques liées à la corrosion par le sol qui endommagent les réseaux. Ainsi, les industries cherchent à protéger efficacement ces canalisations en combinant deux méthodes de protection complémentaires:

- Une protection passive externe par revêtements.
- Une protection active électrochimique (protection cathodique).

I.9.1. Revêtement des tubes :

On utilise généralement la technique classique des trois couches et du Fusion-Bonded Epoxy (FBE) pour l'isolation extérieure. Nous utilisons aussi bien de la

polyoléfine que du polyéthylène (PE) et du polypropylène (PP). L'objectif principal est de protéger le tube par le processus de Revêtement de la corrosion interne et externe.

I.9.1.1. Revêtements extérieurs :

I.9.1.1.1. Revêtement Fusion Bonded Epoxy :

Les revêtements FBE constituent des couches de résine durcissant thermoplastiques, qui sont apposées par un procédé thermostatique sur les tubes d'acier et les protègent de la corrosion.

Le FBE peut être utilisé à des températures d'exploitation allant jusqu'à 110 degrés C, l'épaisseur typique est comprise entre 350 et 450 micromètres. Une deuxième couche entraîne une excellente résistance aux détériorations du pipeline, même dans les conditions environnementales les plus difficiles.

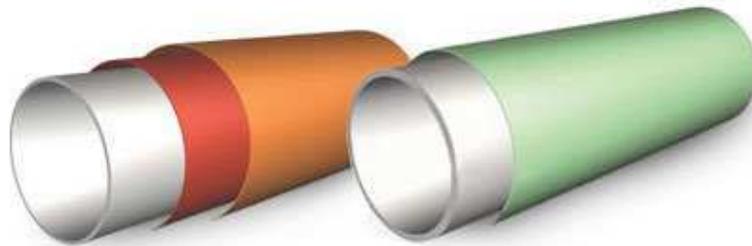


Figure I.12 : *Revêtement FBE*

I.9.1.1.2. Revêtement extérieur polyoléfine 3 couches :

Le revêtement polyoléfine 3 couches est une combinaison de résine thermoplastique durcissant, de couche d'adhérence copolymère et de thermoplastique apposée sur les tubes d'acier afin de garantir leur protection contre la corrosion et les détériorations mécaniques.



Figure I.13 : *Revêtement extérieur*

I.9.1.2. Revêtements intérieurs :

I.9.1.2.1. Revêtements pour l'amélioration du débit :

Une résine époxy liquide est pulvérisée sur la paroi interne des tubes dans une épaisseur typique de 60 à 100 micromètres. Il en résulte une amélioration de la capacité de transport du gaz, une minimisation des résistances de friction et donc une

réduction des stations de compresseurs. La simplification du nettoyage et la protection temporaire contre la corrosion font du revêtement Flow Coating une solution unique et économique pour le transport du gaz.

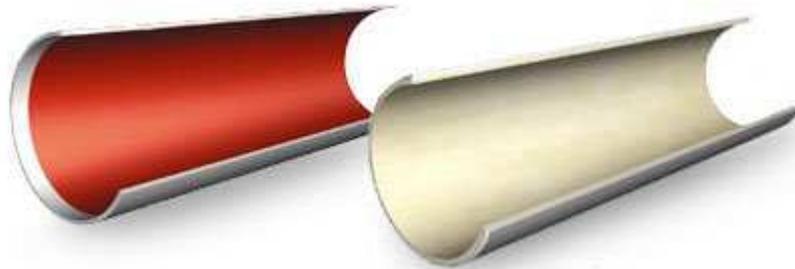


Figure I.14 : *Revêtements en résine époxy liquide pour les pipelines d'eau*

Une résine époxy liquide est pulvérisée sur la paroi interne des tubes dans une épaisseur de 400 à 500 micromètres. Pour ce faire, nous utilisons une nouvelle génération de résines époxy sans solvants.

Un objectif permanent de l'exploitation des pipelines est d'assurer des transports massifs d'hydrocarbures dans le respect de l'Environnement et de la Sécurité. Cet objectif est atteint par la mise en œuvre de plan de surveillance et de maintenance qui est destiné à maintenir l'intégrité des lignes et éviter toute perte de confinement. La présentation expose les risques auxquels sont soumis les pipelines et les mesures qui sont mises en œuvre pour y répondre.

I.9.2. La Protection Cathodique :

Il arrive parfois que le revêtement externe protecteur soit endommagé lors de la pose des canalisations. C'est pourquoi, les industries utilisent un système de protection cathodique pour protéger les parties exposées aux phénomènes de corrosion, et accroître la durée de vie de ses ouvrages.

La protection cathodique consiste à abaisser le potentiel de la surface métallique exposée au moyen d'un générateur de courant continu externe, qui, en cas de défaut de revêtement mettant à nu l'acier et au contact de l'électrolyte du sol, diminue l'intensité des réactions anodiques et accroît celle des réactions cathodiques.

De ce fait, grâce à une électrode auxiliaire, le générateur amène le potentiel électrochimique du métal en zone d'immunité électrochimique et pallie les déficiences locales du revêtement. Cette baisse de potentiel est obtenue par passage de courant d'une électrode auxiliaire : l'anode, vers la structure à protéger : la cathode (Figure I.15).

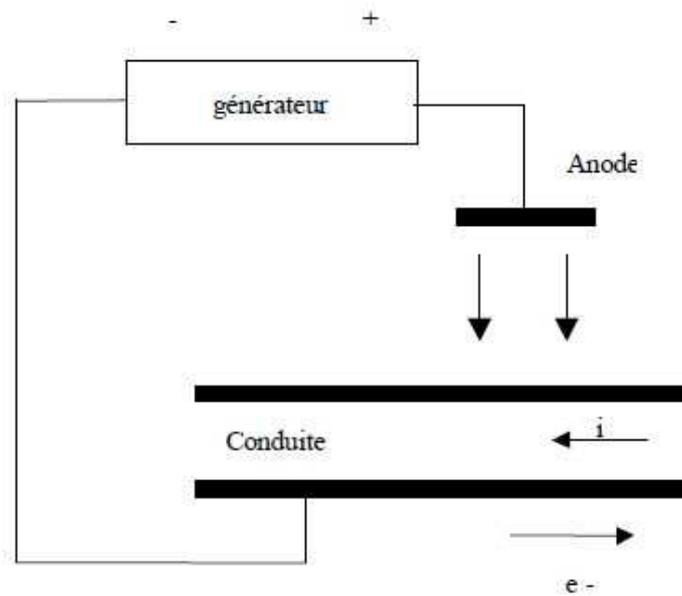


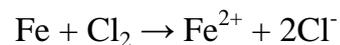
Figure I.15 : Schéma simplifié de protection cathodique par générateur de courant [4]

Dans le cas de la corrosion interne des pipelines transportant par exemple des fluides, l'anode et la cathode sont des sites à la surface du métal qui présentent un potentiel électrochimique différent.

La connexion électrique est assurée par le métal, et le fluide qui se trouve à l'intérieur du pipeline sert d'électrolyte.

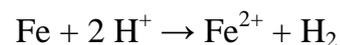
La corrosion est un problème important car à l'origine d'un nombre importants d'accidents par rupture des canalisations. La corrosion est un phénomène qui dépend du matériau utilisé, de la conception de la pièce (forme, traitement, assemblage) et de l'environnement.

Le processus de corrosion peut également être ralenti en agissant sur la réaction chimique en elle même. La formule de corrosion est donnée par :



Cette formule, correspond par exemple à la réaction de corrosion des canalisations métalliques d'eau potable par le dichlore gazeux servant initialement à détruire les microorganismes.

L'atmosphère contient des acides HNO_3 , H_2SO_4 , etc., résidus de combustion. Ces acides attaquent les métaux selon:



Ces phénomènes sont à la base de la corrosion atmosphérique qui n'a d'ailleurs pas lieu en absence d'humidité dans l'air.

Les différents travaux réalisés à ce jour sur la rupture des canalisations à partir de défauts de corrosion sont basés sur des données expérimentales et la théorie de l'analyse limite est l'outil utilisé pour le traitement de ce genre de problèmes.

I.10. INSPECTION ET MAINTENANCE DES PIPELINES EN SERVICE :

Les règlements de pipeline exigent d'un opérateur de maintenir et inspecter leur pipeline de l'intérieur.

La maintenance d'un pipeline est une partie essentielle de maintenir l'intégrité globale du système entier de pipeline. Par conséquent, des pipelines sont par habitude inspectés et surveillés en utilisant beaucoup de techniques directes et indirectes.

Les méthodes visent à assurer cela :

- a) Les pipelines ne deviennent pas défectueux ou endommagés.
- b) L'endommagement ou les défauts sont détectés avant qu'ils posent des problèmes sérieux.

Ces outils sont appelés racleurs ou pistons. Lorsqu'ils comportent des éléments de mesure et d'enregistrement, ils sont qualifiés d'instrumentés ou d'intelligents.



Figure I.16 : *Outil d'inspection de pipeline*

Outre les racleurs dits instrumentés, il existe des racleurs sans aucun équipement de mesure qui servent, soit à nettoyer les canalisations, soit à isoler les uns des autres différents produits incompatibles. Les racleurs d'isolement, sont généralement équipés de coupelles particulières assurant à la fois leur propulsion et leur étanchéité. Les racleurs de nettoyage sont équipés de brosses, il en existe une grande variété pouvant traiter des problèmes spécifiques : élimination de paraffines, d'oxydes, de sédiments...

Pour ce qui est des racleurs instrumentés on distinguera plusieurs types répondant à des finalités d'inspection différentes : on trouve ainsi, principalement, des racleurs de contrôle de la géométrie des tubes, des racleurs de détection des pertes de métal, des racleurs de contrôle d'étanchéité et des racleurs spécialisés dans la recherche de fissures longitudinales.

Chapitre II :
PROPRIETES METALLURGIQUES

II.1. INTRODUCTION :

Les aciers sont des alliages à base de fer qui titrent moins de 2% de carbone, contrairement aux fontes qui en contiennent plus de 2%. Les atomes de carbone, en se plaçant dans les sites interstitiels de la maille de Fer, permettent d'en augmenter les caractéristiques mécaniques. D'autres éléments d'alliages peuvent être ajoutés en vue d'améliorer les caractéristiques chimiques, physiques, mécaniques des aciers comme le manganèse, phosphore, soufre, silicium, niobium...

II.2. FACTEURS DETERMINANT LA FIABILITE DES ACIERS DES TUBES :

Les aciers des tubes sont soumis à des actions extérieures et intérieures. Les actions extérieures engendrent des contraintes et des déformations qui entraînent la modification des états physiques et mécaniques du matériau des tubes. Les actions internes donnent naissance à des contraintes internes, liées essentiellement à la distribution inégale des déformations dans le volume du matériau. Ces contraintes peuvent être thermiques, de phases ou structurelles. Ainsi la résistance des aciers des tubes aux actions extérieures et intérieures définit leur tenue à la déformation, à la rupture et la plasticité. Durant l'exploitation des pipelines, on a observé des ruptures ductiles et fragiles des aciers des tubes. Ces dernières se propagent à une vitesse proche de la vitesse du son. Elles sont brusques et peuvent causer beaucoup de dégâts. Par conséquent, pour assurer la fiabilité des conduites, l'acier des tubes doit posséder en plus d'une limite d'élasticité élevée, une bonne résistance à la rupture fragile. La fiabilité des aciers des tubes est donc déterminée par les divers défauts qui servent d'amorce aux fissures [5]. L'action des entailles, des défauts internes (inclusions non métalliques, fissures et autres) rend irrégulière la distribution des contraintes en conditionnant leur concentration. Plus l'entaille est vive, plus son action sur les propriétés mécaniques du métal est forte. Cette action rend la résistance à la rupture fragile plus faible. Par conséquent, l'action d'une entaille doit être rapportée aux facteurs qui contribuent à la fragilisation de l'acier des tubes. D'autre part la baisse de la température rend le métal des tubes susceptible de rupture fragile (fragilité à froid).

La courbe résilience en fonction de la température des aciers des tubes présente une transition graduelle de l'état ductile à l'état fragile, c'est-à-dire il existe un intervalle critique de température de fragilité (figure II.1). Cet intervalle de température délimite la transition des cassures ductiles fibreuses aux cassures cristallines fragiles aux basses plasticités et ductilité. Plus la température de transition est élevée, plus l'aptitude de l'acier à la rupture fragile est forte.

Ainsi la température de service des conduites influe sur la fiabilité des aciers des tubes. Cette température doit être plus élevée que la température de transition, le mieux aux températures auxquelles la rupture est complètement ductile. D'autre part, plus la réserve thermique de ductilité (par rapport à la température ordinaire 20 °C) est élevée plus la sensibilité du métal des tubes aux variations de température, à l'augmentation de la vitesse de déformation, aux concentrateurs de contrainte est

faible. Enfin les aciers des tubes sont également l'objet d'une destruction graduelle sous l'action d'autres phénomènes et processus, dont la corrosion et la fatigue. La résistance à ces formes de destruction détermine la longévité des tubes dans les conditions appropriées de leur service. La limite de fatigue dépend en majeure partie des concentrations de contraintes et de l'effet de corrosion.

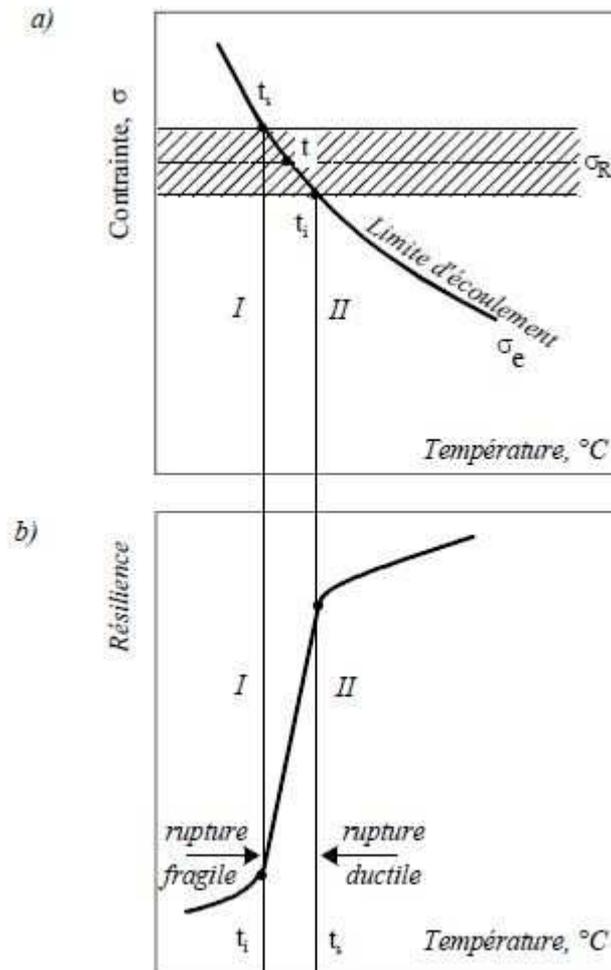


Figure II.1 : Schéma de la rupture fragile et de la rupture ductile d'un acier en fonction de la température d'essai [5].

a) Sollicitation statique

b) Sollicitation dynamique

I- Rupture fragile

II- Rupture ductile

t_b , t_s - les frontières supérieure et inférieure de l'intervalle critique de température de fragilité

II.3. FACTEURS METALLURGIQUES DETERMINANT LES PROPRIETES DES TUBES :

Depuis plus de 25 ans, les industries de la métallurgie et de la sidérurgie développent de nouveaux types d'aciers, appelés Aciers à Haute limite d'Elasticité

(acier HLE), afin de diminuer le prix de revient des pipelines. Ces métaux, qui possèdent de bonnes propriétés mécaniques (Tableau II.3 ou II.4), permettent de diminuer l'épaisseur des pipelines, donc de minimiser la quantité de matériau nécessaire à leur élaboration. Le coût de fabrication d'un pipeline étant essentiellement déterminé par cette quantité, l'usage d'aciers HLE permet de réaliser de fortes économies.

Les quatre tableaux suivant reflètent la composition chimique et les caractéristiques mécaniques de l'acier type API 5L, tubes de conduite PSL1 et PSL2 :

API 5L - PSL1	Carbone C (max)	Manganèse Mn (max)	Phosphore P (max)	Soufre S (max)	Titane Ti (max)
X42	0,26	1,30	0,030	0,030	0,04
X52	0,26	1,40	0,030	0,030	0,04
X60	0,26	1,40	0,030	0,030	0,04
X65	0,26	1,45	0,030	0,030	0,06
X70	0,26	1,65	0,030	0,030	0,06

Tableau II.1 : Composition chimique % (Tubes de conduite PSL1 soudés) [6].

API 5L - PSL2	Carbone C (max)	Manganèse Mn (max)	Phosphore P (max)	Soufre S (max)	Titane Ti (max)
X42	0,22	1,30	0,025	0,015	0,04
X52	0,22	1,40	0,025	0,015	0,04
X60	0,22	1,40	0,025	0,015	0,04
X65	0,22	1,45	0,025	0,015	0,06
X70	0,22	1,65	0,025	0,015	0,06
X80	0,22	1,85	0,025	0,015	0,06

Tableau II.2 : Composition chimique % (Tubes de conduite PSL2 soudés) [6].

API 5L – PSL1	Resistance à la rupture [N/mm²] (minimum)	Limite élastique [N/mm²] (minimum)
X42	414	290
X52	455	359
X60	517	414
X65	531	448
X70	565	483

Tableau II.3 : *Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL1)* [6].

API 5L - PSL2	Resistance à la rupture [N/mm²] (min-max)	Limite élastique [N/mm²] (min-max)
X42	414-758	290-496
X52	455-758	359-531
X60	517-758	414-565
X65	531-758	448-600
X70	565-758	483-621
X80	621-827	552-690

Tableau II.4 : *Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL2)* [6].

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 II.2). 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.

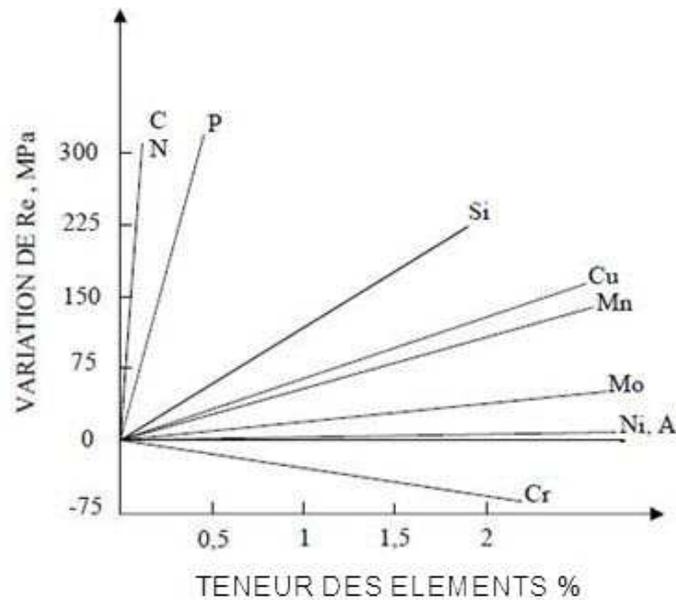


Figure II.2a : Durcissement par solution solide [5].

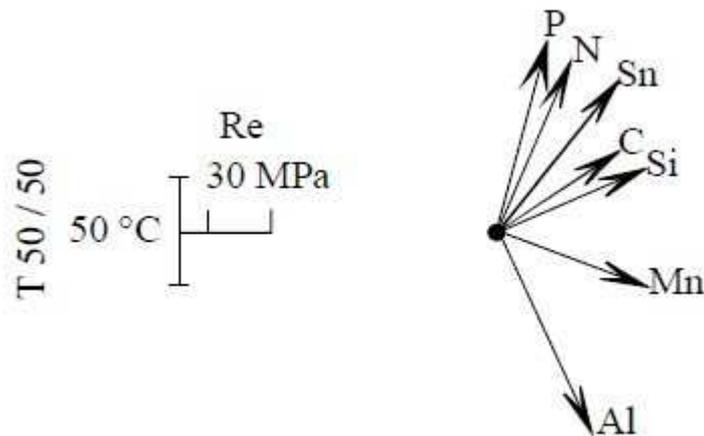


Figure II.2b : Influence des éléments sur R_e et $T_{50/50}$ [5].

L'une des méthodes d'obtention d'une combinaison de haute résistance, de bonne ductilité et soudabilité des aciers est l'affinement du grain ferritique. L'augmentation des caractéristiques de traction et en particulier la limite d'élasticité R_e par l'affinement du grain ferritique était souvent démontrée (figure II.3).

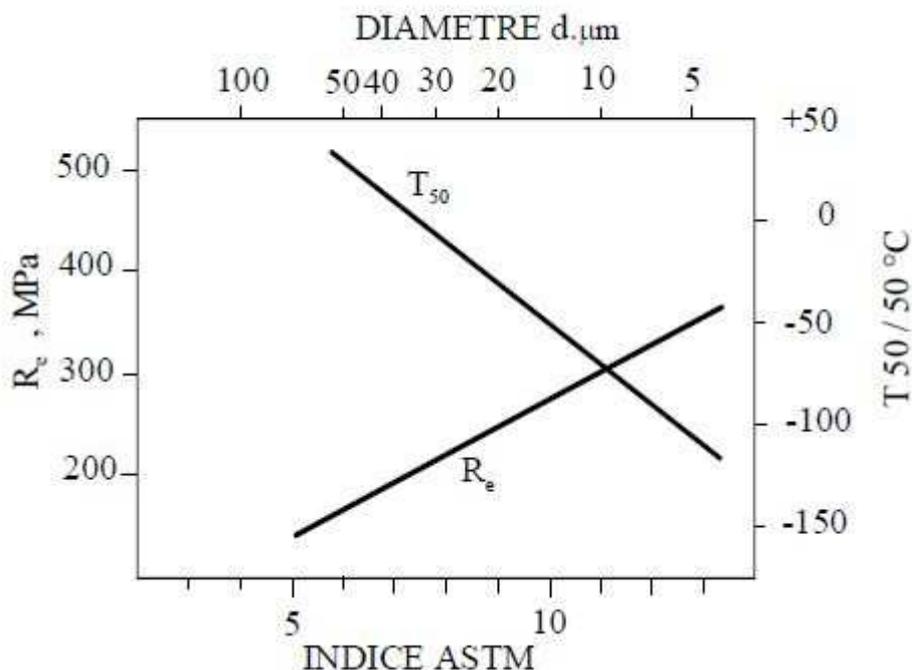


Figure II.3 : Influence de la taille du grain α sur R_e et $T_{50/50}$

(Acier : 0,1 % C – 0,5 % Mn – 0,2 % Si – 0,006 % N) [5].

L'intérêt du grain fin dans les aciers des tubes à structure ferrite-perlite est donc double, d'où l'intérêt porté à l'addition d'éléments permettant l'affinage du grain ferritique, donc du grain austénitique de départ. L'affinage du grain est réalisé par l'addition d'éléments formant de fins précipités, lesquels par leur interaction avec des joints de grains austénitiques, empêchent le développement de ces derniers. Les facteurs qui interviennent dans le processus d'affinage du grain sont: les éléments d'alliages susceptibles de former des précipités fins. Les plus utilisés sont Al, Nb, Ti formant des nitrures ou des carbonitrures, agissant suivant leurs teneurs ainsi que les teneurs en N et C et le traitement thermique réalisé.

On note, que l'ensemble de ces facteurs en tenant compte des phénomènes de mise en solution, de précipitation et de coalescence déterminera pour un acier le degré d'affinage du grain. L'aluminium est l'élément le plus utilisé et le plus simple dans la mesure où il ne forme qu'un nitrure AlN . La mise en solution s'effectue dans un domaine de température $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, naturellement fonction de N et Al (figure II.4).

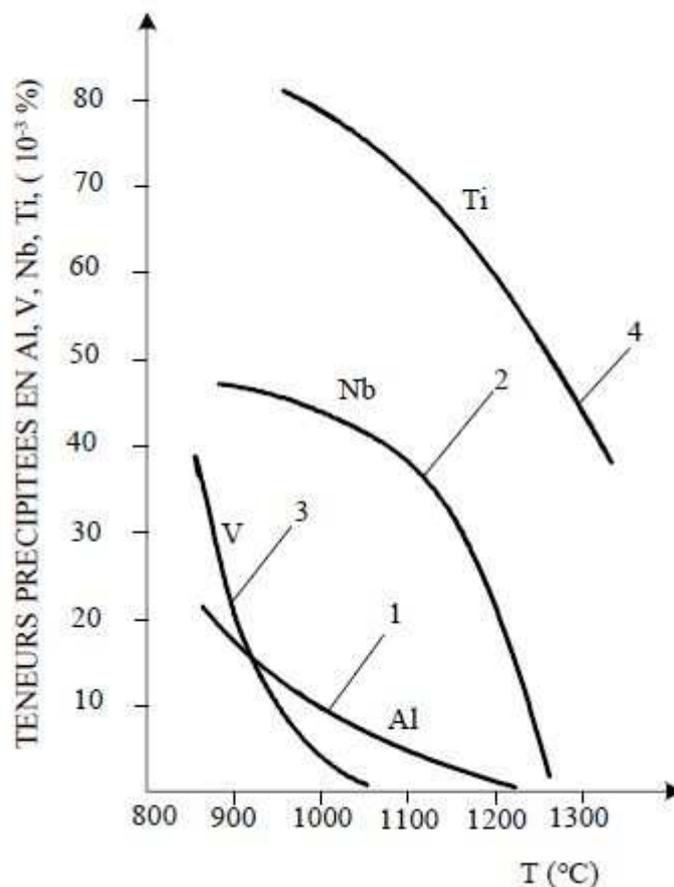


Figure II.4 : Mise en solution des éléments dispersoïdes [5].

La précipitation, sous forme de fins nitrures, se produit soit au cours du laminage, soit au cours du chauffage avant normalisation dans le domaine [600 – 700 $^{\circ}\text{C}$]. Du fait des processus de diffusion qui conduisent à la coalescence des précipités de AlN, puis à leur mise en solution (figure II.5), le grain austénitique ne variera plus alors qu'en fonction des paramètres température et temps.

Dans le cas du niobium, les précipités formés sont des carbonitrures Nb (C_x, N_y) dont les teneurs en C et N dépendent de la composition et de la température. La précipitation au refroidissement coïncide avec la transformation γ - α , tandis que la précipitation au cours du chauffage s'effectue dans le domaine [600 – 700 $^{\circ}\text{C}$]. Le niobium peut exercer comme l'aluminium un effet marquant sur l'affinage du grain, et la taille critique des particules est d'environ 300 Å comme pour AlN. Enfin, on constate que l'addition simultanée de Al et Nb est légèrement plus efficace que celle de Al seul.

Le titane forme deux composés. D'une part, TiN qui est un précipité extrêmement stable, pratiquement insoluble dans l'austénite, et d'autre part un carbure TiC .

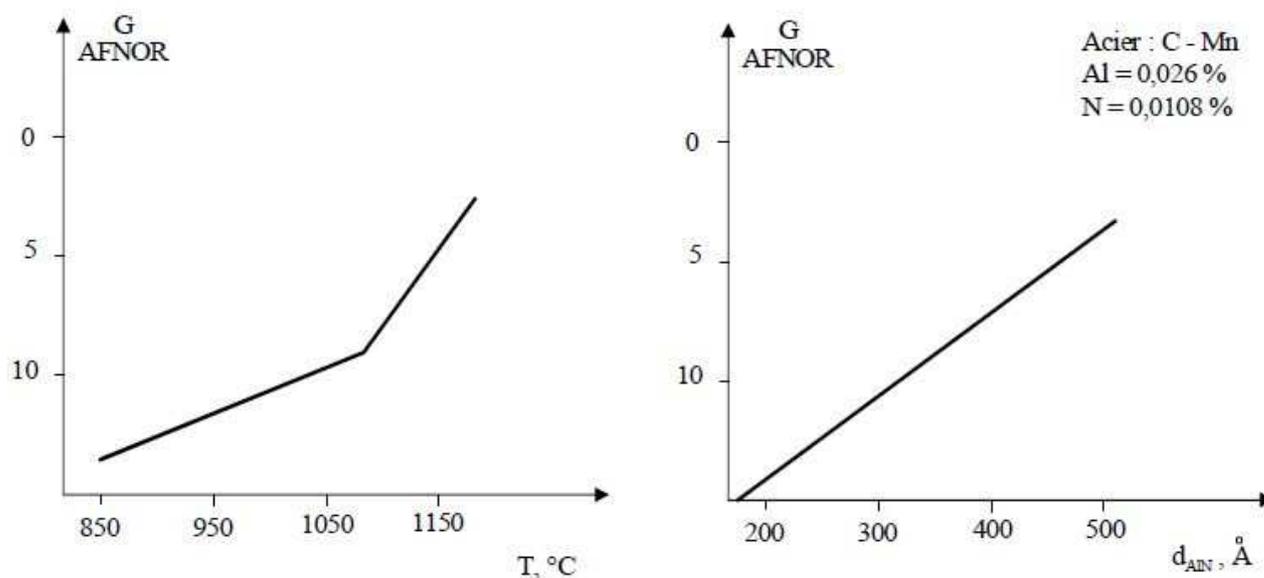


Figure II.5 : Evolution du grain avec la température et la taille des précipités de AlN [5].

Le titane non piégé par l'azote forme un carbo-nitride riche en carbone de diamètre environ 200 Å, qui se dissout dans l'austénite jusqu'à 1300 °C environ (figure II.4). Ce "carbure" est responsable du contrôle de la croissance du grain γ .

L'addition d'un (ou plusieurs) élément (s) tel que Al, Nb, Ti afin d'affiner le grain et d'améliorer les caractéristiques des aciers des tubes est donc indispensable. Le choix de ces éléments et de leur teneur est fonction des facteurs tel que: teneur en azote (élaboration au convertisseur ou au four électrique), du type de traitement thermique et des caractéristiques recherchées.

Certains éléments formant les carbonitrides fins présentent, outre l'effet sur le grain, un rôle important de durcissement par précipitation dans la ferrite. Les plus utilisés dans la composition chimique des aciers des tubes sont Nb, Ti, V.

L'efficacité durcissante de ces précipités dépend des teneurs en éléments et du traitement thermique. Pour le Niobium, dans le cas d'une normalisation à température voisine de 900 °C, l'accroissement des caractéristiques de traction est faible et l'augmentation de la température de transition également. Si le traitement est effectué à haute température après dissolution de Nb (C, N), soit d'environ 1250 °C, les variations deviennent importantes ~ 100 MPa et 60 °C. Après une opération de trempe et revenu, l'effet du Nb après austénitisation à haute température est encore accentué.

Le vanadium est très employé en tant qu'élément durcissant par précipitation au cours d'un traitement classique. Les carbonitrides de V sont mis totalement en solution à des températures nettement plus basses (figure II.4). Le durcissement se faisant par l'intermédiaire de V (C, N), la présence d'autres éléments métalliques formant nitrides

ou carbures peut interférer. La teneur en azote libre est déterminante, surtout à l'état normalisé pour lequel le durcissement est dû à des nitrures de vanadium (figure II.6). A l'état trempé revenu, le durcissement par le carbo-nitride est important. L'accroissement des caractéristiques de traction peut atteindre 80 MPa pour V = 0,08 % à l'état normalisé. Ceci se traduit par une légère augmentation de la température de transition de résilience. Le Nb et le Ti jouent un rôle particulier pendant (et après) une déformation à chaud, essentiellement le laminage.

En effet, ces deux éléments ont pour propriétés de retarder la cristallisation de l'austénite lorsqu'ils sont ajoutés en faible quantité (~0,030 %).

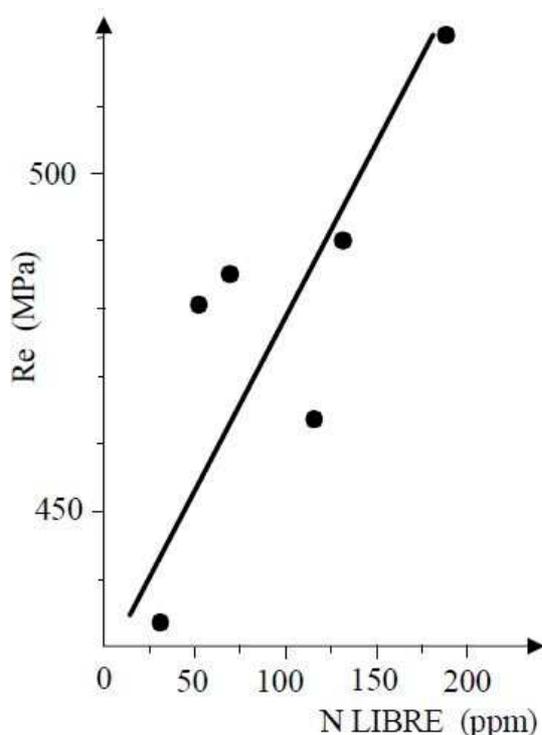


Figure II.6 : Evolution de Re avec la teneur en N libre à l'austénitisation.

Etat normalisé Acier C – Mn – V [5].

II.4. INFLUENCE DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LES PROPRIETES DES ACIERS DES TUBES :

Les principaux modes de traitements thermiques qui modifient de diverses manières les propriétés des aciers sont : le recuit, la normalisation, la trempe, le revenu et le vieillissement.

La normalisation provoque la recristallisation de l'acier et affine donc la structure à gros grains obtenue par coulée ou laminage. La normalisation des aciers des tubes après le laminage à chaud renforce leur résistance à la rupture fragile, ce qui est caractérisé par la baisse du seuil de rupture à froid et l'augmentation de la quantité de travail absorbé par la progression d'une fissure. La normalisation suivie de recuit

d'adoucissement (600 à 650 °C) est appliquée souvent au lieu du recuit complet pour corriger la structure des aciers.

Sous l'effet de la trempe, les aciers des tubes ont l'aptitude d'accroître leur dureté. La trempe n'est pas un traitement thermique définitif. Pour diminuer la fragilité, les contraintes qu'elle produit et pour obtenir des propriétés mécaniques imposées, l'acier trempé subit le revenu. Pendant la trempe, le refroidissement peut produire des défauts tels que tapures, déformations, gauchissement et contraintes de traction résiduelles élevées dans les couches superficielles. Les méthodes modernes de refroidissement prévoient l'emploi des mélanges d'eau et d'air amené sous pression par des tuyères. En modifiant la projection d'eau dans le mélange, ainsi que sa pression, on peut obtenir des vitesses de refroidissement variées, depuis celle qui correspond à l'air jusqu'à des valeurs dépassant sensiblement la vitesse de refroidissement dans l'eau.

Le revenu supprime les contraintes internes dues à la trempe. Cette suppression des contraintes est d'autant plus élevée que la température de revenu est plus élevée.

L'affaiblissement des contraintes internes est le plus intense lorsque le maintien atteint 15 à 30 mn à 550 °C. Après un maintien de 1 h 30 mn, les contraintes décroissent jusqu'à une valeur minimale susceptible d'être obtenue par le revenu à la température considérée. Après un revenu à 500 ou 650 °C, les aciers susceptibles de fragilité de revenu réversible sont refroidis rapidement. Le revenu à haute température (500 à 680 °C) donne aux aciers des tubes la structure de sorbite de revenu. Il crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier. La trempe suivie de revenu à haute température améliore, par rapport à l'état normalisé ou recuit, les limites de rupture et d'élasticité, la striction et surtout la résilience. Les propriétés mécaniques des tôles et des tubes dépendent des paramètres du régime de laminage et celui du traitement thermique. L'expérience confirme qu'il est possible de combiner les opérations de déformation plastique à chaud et de traitement thermique.

L'influence la plus favorable sur les caractéristiques de plasticité et sur l'abaissement de la tendance de l'acier à la rupture fragile s'avère le traitement thermique à haute température. Ce traitement prévoit un refroidissement brusque, directement après la fin des déformations à chaud ou après un maintien règlementé lors d'un recuit.

II.5. INFLUENCE DU FORMAGE DES TUBES SUR LEURS PROPRIETES MECANIQUES :

Durant le formage des tubes, les tôles sont soumises à une série de compression et d'extension. Les propriétés mécaniques des tubes sont donc différentes de celles des tôles. La limite d'élasticité dépend directement du traitement par l'effet de Bauschinger [5]. Leur influence simultanément donne le signe positif ou négatif du changement des propriétés. La majorité des aciers des tubes de classe ferrito-perlitique ont une "dent d'écoulement" sur la courbe contrainte-déformation obtenue par l'essai de traction des éprouvettes standards (figure II.7) et par conséquent ces aciers sont très sensibles à

l'effet de Bauschinger. L'avantage d'utiliser des aciers de classe Mn-Mo-Nb est la régularité et la continuité de l'allure de la courbe contrainte-déformation et l'augmentation de la limite d'élasticité, c'est-à-dire la tôle peut avoir une limite d'élasticité inférieure à la limite d'élasticité normative de l'acier. D'autre part, la résilience dépend aussi des cycles de déformation durant le formage des tubes. Les propriétés mécaniques des tôles varient sensiblement en fonction des moyens de production (pour une même composition chimique de l'acier). Les variations ultérieures se produisent durant la fabrication des tubes.

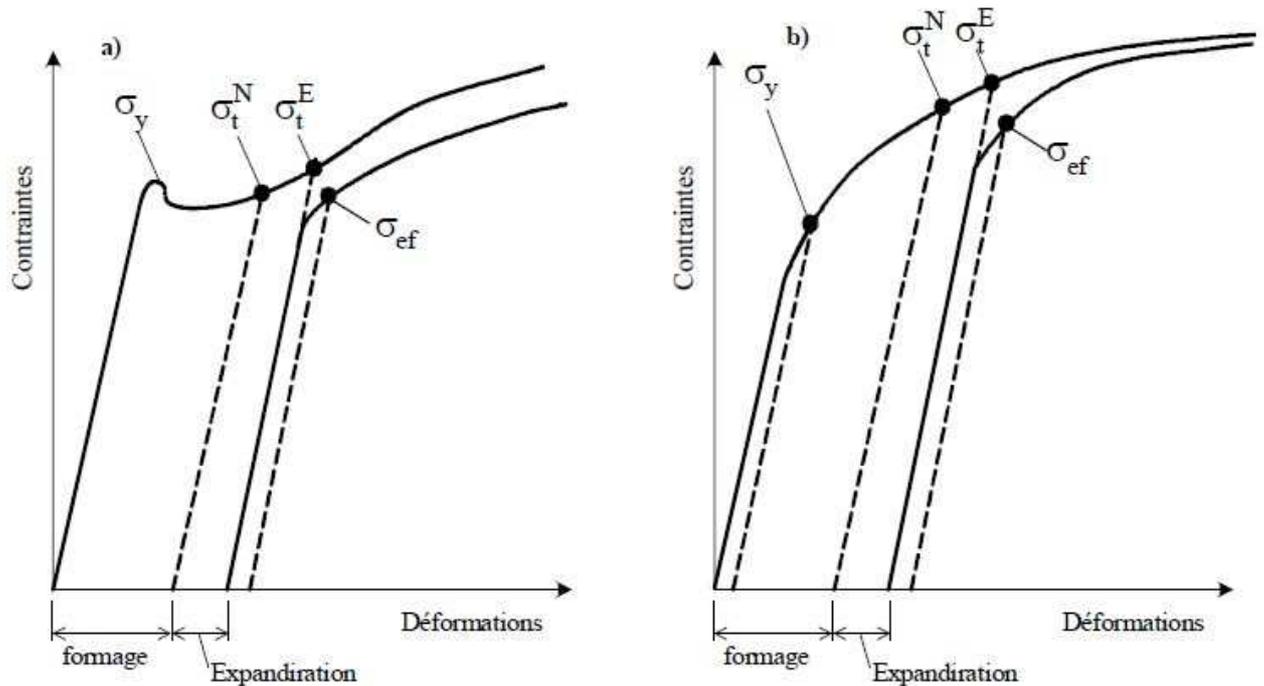


Figure II.7 : Courbe d'élasticité pour diverses classes d'aciers des tubes[5].

a) acier à basse perlite

b) acier avec ferrite aciculaire (Mn-Mo-Nb)

σ_y : limite d'écoulement de la tôle

σ_t^N : limite d'écoulement réelle d'un tube non
expandiré

σ_t^E : limite réelle d'écoulement d'un tube expandiré

σ_{ef} : limite d'écoulement effective d'un tube
expandiré

$\sigma_t^N - \sigma_{ef}$: perte de la valeur de la limite d'écoulement
à cause de l'effet de Bauschinger.

On observe actuellement un accroissement général des exigences sur les caractéristiques métallurgiques et mécaniques des tubes destinés à la construction des

pipelines. Telle que l'augmentation du niveau de résilience pour accroître la garantie de tenue à la rupture fragile, la diminution des températures d'essai de résilience pour une utilisation dans les conditions climatiques sévères et la diminution de la valeur du carbone équivalent pour garantir de meilleures conditions de mise en oeuvre. Sur le plan théorique pour l'élaboration de nouveaux aciers des tubes, on part de la possibilité de gérer les propriétés des aciers par l'affinage maximal de leur structure et superstructure dans le laminage contrôlé suivi d'un refroidissement accéléré et commandé. A cela, s'ajoute l'amélioration de la technologie et le développement des tubes en acier amélioré par traitement thermique. Ainsi l'amélioration des propriétés mécaniques des tubes et de leur indice économique nécessite la résolution d'un ensemble de problème, y compris la réduction des dépenses en éléments d'alliages rares.

II.6. ANALYSE TENDANCIELLE DES AMELIORATIONS DES ACIERS DES PIPELINES :

II.6.1. Evolution des dimensions des tubes et des conduites :

L'amélioration de l'efficacité du transport par canalisation est possible par l'accroissement de la capacité de transport en augmentant les diamètres des conduites, la pression de service, par le refroidissement du gaz transporté, la diminution de la rugosité de la surface interne des tubes et enfin par l'amélioration de la fiabilité de fonctionnement.

De nombreuses études montrent que les facteurs ayant une influence maximale sur la capacité portante des gazoducs sont par ordre décroissant : le diamètre, la pression de service, les distances entre les stations de compression, les taux de compression et la température moyenne du gaz transporté. Alors, ce n'est pas par hasard que ces trente dernières années, on était témoin de la construction des gazoducs magistraux de grands diamètres de plus de 1420 mm et le passage de la pression de service de 7,5 MPa à 100 MPa et même 120 MPa. La dépense spécifique en métal des tubes diminue avec l'accroissement du diamètre à la puissance 0,6 et est proportionnelle à l'augmentation de la limite de rupture des aciers selon le matériau. Si l'on considère qu'actuellement on atteint le diamètre limite des pipelines (1420 mm), alors la tendance principale pour réaliser une économie de métal est l'amélioration des propriétés mécaniques des aciers des tubes. L'augmentation des caractéristiques de résistance de l'acier seule, permet de garder le niveau actuel des épaisseurs des tubes et éviter les problèmes liés au soudage et au montage de la conduite sur le tracé. D'autre part, l'augmentation de la capacité de transport des gazoducs est réalisable par l'augmentation de la fiabilité structurelle des tubes et leurs joints de soudure. Le passage à la construction des gazoducs pour des pressions plus élevées est réalisable par la conception des tubes à construction spéciale : tubes à parois épaisses, à multicouches et à bandage.

II.6.2. Evolution des caractéristiques mécaniques des tubes :

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

Les aciers des tubes peuvent être divisés en deux groupes : aciers au carbone faiblement alliés et aciers à faible teneur en carbone faiblement alliés. Dans le premier groupe on trouve les aciers ferrito-perlitique 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 ferrito-perlitiques faiblement alliés à basse teneur en carbone X56, X50, X65, X70 renfermant 0,12 % C, 0,45 % Si, 0,25 % S, 1,9 % Mn, 0,1 % V, 0,1 Nb, 0,015 % Al.

Pour les conduites de diamètre supérieur à 1020 mm, destinées à fonctionner sous des pressions élevées, on utilise généralement des tubes en acier de laminage contrôlé. Les propriétés mécaniques des structures ferrito-perlitique peuvent être modifiées, entre autres par l'affinement des grains ferritiques. C'est le seul procédé qui permet d'améliorer à la fois les caractéristiques de traction R_e et/ou R et la température de transition T_K . L'objectif est l'obtention d'une structure ferrito-perlitique à grains fin des produits plats laminés.

Ces dernières années le laminage contrôlé a été complété par le refroidissement accéléré par arrosage à l'eau afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des tôles. Cela a permis d'accroître la résistance de l'acier de laminage contrôlé, jusqu'à 700 MPa, sans modifier pratiquement la ténacité à la rupture et la tenue au froid. A des vitesses de refroidissement suffisamment élevées, les éléments perlitiques de la structure sont remplacés par une structure bénitique. Dans les aciers ferritiques, de telles vitesses font augmenter la quantité de bénite à basse teneur en carbone. Les meilleures améliorations des propriétés mécaniques sont réalisables dans les aciers de classe bénitique à teneur en carbone particulièrement basse. De tels aciers ont une grande perspective pour l'emploi dans la fabrication des tubes pour la réalisation des gazoducs de grands diamètres et haute pression de service. Des études récentes montrent l'efficacité de l'emploi de l'acier bénitique de composition chimique : 0,03 % C, 0,15 % Si, 1,90 % Mn, 0,04 Ni, 0,02 % Ti, dans la fabrication des tubes de dimensions 1420 x 18,7mm. De tels tubes ont une ténacité élevée à la rupture ductile, à des températures proches de -30°C , avec une tenue au froid suffisante et des limites de résistance à la rupture $\sigma_R = 644\text{MPa}$ et à l'écoulement $\sigma_{0,2} = 600\text{MPa}$.

II.6.3. Evolution de la composition chimique des aciers des tubes :

Le carbone est un élément d'insertion et fait accroître la teneur en perlite. S'il fait augmenter la résistance des aciers, fait diminuer sa ductilité et dégrade leur soudabilité. Le manganèse agit à la fois par durcissement de solution, augmentation de la quantité de perlite, affinement du grain ferritique, par conséquent, il améliore la ductilité de l'acier dans les limites déterminées. Ses effets positifs sont amplifiés par l'insertion dans l'acier des éléments comme le titane ou le niobium qui dans des concentrations déterminées améliorent la résistance et la ductilité. Comme élément de substitution, le phosphore provoque un durcissement de solution accompagné d'une très forte fragilisation. L'azote est un élément d'insertion, exerçant une influence néfaste sur la température de transition. Cet effet est neutralisé par la présence d'aluminium, qui en se combinant avec l'azote forme un nitrure.

Mais, d'autre part la précipitation sous forme de nitrures fins, qui se produit au cours du laminage, ou bien au cours du chauffage avant normalisation dans le domaine des températures allant de 600°C à 700°C, affine par la suite les grains qui y sont issus.

La réduction de la teneur en soufre dans les aciers de laminage contrôlé de 0,05 à 0,004% fait augmenter la résilience, selon Charpy, pratiquement de deux fois. Le Niobium, le Vanadium et le Titane forment des précipités durcissant mais affinent également le grain. Ces deux effets s'ajoutent pour améliorer les propriétés de résistance de l'acier, mais ils ont des effets antagonistes en ce qui concerne la température de transition T_K .

L'utilisation du Vanadium fait augmenter la résistance des aciers faiblement alliés et améliore leur soudabilité. Par contre, le Niobium est un modificateur d'acier qui améliore le travail de l'acier durant la production et améliore la soudabilité.

Les effets les plus favorables du Niobium apparaissent à de faibles teneurs (0,02 à 0,03%), particulièrement lorsqu'il est combiné à l'Aluminium (au voisinage de 0,02%). Dans ce cas, il fait augmenter les caractéristiques de résistance de l'acier sans dégrader sa ductilité. L'Aluminium à la différence des modificateurs comme le Titane, le Niobium et le Vanadium, ne forment pas de carbides. Les nitrides d'Aluminium contribuent à l'accroissement du grain austénitique et conduit à la formation d'une structure secondaire à grains fins.

La désoxydation par l'Aluminium abaisse la température de transition à l'état fragile, augmente la résistance et améliore la soudabilité des aciers. L'avantage principal de la désoxydation est que dans ce cas le coût de l'acier n'augmente pratiquement pas.

Dans la composition chimique des aciers des tubes, on trouve aussi les métaux rares dont l'influence sur les propriétés des aciers est peu étudiée. Mais, leur influence

positive sur la forme des inclusions non métalliques et sur la soudabilité des aciers est sans doute. Le Nickel affine le grain et améliore la température de transition T_K de la résilience. Le Chrome a une action bénéfique sur la résistance à la corrosion et c'est aussi un élément de substitution qui adoucit la ferrite dans laquelle il entre en solution, mais augmente la quantité de perlite. Le Molybdène a une influence favorable après revenu à basses températures ($\leq 600^\circ\text{C}$). Il améliore la limite d'élasticité et la température de transition. L'un des problèmes les plus importants pour l'intégrité des gazoducs, est la résistance à la fissuration par hydrogène. C'est pourquoi, les efforts doivent être faits vers la réduction de la teneur en soufre dans les aciers des tubes et au contrôle de la morphologie des inclusions résiduelles.

II.7.OBSERVATION METALLOGRAPHIQUE :

II.7.1. Microstructure de X42 :

Pour X42, les grains de ferrite et leurs limites (contours visibles), et la perlite, un mélange lamellaire de ferrite et de fer (figure II.8).

Il composé (c : 0,28max), (Mn : 1,30max), (P : 0,03max), (S : 0,03max) ...

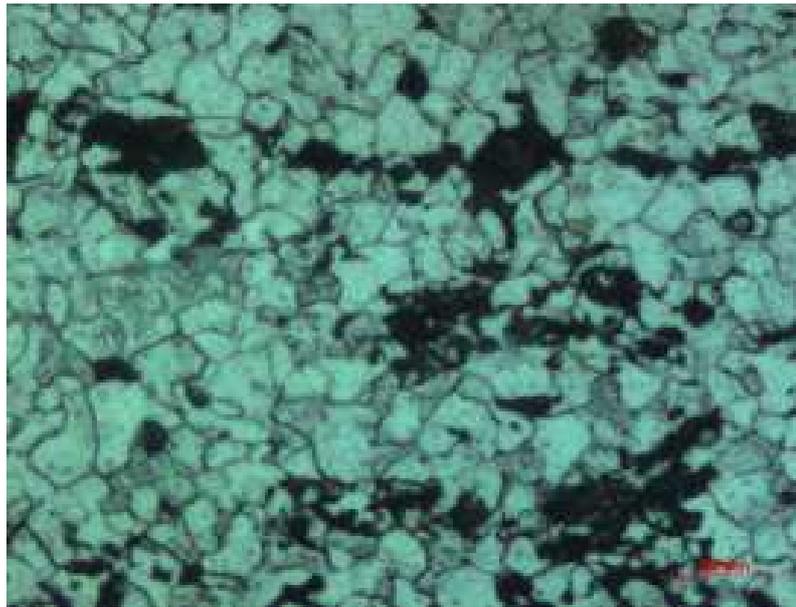


Figure II.8 : *La microstructure de l'acier X42(20 μm) [7].*

II.7.2. Microstructure de X52 :

La microstructure de l'acier X52 est analysée par microscopie optique, après polissage mécanique et attaque au Nital.

L'analyse micrographique montre que la tôle, servant à la fabrication de ce tuyau, est laminée dans ses deux directions longitudinale (figure II.9) et transversale (II.10). Les taux de laminage dans les deux sens peuvent être différents.

En effet, nous observons des bandes de perlite colorées en noir alternées avec des bandes de ferrite en blanc, signe d'un laminage. On peut également dire que la ferrite est majoritaire dans cette structure.

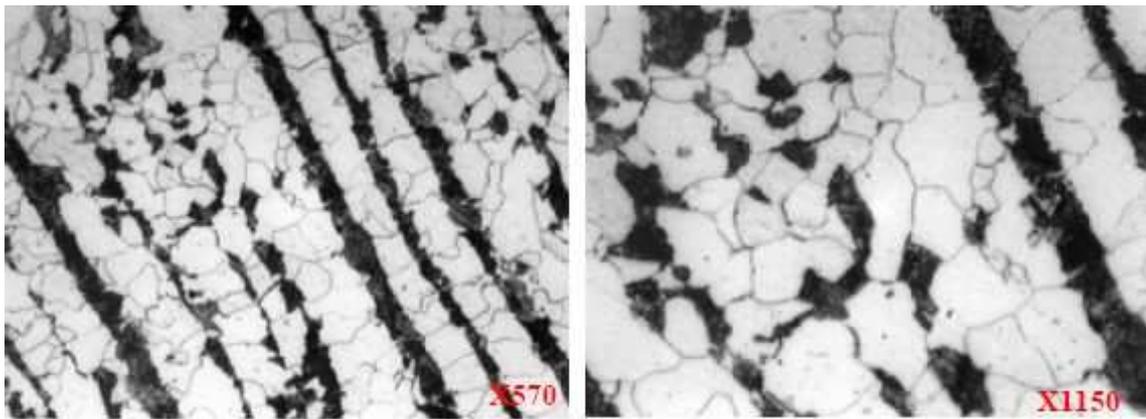


Figure II.9 : *Microstructure de l'acier API 5L X52, analyse longitudinale, avec un grossissement de X570 et de X1150 [8].*

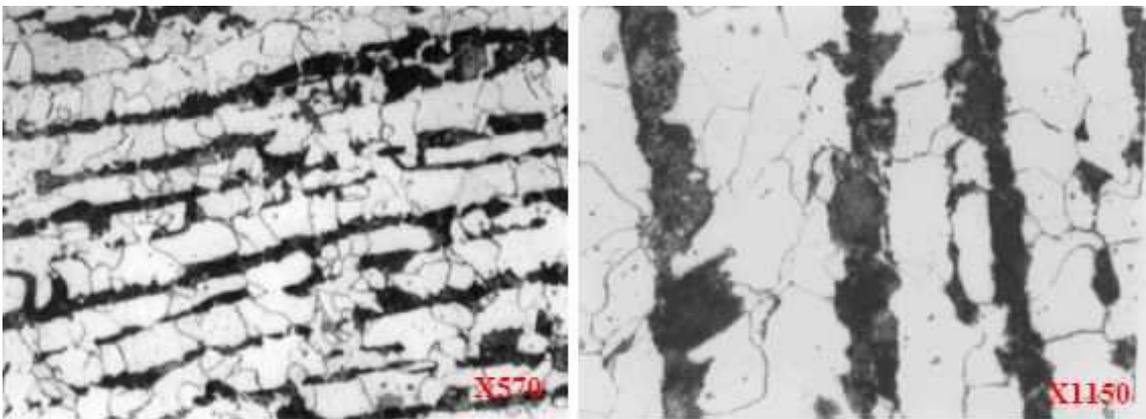


Figure II.10 : *Microstructure de l'acier API 5L X52, analyse transversale, avec un grossissement de X570 et de X1150 [8].*

II.7.3. Microstructure de X60 :

La microstructure de l'acier X60 dans l'état brut après le laminage et après le traitement thermique effectué dans le laboratoire est présentée sur la figure II.11 et II.12.

Dans l'état brut, la microstructure est formée par la ferrite (F) et la bainite (B) avec un peu de la perlite. F et B sont disposés dans des rangées, comme dans le cas de l'acier X52 (visible sur le grossissement plus faible). La taille de grains ferritique dans l'acier X60 est plus petite que celle de l'acier X52, environ 8 μ m.

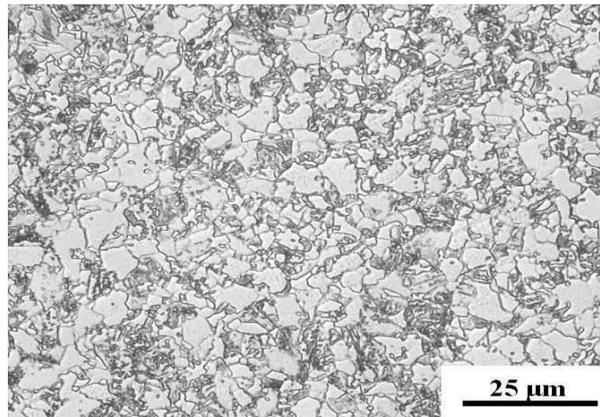


Figure II.11 : *Microstructure des échantillons de l'acier X60 après le laminage (25μm) [9].*

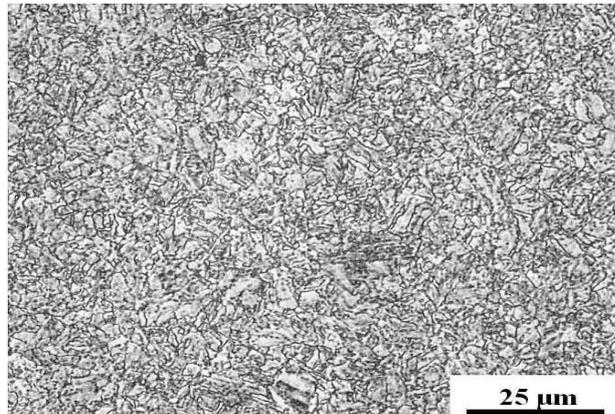


Figure II.12 : *Microstructure des échantillons de l'acier X60 après le traitement thermique, coupe dans le sens longitudinal (25μm) [9].*

II.7.4. Microstructure de X65 :

En raison du laminage, l'acier X65 présente une structure fine et très orientée en bandes alternées de ferrite et perlite. La taille de grain est en moyenne égale à 11μm. La proportion de perlite est relativement élevée malgré la faible teneur en carbone.

Ceci est dû essentiellement à l'addition d'éléments gammagènes tels que le manganèse. La figure II.13 montre une forte ségrégation due à la faible vitesse de refroidissement en fin de laminage (refroidissement à l'air).

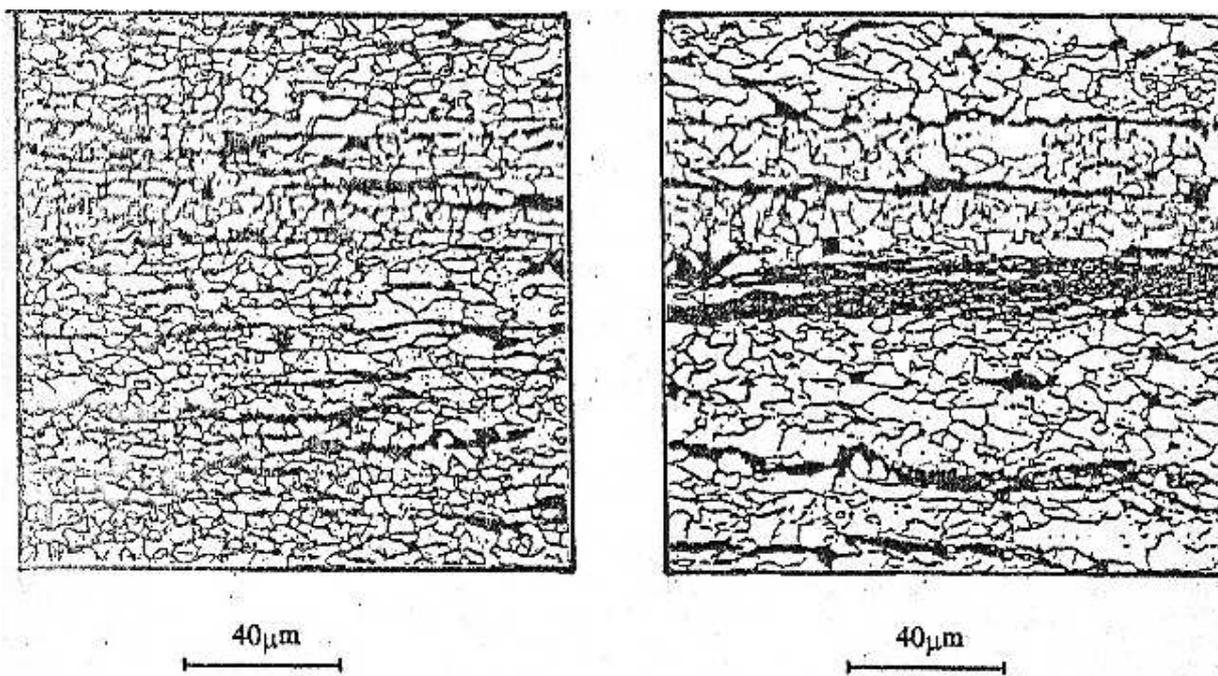


Figure II.13 : *microstructure de l'acier X65 Sens travers du laminage*
(la taille des grains $11\mu\text{m}$) [3].

Pour le X60 et le X65, les grains sont très fins que l'on voit uniquement que la ferrite, le pourcentage en perlite presque faible que l'on ne voit pratiquement pas (pas de perlite visuellement). Nous remarquons aussi que la structure de l'acier X60 est plus fine que celle de l'acier X42, cela est dû aux traitements subi par l'acier.

II.7.5. Microstructure de X70 :

Les aciers de type X60, X65, X70 présentent une microstructure de type ferrito-perlitique. Les bandes de perlite marquées dans les aciers de type X60, X65, X70 expliquent la sensibilité de ces aciers à la fissuration. Cette microstructure en bandes favorise la propagation des fissures.

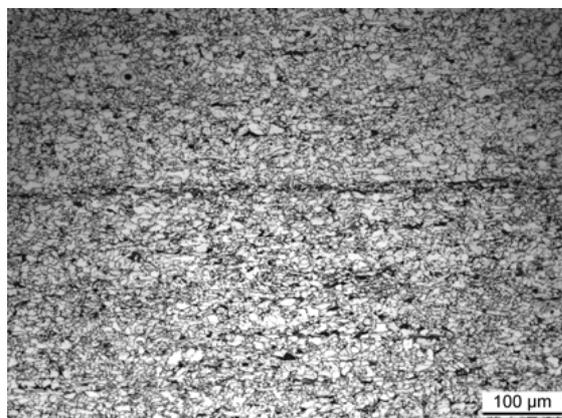


Figure II.14 : *Microstructure ferrito-perlitique de l'acier de type X70, plan LT* [9].

II.7.6. Microstructure de X80 :

Ceux-ci ont été polis mécaniquement jusqu'au grade 1 μm , puis attaqués pendant 7 secondes dans une solution de Nital à 4 % (solution d'éthanol avec 4 % volumique d'acide nitrique) à température ambiante. Les observations (microscopie optique et MEB) révèlent que l'acier X80 est ferrito-perlitique (Figure II.15) avec une proportion volumique de perlite, déterminée par traitement d'image, d'environ 12 %. Cette proportion est cependant une moyenne et, est très variable selon la zone observée. Les grains de ferrite sont de taille variable, de 5 μm à environ 20 μm . Entre eux se trouvent des îlots de perlite lamellaire dont la taille varie de quelques microns à une dizaine de microns. Le matériau possède une forte anisotropie microstructurale, due au laminage des tôles qui n'ont pas été recuites, qui se traduit par la présence d'alignements perlitiques dans l'épaisseur de la tôle, par une diminution de la taille des grains au niveau des peaux de la tôle (Figure II.16) [10].

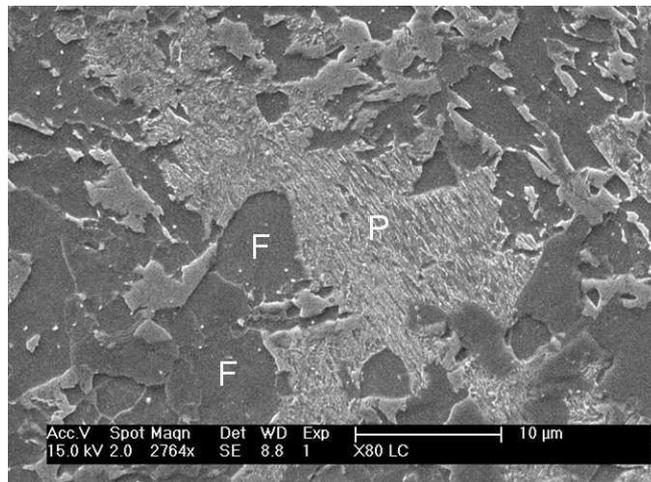


Figure II.15 : La microstructure de l'acier X80, pris dans le coeur de la tôle, dans le plan d'observation TL (Les grains de ferrite sont notés F et la perlite P) [10].

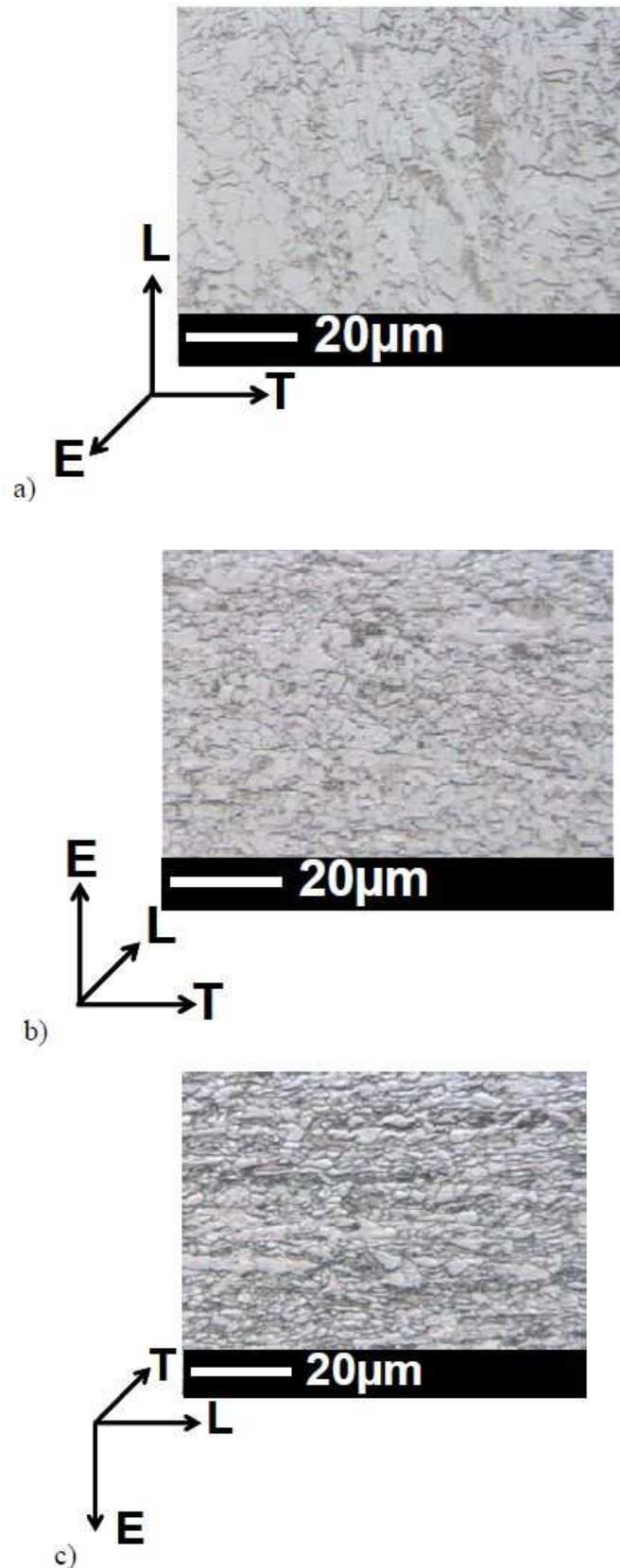


Figure II.16 : Observations en microscopie optique de la peau de la tôle perpendiculairement à l'épaisseur(a), au sens longitudinal(b) , et au sens transverse(c) [10].

Chapitre III :
**SOLLICITATIONS SUR LES TUBES SOUS
PRESSIONS**

III.1. INTRODUCTION :

Le calcul de la charge et la détermination de son influence sur un cylindre creux parfait est relativement aisé, sur la base de théories générales. Par contre, lorsqu' il s'agit d'un tube de production industrielle, il faut tenir compte des paramètres influents supplémentaires.

L'action de ces paramètres ne peut être en partie évaluée que sur la base d'expérimentations pratiques sur le chantier.

Les facteurs influents essentiels sont:

- Les différentes répartitions de tensions assez appréciables existant dans une canalisation par rapport au cylindre creux idéal.
- Les écarts de forme ou de surface inévitables dans le cas de tubes produits techniquement par rapport au cylindre creux idéal.

En ce qui concerne la sollicitation de la conduite en service, il faut tenir compte d'une part de la charge statique due à la pression intérieure, ainsi que de l'influence de la charge pulsatoire due aux fluctuations de pression et de l'influence de la pose de conduite. La fabrication de gros tubes selon différents procédés soit avec soudure longitudinale ou spirale, ainsi que leurs propriétés générales et leurs classifications sont supposées connues

III.2. DIFFERENTES ETAPES DE COMPORTEMENT DU MATERIAU :

L'allure générale du comportement d'un acier de construction est celle présentée sur la figure III.1 Les caractéristiques de base (élasticité, ductilité, résistance maximale) sont initialement garanties. La présence d'un palier d'écoulement plastique à contrainte constante est fondamentale en vue d'une application en analyse plastique. La réserve de résistance due à l'écrouissage assure la sécurité de la structure en cas de déformations importantes. Cette réserve peut être définie par le rapport de la limite d'élasticité à la résistance maximale qui est une valeur normalisée dans certains cas.

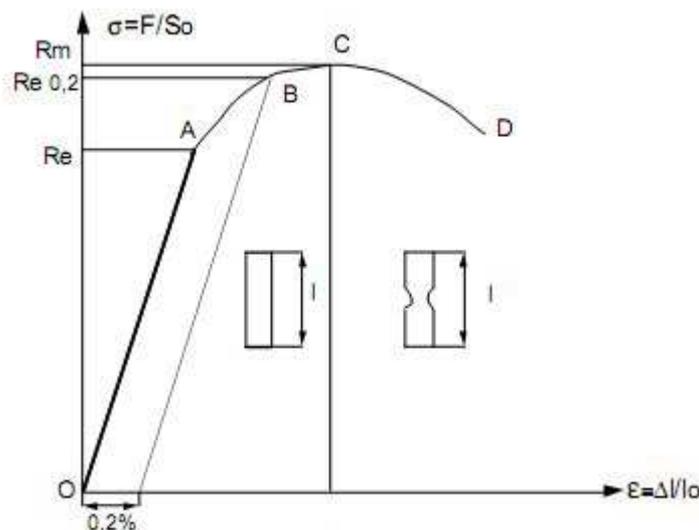


Figure III.1 : Comportement d'un acier au carbone (vierge) [11].

La courbe de comportement d'un acier écroui ne présente pas de palier de plasticité et l'évolution post-élastique est progressive et non linéaire. L'acier écroui est caractérisé par une nouvelle limite d'élasticité plus grande que sa valeur initiale.

La plasticité est caractérisée par des déformations irréversibles qui se développent dans la structure lorsqu'un niveau de contrainte, connu sous le nom de limite d'élasticité, a été atteint. La réponse en élastoplasticité à une sollicitation est gouvernée par trois concepts fondamentaux liés :

- Le critère de plasticité, qui généralise la notion de limite d'élasticité ou de seuil de plasticité en traction uni axiale.
- La loi d'écoulement, qui définit dans le cas de sollicitation multiaxiale, la façon dont évolue la déformation plastique.
- La règle d'écrouissage qui décrit l'évolution du critère en fonction de l'histoire.

III.3. SOLLICITATION DU CORPS DU TUBE :

III.3.1. Contraintes dans un tube à parois épaisses :

Les contraintes soumis dans le tube sont : la contrainte radiale σ_r , la contrainte circonférentielle σ_θ et la contrainte longitudinale σ_z (figure III.2)

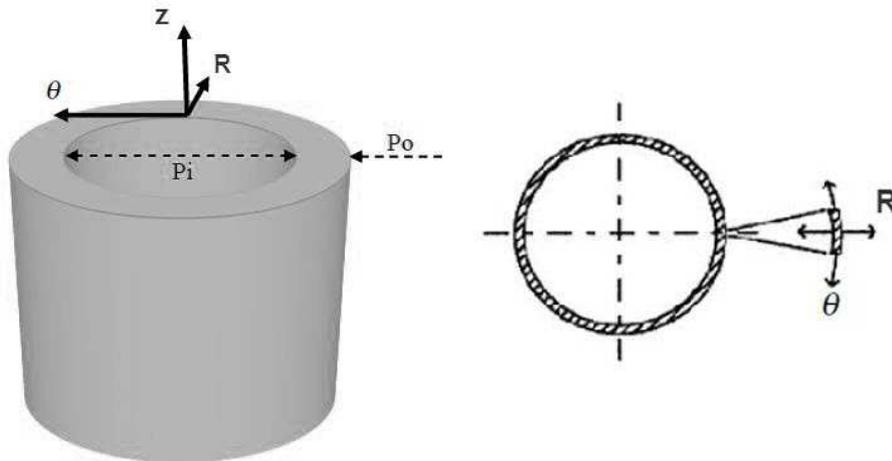


Figure III.2 : Direction des contraintes dans un tube
(Radiale R, longitudinale Z, circonférentiel θ)

Nous allons considérer quelques cas particuliers concernant les cylindres à paroi épaisse soumis à une pression.

III.3.1.1. Tube à parois épaisses soumis à la pression (externe P_0 , et interne P_1) :

Les formulations suivant sont données pour un cylindre ouvert ($\sigma_z = 0$) [12]:

$$\sigma_r = \frac{\alpha^2 p_i - b^2 p_0}{b^2 - \alpha^2} - \frac{(p_i - p_0) \alpha^2 b^2}{r^2 (b^2 - \alpha^2)} \quad (\text{III.1})$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha^2 p_i - b^2 p_0}{b^2 - \alpha^2} + \frac{(p_i - p_0) \alpha^2 b^2}{r^2 (b^2 - \alpha^2)} \quad (\text{III.2})$$

σ_r : Contrainte normale radiale, [MPa]

σ_θ : Contrainte normale circonférentielle, [MPa]

σ_z : Contrainte normale longitudinale, [MPa]

a : Rayon intérieur du cylindre, [mm]

b : Rayon extérieur du cylindre, [mm]

r : rayon, $a \leq r \leq b$, [mm]

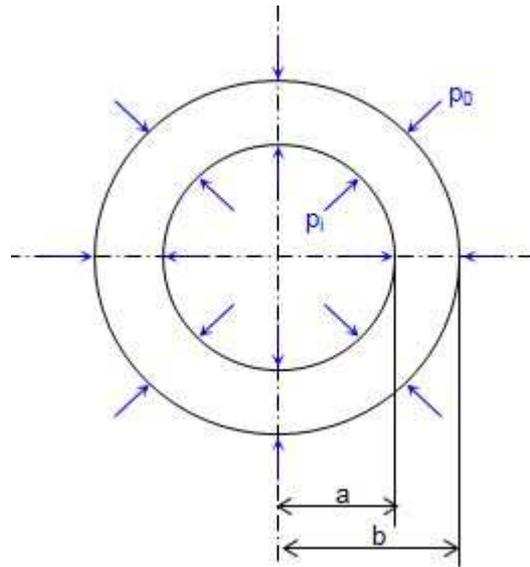


Figure III.3 : La pression interne et externe agit sur le tube

III.3.1.2. Tube à parois épaisses soumis à la pression interne P_I ($P_0 = 0$) :

Dans ce cas, si l'épaisseur du cylindre est épaisse par rapport à son diamètre, on peut considérer la contrainte normale tangentielle comme uniforme dans l'épaisseur, alors on trouve [12]:

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (\text{III.3})$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (\text{III.4})$$

$$\sigma_z = \frac{a^2}{b^2 - a^2} p_i, \quad \text{Si le tube est ouvert } \sigma_z = 0 \quad (\text{III.5})$$

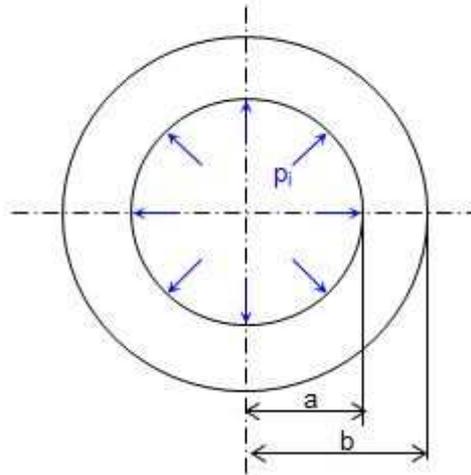


Figure III.4 : La pression interne agit sur le tube

La figure III.5 représente un exemple d'un cylindre d'acier à paroi épaisse (de 200 mm de diamètre intérieur et de 400 mm de diamètre extérieur) soumis à une pression interne de 60 MPa. On étudie la répartition des contraintes dans la paroi de ce cylindre, ainsi que le déplacement radial (u) qui l'affecte, sachant que les constantes élastiques du matériau sont : Le module de Young $E = 200$ GPa et coefficient de poisson $\nu = 0,3$.

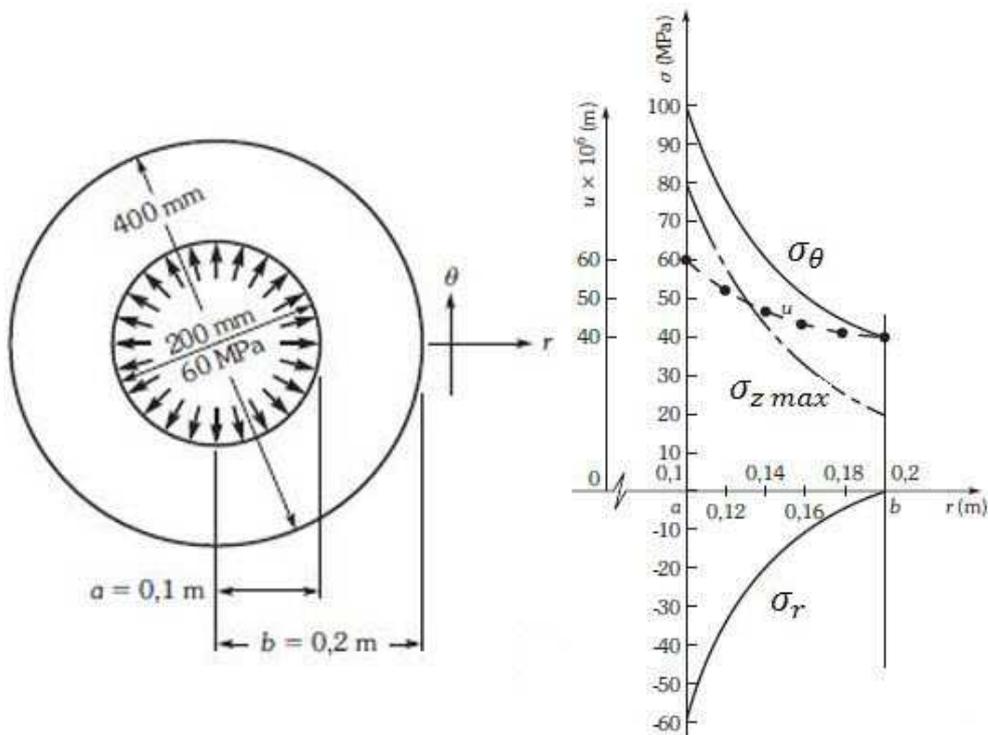


Figure III.5 : Les contraintes agissent dans un tube à parois épaisse soumis à une pression interne.

$$\sigma_r = 20 \left(1 - \frac{0,04}{r^2} \right) \quad (\text{Mpa})$$

$$\sigma_\theta = 20 \left(1 + \frac{0,04}{r^2} \right) \quad (\text{Mpa})$$

$$\sigma_{z \max} = \frac{a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r^2} p_i = \frac{0,8}{r^2} \quad (\text{Mpa})$$

$$u = \frac{a^2 p_i r}{E(b^2 - a^2)} \left[(1 - \nu) + (1 + \nu) \frac{b^2}{r^2} \right] = 10^{-4} \left(0,7 + \frac{0,052}{r^2} \right) \quad (m)$$

En effet il est clair de notifier que ces contraintes sont maximales sur la paroi interne du cylindre ($r = a$) dû à l'application de la pression interne puis tendent progressivement vers zéro quand on s'approche du diamètre extérieur (b). Ceci peut expliquer le fait que si cette pression est proche à la limite élastique, le risque de la fissuration des corps non épais serait très probable.

III.3.1.3. Tube à parois épaisses soumis à la pression externe P_0 ($P_1 = 0$) :

Lorsque seule la pression externe P_0 agit on trouve les relations ci-dessous [12] :

$$\sigma_r = \frac{p_0 b^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (\text{III.6})$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_0 b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (\text{III.7})$$

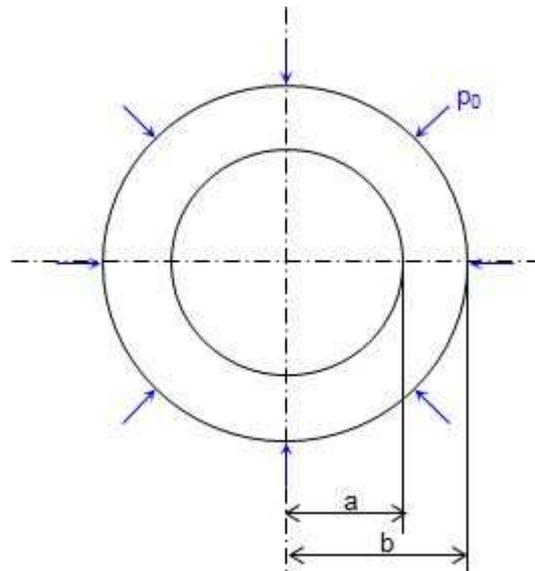


Figure III.6 : La pression externe agit sur le tube

III.3.2. Contraintes dans un tube à parois minces soumis à une pression interne :

Les tubes de Pipeline sont des tubes minces cela est dû au fait que l'épaisseur de la conduite est inférieure au diamètre extérieur.

$$e/D_{\text{ext}} \leq 0,05 \quad (\text{III.8})$$

Lorsque seule la pression interne agit, la contrainte radiale qui est alors négligeable par rapport à la contrainte circonférentielle, est souvent supposée nulle.

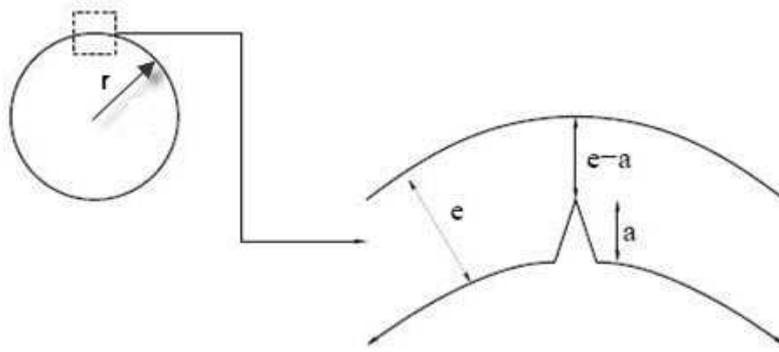


Figure III.7 : Géométrie du tube considéré

La contrainte circonférentielle σ_{θ} est donnée par la formule suivant [3]:

$$\sigma_{\theta} = p_i \frac{r}{e} \quad (\text{III.9})$$

Cette relation ne reflète cependant pas l'effort réel dans la paroi du tube. La valeur σ_v , dite contrainte équivalente au sens de Von Mises résulte de la formule suivante d'après l'hypothèse de l'énergie de changement de configuration:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_{\theta}^2 - \sigma_z \sigma_{\theta}} \quad (\text{III.10})$$

Dans laquelle :

σ_v , est la contrainte équivalente

σ_{θ} , est la contrainte circonférentielle

σ_z , est la contrainte longitudinale dans le sens de l'axe du tube

La contrainte radiale dans le sens de l'épaisseur pour des dimensions des pipelines usuelles peut être négligée.

Si on représente graphiquement le rapport $\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_v}$ en fonction de $\frac{\sigma_z}{\sigma_{\theta}}$, il en découle, comme le montre la figure III.8, une augmentation ou une diminution de l'effort du matériau dans la paroi du tube, en fonction de la valeur et le signe de la contrainte longitudinale. Etant donné que σ_v peut être directement comparée avec la valeur de la limite élastique $\sigma_{0,2}$, caractéristique du matériau dans le cas d'une sollicitation unidirectionnelle lors de l'essai de traction, l'écoulement plastique ne se produit qu'à une valeur de la contrainte circonférentielle supérieure à la limite élastique.

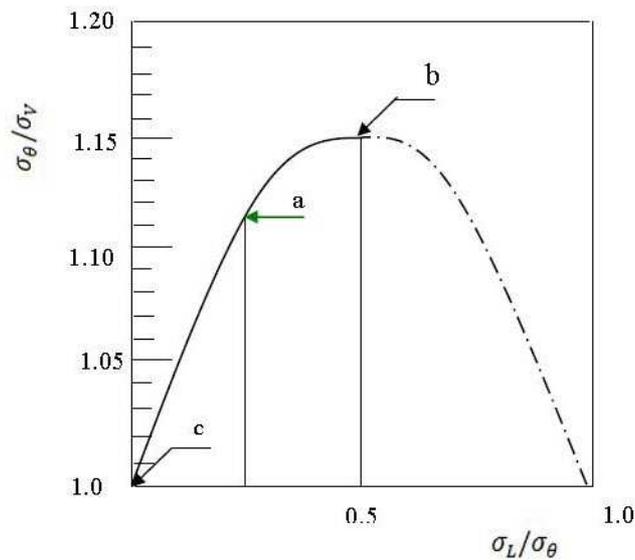


Figure III.8 : Variation du rapport contrainte circonférentielle / contrainte équivalente en fonction du rapport contrainte longitudinale / contrainte circonférentielle [3].

Dans le cas d'une conduite en exploitation, on rencontre en principe les états de charges typiques suivants [3].

- a) L'allongement ou l'expansion du tronçon est gêné par un sol comprimé ou par ancrage dans le sens longitudinal (figure III.9 a).

$$\sigma_z = 0,3 \sigma_\theta \quad \frac{\sigma_\theta}{\sigma_v} = 1,13$$

Le facteur 0,3 est le coefficient de Poisson, résultant de la contraction transversale.

- b) La force agissant sur les fonds est introduite comme contrainte longitudinale dans la paroi du tube, dans le cas d'une extrémité non ancrée (figure III.9 b).

$$\sigma_z = 0,5 \sigma_\theta \quad \frac{\sigma_\theta}{\sigma_v} = 1,15$$

- c) La contrainte longitudinale dans la paroi du tube (figure III.9 c).est ramenée à des valeurs plus petites que dans le cas a) ou b), à cause de forces compressives supplémentaires, par exemple après une augmentation de la température ou des contraintes de flexion, dans des tronçons coudés, de telle sorte que nous obtenons :

$$\sigma_z = 0 \quad \frac{\sigma_\theta}{\sigma_v} = 1,0$$

Cet état de contrainte se retrouve dans des tubes, lors de l'essai hydrostatique sur un banc d'épreuve hydraulique, dans lequel la force hydraulique frontale est absorbée par des moyens mécaniques.

En pratique, les différents états de charges typiques ne se produisent pas d'une manière univoque, mais sous des états intermédiaires quelconques.

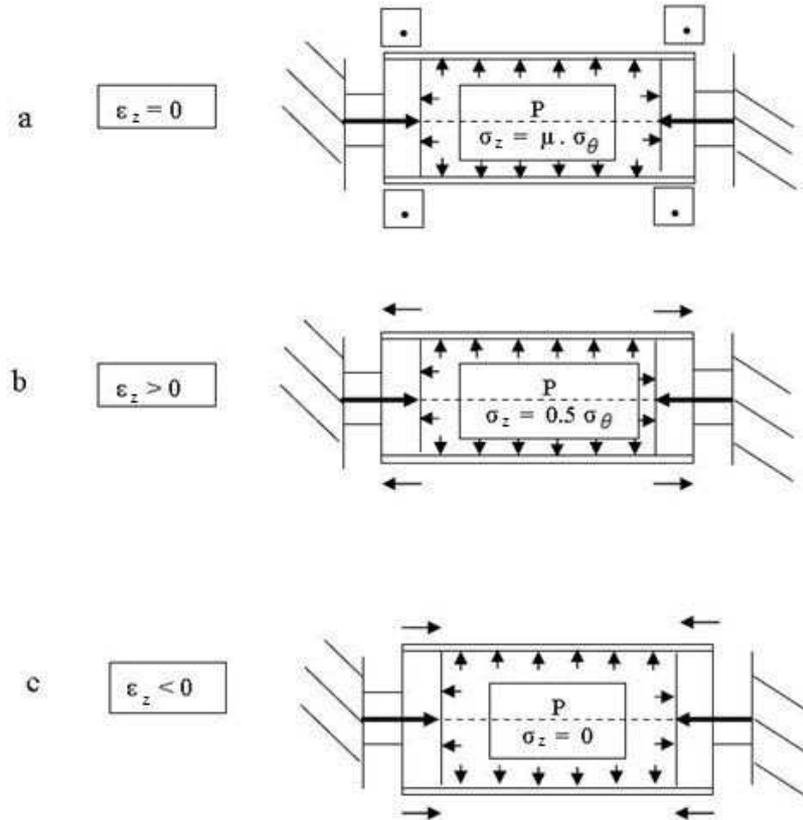


Figure III.9 : Etats de contraintes dans un tube soumis à la pression intérieure [3].

III.2.2.1. Contrainte tangentielle dans la paroi du tube X70 :

On considère un pipeline API 5L X70 de diamètre intérieure $d=891,2\text{ mm}$ et d'épaisseur $e=11,6\text{ mm}$ (Figure III.10), avec une pression interne de 70 bars, et rapport de charge $R=0,1$. Ce tube contient une fissure de longueur a . On cherche à établir les conditions de ruine de ce pipeline.

On pourra écrire l'équilibre d'une demi-section de tube telle que celle représentée sur la Figure III.2 ci-dessus.

$$\text{On trouve alors : } 2e\sigma_{\theta} = \int_0^{\pi} r \sin\theta p d\theta = 2rp \tag{III.11}$$

$$\text{Ce qui donne la contrainte tangentielle : } \sigma_{\theta} = p_i \frac{r}{e} = 7 \frac{445,6}{11,6} = 269\text{ Mpa}$$

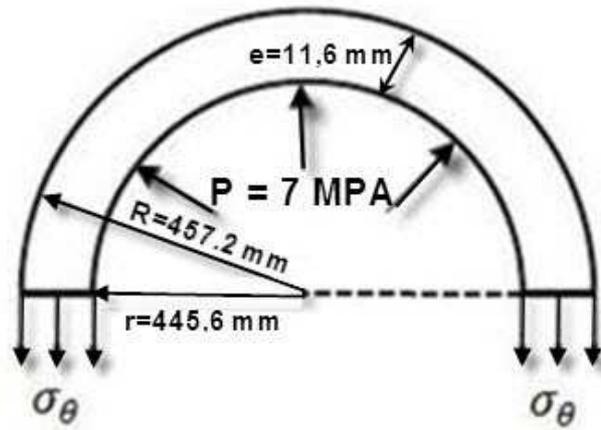


Figure III.10 : Equilibre d'une demi-section de tube soumis à la pression interne

III.4. LES TYPES DES FISSURES :

Au cours des dix dernières années, plusieurs études ont été réalisées dans le domaine d'évaluation et de contrôle de la nocivité des défauts de surfaces dans les pipelines. Ces défauts de surface résultent par exemple dans : la corrosion, les endommagements causés par des agressions de forces externes ou aussi les défauts de soudures et sont assimilés à des fissures semi elliptiques par conservatisme. La figure III.11 montre quelques géométries des fissures.

	Cylindre avec fissure circonférentielle semi-elliptique	Cylindre avec fissure axiale semi-elliptique
Fissures externes		
Fissures internes		

Figure III.11 : Différentes géométries des fissures

III.4.1. Fissuration longitudinale dans un tube :

La fissuration longitudinale est un mode de rupture qui touche les conduites de grand diamètre et fragiles dans le cas par exemple de canalisations de distribution d'eau en fonte grise. La fissure se propage dans le sens longitudinal, et la pression interne peut provoquer la rupture complète de la canalisation. Ces ruptures sont souvent causées par des augmentations subites et inhabituelles de pression et des coups de bélier [13].



Figure III.12 : Mode de rupture d'une canalisation dans le cas d'une fissuration Longitudinale.

III.4.2. Les fissures circonférentielles dans un tube :

On peut rencontrer dans les canalisations des fissures circonférentielles (voir figure III.13). Ces dernières peuvent se propager sur toute l'épaisseur de la canalisation et sous les différentes sollicitations, elles conduisent à des ruptures brutales.

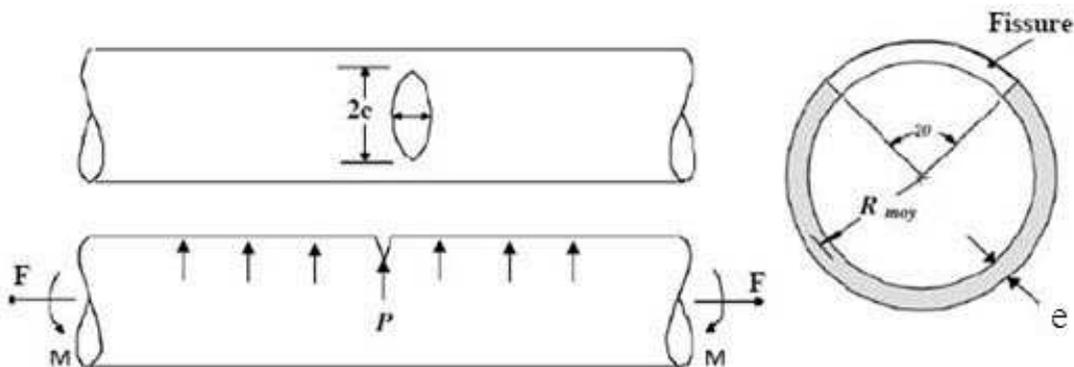


Figure III.13 : Géométrie d'un tube avec une fissure circonférentielle étudiée.

Le facteur d'intensité de contraintes pour les fissures circonférentielles dans un tube soumis à une force de traction uniaxiale et un moment fléchissant est donné par la formule suivante [13] :

$$K_I = (F_t \sigma_t + F_b \sigma_b) \sqrt{\pi R_m \theta} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

- F_t et F_b sont les facteurs géométriques correspondants à σ_t et σ_b qui représentent le facteur d'intensité de contraintes normalisée. Ils augmentent avec l'angle de la fissure et le rapport $\frac{R_{moy}}{e}$.
- σ_t et σ_b sont respectivement la contrainte de traction et de flexion, elles sont données par les deux formules suivantes :

$$\sigma_t = \frac{F}{2\pi R_{\text{moy}} e} \quad (\text{III.13})$$

$$\sigma_b = \frac{M}{\pi R_{\text{moy}}^2 e} \quad (\text{III.14})$$

Dont : R_{moy} : est le rayon moyen du tube

e : est l'épaisseur du tube

F et M sont respectivement la force de traction et le moment fléchissant

F est donné par la formule suivant :

$$F = \pi \left(R_{\text{moy}} - \frac{e}{2} \right) \cdot P_i \quad (\text{III.15})$$

Avec P_i est la pression interne du tube.

Chapitre IV :
**COMPORTEMENT EN FATIGUE DES
PIPELINES**

IV.1. INTRODUCTION :

La fatigue est un mode de rupture différé qui se produit lorsque le matériau est soumis à des chargements cycliques, et cela même pour des contraintes bien inférieures à sa limite d'élasticité et des températures faibles. Ce mode d'endommagement limite la durée de vie des composants de la plupart des machines et des installations industrielles.

On distingue généralement trois étapes distinctes en jeu des mécanismes déférentes.

- L'initiation de la fissure, il s'agit là de la création à partir du ((défaut originel)) d'une fissure de dimensions détectables par les procédés de contrôle non destructifs utilisables.
- La propagation lente de la fissure de fatigue. Au cours de cette étape, la fissure peut croître plus ou moins rapidement selon les matériaux et l'intensité du chargement critique, et atteindre dont certains cas une longueur de plusieurs centimètres, voire de l'ordre du mètre. Dans d'autres cas au contraire, cette étape peut être brève et la fissure peut ne peu pas croître de façon substantielle.
- La rupture il s'agit là de l'étape finale du phénomène, qui se produit lorsque la taille de la fissure est telle qu'elle ait atteint son seuil d'instabilité.

IV.2. L'AMORÇAGE :

La définition de l'amorçage peut être déférent suivant que l'on s'enterrât à l'évolution micro structurale des matériaux ou que l'on concéder l'application d'une micro fissure.

Pour évaluer le stade d'amorçage dans une structure, on se réfère de préférence à une notion de micro fissure, mais cette notion elle-même dépend directement de la résolution du moyen d'observation utilisé aussi en l'absence d'une accorde général sur la définition de l'amorçage. Différent auteurs définissent le nombre de cycle d'amorçage na pour une longueur à de l'ordre 0,1 mm.

En effet cette dimension peut être détecté assez facilement, elle correspond par ailleurs à une taille de défaut dans bon nombre de cas, des qu'une fissure atteint une profondeur voisine de cette dimension, elle se propage régulièrement à travers la section.

Lorsqu'une éprouvette ou une pièce donne lieu à une rupture par fatigue, la vie peut être décomposée en trois partis :

- Amorçage d'une fissure.
- Propagation lente de cette fissure.
- Propagation brutale conduisant à la rupture.

IV.3. FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTE :

C'est un facteur caractérisant la sévérité de la situation obtenue par application d'une charge sur une pièce fissurée. Ce facteur s'obtient par conservation des contraintes et déformations au voisinage du front de la fissure pour les modes de fissuration élémentaires mode I, mode II, mode III.

Les facteurs K_1 , K_n et K_m caractérisent à la fois la géométrie du détail et de la fissure, et la nature de sollicitation. Ils s'expriment en $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

IV.4. COURBE DE WÖHLER (S-N):

La courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule qui permet de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans le domaine de fatigue. Elle définit une relation entre la contrainte appliquée σ (parfois notée S) et le nombre de cycles à la rupture N_R (en fait nombre de cycles pour lequel on observe P% de ruptures). En pratique, la courbe de Wöhler est généralement donnée pour une probabilité de rupture $p = 0.5$.

Pour la tracer, on réalise généralement des essais simples qui consistent à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude de chargement constante fluctuant autour d'une valeur moyenne fixée, et à noter le nombre de cycles au bout duquel l'amorçage d'une fissure est observé, appelé ici nombre de cycles à rupture N_R . Pour plus de commodité, ce nombre N_R est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique, et l'amplitude de contrainte σ_a est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire.

Ainsi, à chaque pièce essayée, correspond donc un point du plan (N_R , σ_a) et à partir d'un certain nombre d'essais à contrainte généralement décroissante, on peut établir la courbe de Wöhler (Figure IV.1) qui a l'allure suivante :

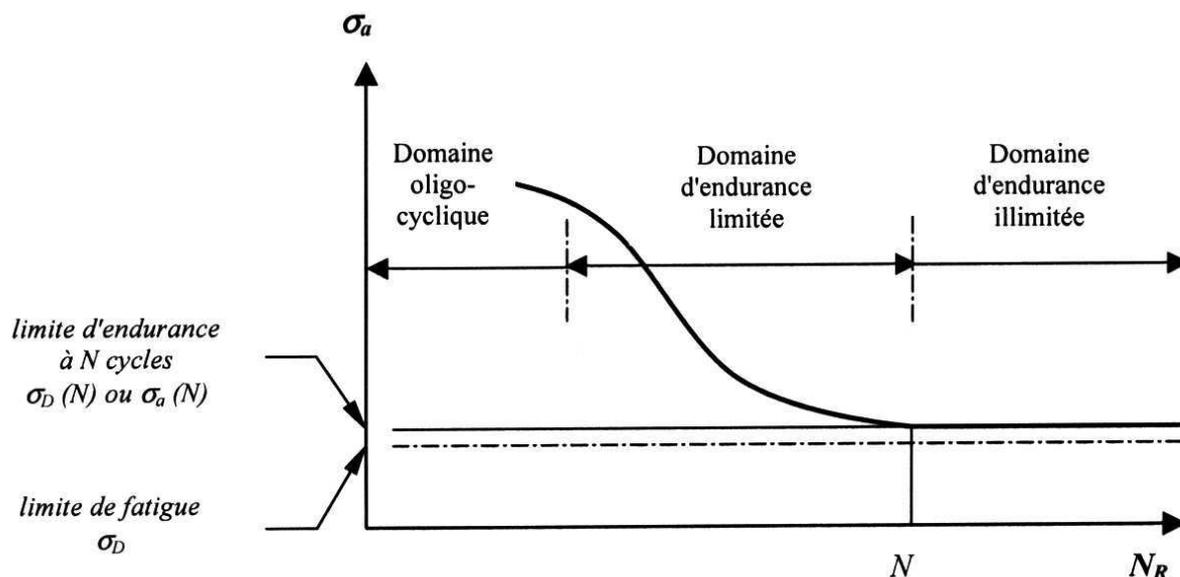


Figure IV.1 : Courbe de Wöhler et les différents domaines de fatigue

Sur cette courbe, connue sous les noms de courbe de Wöhler et courbe S-N (Stress-Number of cycles), on peut distinguer trois domaines :

Domaine de fatigue plastique oligocyclique, pour faible nombre de cycles (soit par exemple, des durées de vie inférieures à 10^5 cycles pour un matériau donné). Il correspond à des contraintes élevées pour lesquelles se produit une déformation plastique macroscopique du matériau. On peut situer ce domaine depuis la contrainte correspondant à la limite d'adaptation macroscopique jusqu'à celle correspondant à la charge de rupture statique R_m du métal considéré, sollicité dans les mêmes conditions.

Domaine de fatigue ou d'endurance limitée, où la rupture survient après un nombre limité de cycles (10^5 à 10^7) sans être accompagnée d'une déformation plastique d'ensemble, mesurable. La réponse de l'éprouvette peut être purement élastique (comportement élastique dès les premiers cycles) ou bien adapté (comportement devenu élastique après stabilisation cyclique). Dans ce régime, le nombre de cycles N_R croît quand l'amplitude de la contrainte périodique σ_a décroît.

Domaine d'endurance illimitée ou zone de sécurité, qui correspond aux contraintes les plus petites, inférieures à une contrainte seuil, dite limite de fatigue. En deçà de cette valeur limite de σ , notée σ_D , il n'y a jamais de rupture par fatigue quel que soit le nombre de cycles appliqué. Cette limite peut ne pas exister ou être mal définie pour certains matériaux (aciers à haute résistance, métaux non ferreux). Dans ce cas, on introduit la notion de limite de fatigue conventionnelle ou limite d'endurance. Il s'agit, pour une contrainte moyenne σ_m donnée, de l'amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50% de rupture après un nombre fini N (appelé censure) de cycles. On la note $\sigma_D(N)$, et selon le matériau la censure N varie entre 10^6 à 10^8 cycles. Pour les aciers N est habituellement pris à 10^7 .

IV.5. MODES DE RUPTURE :

Il existe trois façons d'appliquer une force pour permettre à une fissure de se propager :

- Mode I - Une contrainte de traction normale au plan de fissure,
- Mode II - Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et perpendiculaire au front de fissure, et
- Mode III - Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et parallèlement au front de fissure.

De manière générale, une fissure se propage dans un matériau sous une combinaison de contraintes dans les trois modes.

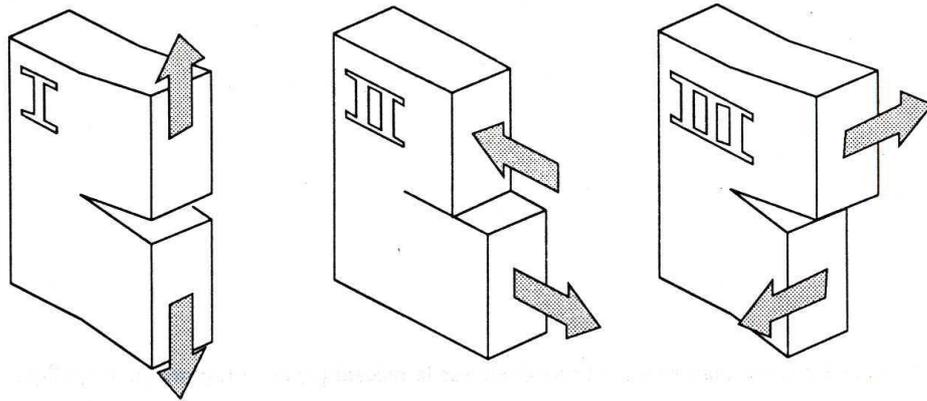


Figure IV.2 : *Les trois modes de rupture*

IV.6. RISQUE DE FISSURATION PAR FATIGUE AU-DELA DE 10^7 CYCLES :

C. BATHIAS [14], Montre que la notion de limite en fatigue est liée à l'hypothèse de l'existence d'une asymptote horizontale sur la courbe S-N à partir de 10^6 ou 10^7 cycles il considère ainsi que toute éprouvette non rompue à 10^7 a une durée de vie infinie.

Les recherches sur les très grandes durées de vie à partir d'essai de fatigue accélérée réalisée à 20KHZ à l'aide de machines équipées d'un convertisseur piézo-électrique (1à3).

On choisit des exemples pour convaincre le lecteur du risque de rupture par fatigue après 10^7 cycles et du non existence de l'asymptote de la courbe S-N.

Le premier exemple présente une courbe S-N déterminée jusqu'à 10^9 cycles à 20KHZ, 300K et R=-1 pour un alliage de titane 6-246 forgé avec plusieurs gammes, on remarque plusieurs phénomènes :

Des ruptures par fatigue surviennent jusqu'à 10^9 cycles.
Il n'y a pas d'asymptote.

Le seuil d'amorçage à 10^9 cycles est très inférieur (100 à 200MPa) à la limite de fatigue conventionnelle à 10^6 cycles.

La gamme de forgeage et de la microstructure a une influence marquée sur les très grandes durées de vie (325 à 490MPa pour 10^9 cycles).

Le deuxième exemple confirme qu'il n'y a pas d'asymptote et que des ruptures se produisent à 10^8 cycles dans des alliages de titane soumise à des sollicitations cycliques, à 20Kelvin, dans l'hydrogène liquide, ainsi bien à R=-1 qu'à R=0,1.

Enfin, il donne des résultats des très grandes durées de vie de fatigue pour des alliages de nickel, à l'ambiante et à 450°C. Quelle que soit la température, aucune asymptote n'est décelable alors que la contrainte alternée à rupture semble être deux fois inférieure à 10^{10} cycles qu'à 10^6 cycles dans l'Udimet 500.

Ces résultats conduits à penser que le risque de rupture par fatigue existe après 10^7 cycles.

Il donne des remarques sur la normalisation des essais de fatigue :

- Le risque de rupture existe au-delà 10^7 cycles.
- Il n'y a pas d'asymptote sur la courbe S-N.
- La notion de seuil de fatigue serait préférable à celle de la limite de fatigue.

Enfin, la microstructure métallurgique et la gamme d'élaboration jouent un rôle important au-delà de 10^7 cycles.

IV.7. MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT :

IV.7.1. Stades d'endommagement :

On distingue trois stades pour l'endommagement des matériaux par fatigue, la phase d'amorçage des fissures, la phase de propagation des fissures de fatigue et enfin la phase de rupture brutale. Cette dernière phase peut être fragile ou ductile.

L'amorçage peut se produire, soit sur un défaut, pré-existant dans le matériau ou créé au cours de la vie du matériau (rayure, piqûre de corrosion etc...), soit par micro-plasticité en surface. La propagation des fissures par fatigue se distingue par l'existence de lignes sur la surface de rupture marquant des positions d'arrêt du front de la fissure. Ces lignes peuvent être observée à l'échelle macroscopique (on parle alors de lignes d'arrêt), comme à l'échelle microscopique (on parle alors de stries de fatigue).

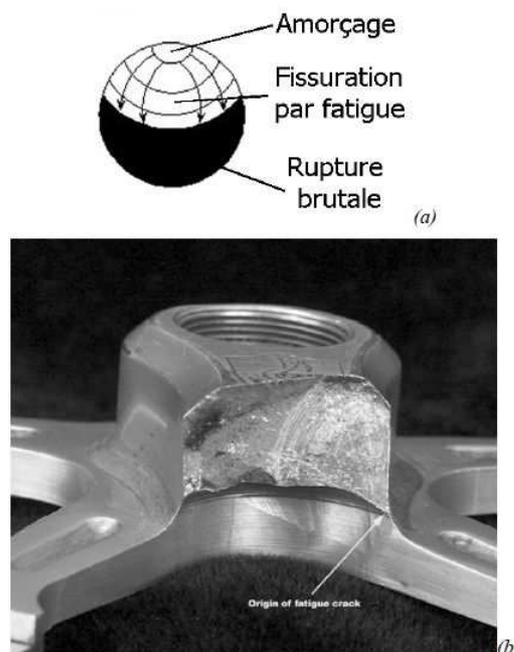


Figure IV.3 : (a) illustration des trois stades de la rupture par fatigue, l'amorçage, la propagation par fatigue, la rupture brutale, (b) exemple d'une rupture par fatigue [15].

IV.7.2. Phase d'amorçage sur défaut :

Les défauts qui sont susceptibles de conduire à l'amorçage d'une fissure de fatigue sont nombreux. Quelques exemples de défauts sont donnés ci-dessous, selon la méthode d'élaboration :

Il peut aussi exister dans le matériau des fissures internes liées au procédé de mise en forme ou aux traitements thermiques. Ces fissures sont rares dans les alliages métalliques mais leur répartition n'est pas aléatoire et correspond souvent à un défaut du procédé de mise en forme.

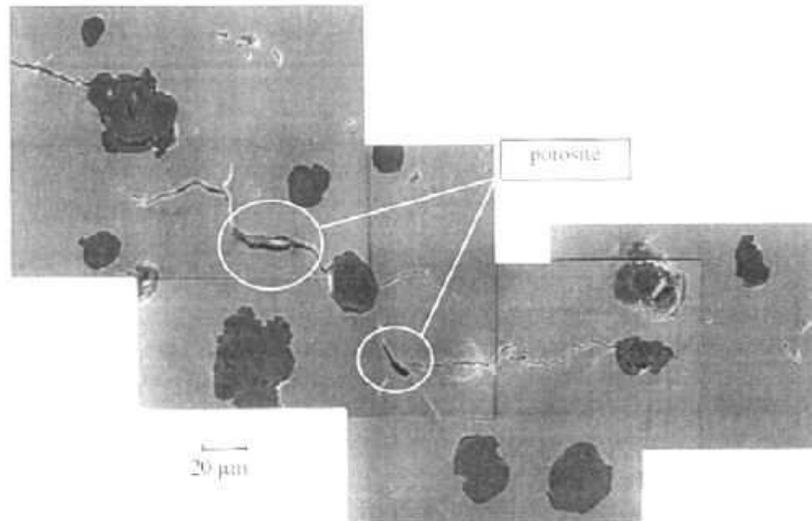


Figure IV.4 : *Amorçage de micro-fissures de fatigue dans une fonte à graphite sphéroïdal, les fissures s'amorcent sur les nodules ou sur les porosités, les porosités sont sévères [15].*

Les « défauts » peuvent aussi être des constituants du matériau, tels que des particules de seconde phase ou les joints de grains. Sur la Figure IV.4, on peut voir des micro-fissures de fatigue qui se sont formées à la surface d'une fonte à graphite sphéroïdal. Ces microfissures proviennent de porosités et de nodules de graphite.

Pour terminer, l'amorçage est aussi couramment associé aux effets de l'environnement. Comme on le voit sur la Figure IV.5 (a), des fissures de fatigue peuvent s'amorcer en surface sur une piqûre de corrosion, qu'une espèce fragilisante (ici l'hydrogène) en solution dans des inclusions, peut être libérée peu à peu dans le métal sous l'effet de la sollicitation mécanique et du temps. Une zone fragilisée se forme alors autour des inclusions, dont la dimension augmente avec le nombre de cycles et dont la frontière avec la fissure de fatigue est repérable par une modification du contraste en microscopie optique (Figure IV.5 (b)). Lorsque cette zone est suffisamment grande, une fissure de fatigue peut se propager jusqu'à la rupture, et cela même pour un niveau de contrainte très faible. Ce mécanisme conduit à des ruptures d'éprouvettes pour des durées de vie supérieures à 10^7 cycles.

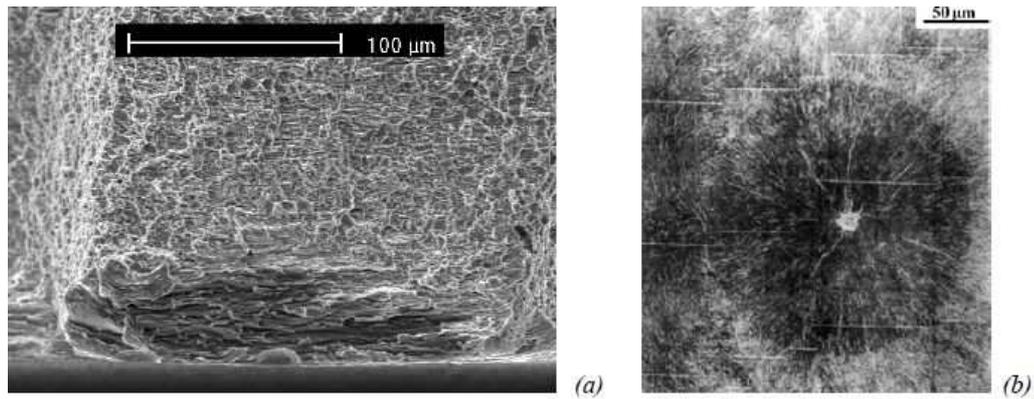


Figure IV.5 : Amorçage d'une fissure de fatigue par corrosion sous contrainte [15].

IV.7.3. Phase de propagation :

- *Stade I : cristallographique*

Dans les tout premiers stades de la fissuration, il est généralement observé que la fissure se développe le long des plans de glissement des dislocations (Figure IV.6). On parle alors de stade cristallographique. Lorsque la fissure se propage ainsi, le long de plans cristallins particuliers, l'aspect de la surface de rupture peut faire penser à une rupture fragile (par clivage), c'est pourquoi on utilise le terme de facettes de pseudo-clivage, bien qu'on y voie aussi des marques laissées par la propagation cyclique de la fissure. Ces faciès de rupture s'observent en général autour des sites d'amorçage des fissures.

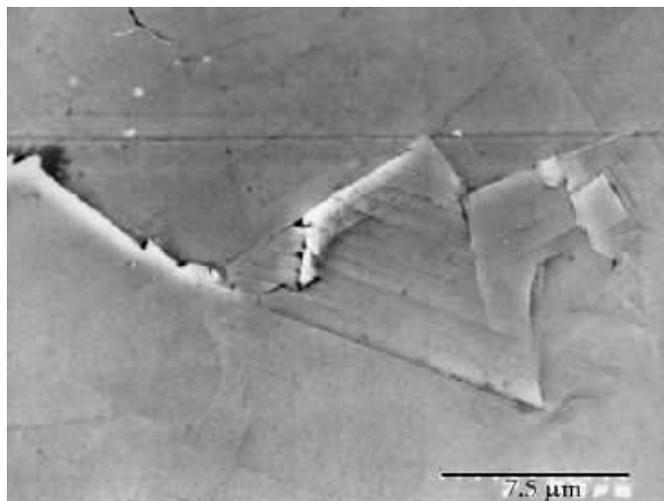


Figure IV.6 : Fissuration par fatigue en stade I [15].

- *Stade II : à stries*

Lorsque la longueur de la fissure augmente, la fissure se propage plus régulièrement, avec une sensibilité moindre à la cristallographie du matériau. On peut alors observer des stries de fatigue sur la surface de rupture (Figure IV.7 (a)) qui sont typiques d'une propagation par fatigue. Ces stries correspondent aux émoussissements successifs à l'extrémité de la fissure qui se produisent lors des phases d'ouvertures de

la fissure (Figure IV.7 (a)). Ces stries sont également observées dans des matériaux ductiles non-cristallins, tels que des plastiques.

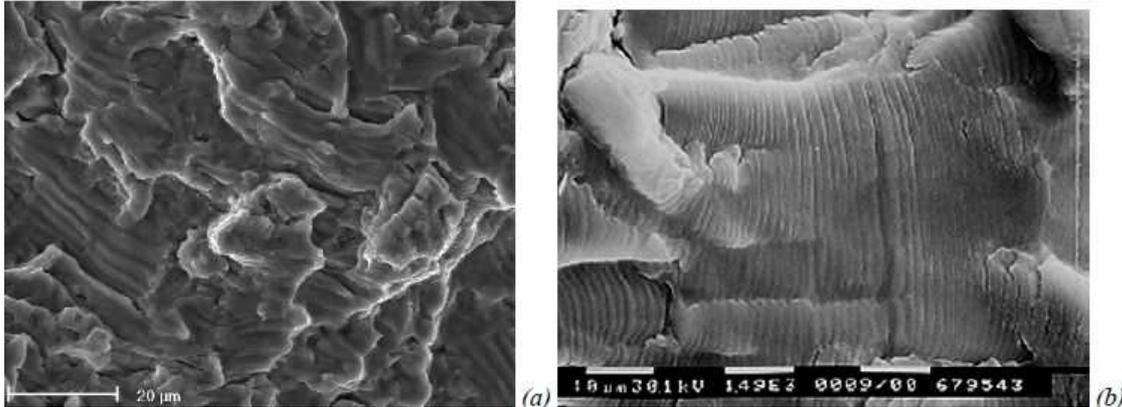


Figure IV.7 : (a) *Stries de fatigue dans l'alliage de Titane TA6V ($K_{max}=40$ MPa(m1/2), 20°C), (b) *Stries de fatigue dans un alliage d'aluminium [15].**

IV.8. MECANISMES ET MODELES DE FISSURATION :

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

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

- Les paramètres intrinsèques qui dépendent du matériau lui-même. Module de Young, limite d'élasticité, propriétés cycliques et état métallurgique du matériau.
- Les paramètres extrinsèques qui dépendent des conditions de l'essai, quel que soit le matériau étudié, température, environnement, dimension de l'éprouvette, rapport de charge R, etc.

IV.9. CONTRAINTES APPLIQUES :

En service ou au cours d'essai de laboratoire, les efforts appliqués peuvent être des sollicitations de type simples, par exemple de traction-compression, de flexion ou de torsion, ou résulter d'une combinaison de ces sollicitations.

Généralement, au cours d'essais de fatigue, la contrainte appliquée variera suivant une fonction du temps approximativement sinusoïdale, ceci en raison des seules possibilités de fonctionnement des machines ou pour des raisons de commodité dans le traitement des résultats d'essai.

IV.9.1. Contrainte nominale :

La contrainte prise en charge au cours de l'essai de fatigue est une contrainte nominale.

Elle est calculée par rapport à la section nette de la pièce ou de l'éprouvette considérée, à l'aide de formules usuelles de la résistance des matériaux et relative au domaine élastique.

Elle ne fait pas intervenir la concentration de contrainte due à des entailles, ou à d'autres causes.

La contrainte calculée est exprimée en newton par millimètre carré (N/mm^2) ou en pascal ($1MPa = 1 N/mm^2$).

IV.9.2. Cycle de contrainte et types de sollicitations :

Il y a cycle de contrainte quand une contrainte d'amplitude variable dans le temps se répète périodiquement. Le plus utilisé est les cycles sinusoidaux. Les contraintes sinusoidales sont les seules que nous concéderons dans ce paragraphe on peut considérer que tout se passe comme si l'on avait affaire à deux contraintes superposées :

- L'une constante, que l'on appelle contrainte moyenne notée σ_m considérée comme statique et peuvent prendre des valeurs négatifs, positifs, ou nulles.
- L'autre purement alternée σ_a considérée comme dynamique.
 - La contrainte moyenne : $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$
 - L'amplitude de contrainte (contrainte alternée) : $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$
 - Le rapport de charge défini par : $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}}$ constitue un paramètre caractéristique du chargement couramment utilisé.
 - L'étendue de variation de la contrainte : $2\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

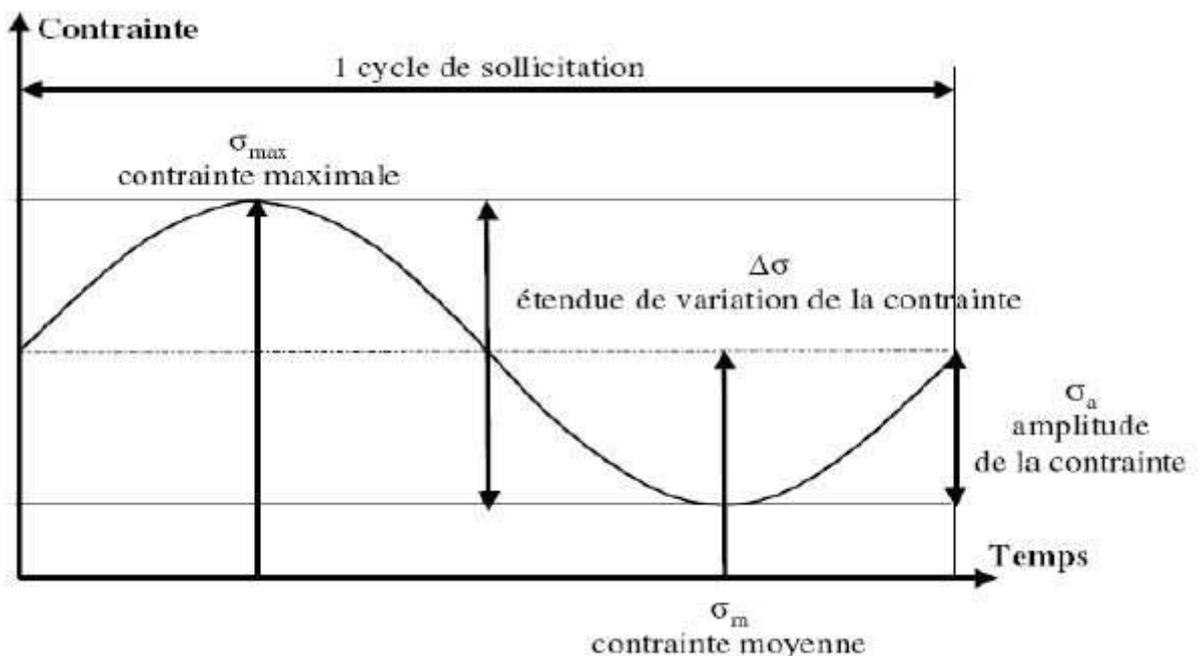


Figure IV.8 : Cycle de contrainte de la fatigue.

On distingue alors les sollicitations suivantes présentées sur la figure ci-dessous (Figure IV.9) :

- $R = -1$: contraintes alternées symétriques
- $-1 < R < 0$: contraintes alternées asymétriques
- $R = 0$: contraintes répétées ($\sigma_m = \sigma_a$) ;
- $R > 0$: contraintes ondulées.

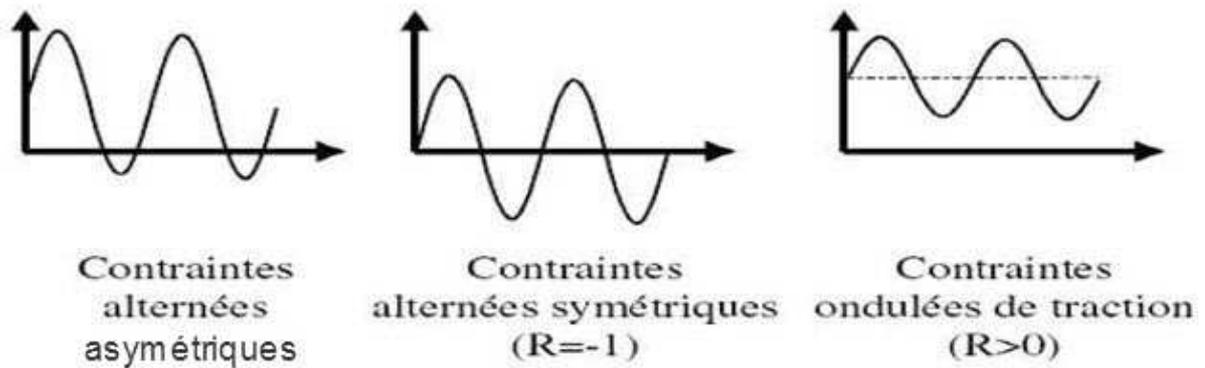


Figure IV.9 : Différents types de sollicitations

IV.9.3. Limite de fatigue :

Pour une contrainte moyenne σ_m donnée la limite de fatigue est la plus grande amplitude de contrainte pour la quelle il n'existe pas constaté de rupture après un nombre infini de sollicitation (figure IV.10). La limite de fatigue se notée σ_D lorsque la contrainte moyenne σ_m est nulle (limite de fatigue purement alternée) et σ_d lorsque σ_m est différent de Zéro (limite de fatigue alternée, répétée ou ondulée).

Dans dernier cas la valeur de σ_m doit impérativement être associer à celle de σ_a , dans le cas particulier des aciers, on a expérimentalement constaté que ce nombre infini peut être ramené à 10^7 cycles. En revanche pour les aciers en de présence de corrosion et pour certains alliages d'aluminium, de cuivre ou de titane rien constaté de semblable.

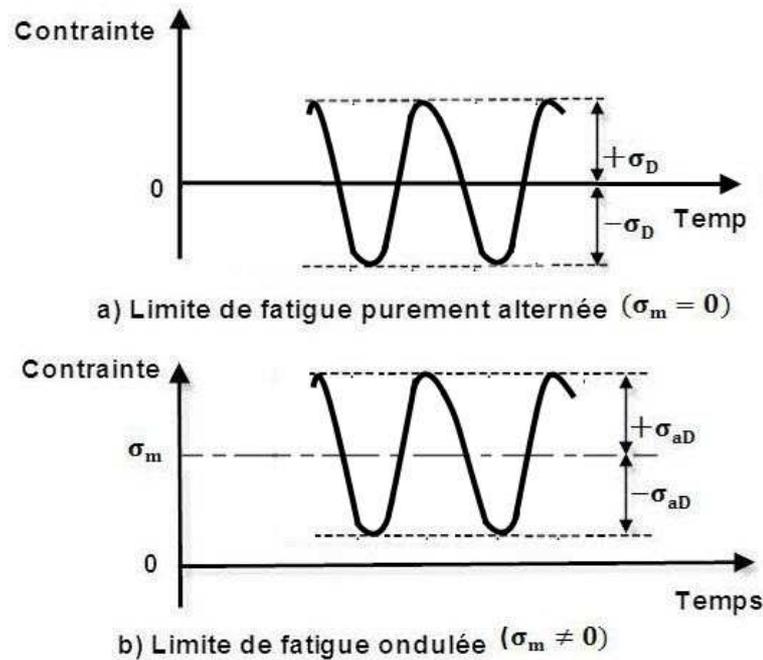


Figure IV.10 : Définition de la limite de fatigue

IV.10. EVOLUTION PHYSIQUE ET STRUCTURALE :

IV.10.1. Evolution physique :

De nombreuses études sur la variation des propriétés physiques des métaux en cours de fatigue ont été faites: résistance électrique, perméabilité électrique, hystérésis mécanique, capacité d'amortissement, module d'élasticité, température, coefficient de dilatation, etc.

Pratiquement, comme ne il s'agit de mesure globale intéressant toute l'éprouvette, les résultats sont comparables.

IV.10.1.1. Influence du niveau de contrainte :

La figure IV.11 montre l'évolution de la résistance électrique et de la température d'une éprouvette d'acier extra doux, essayée sous charge croissante. Au-dessus d'une certaine contrainte, qui correspond à la limite de fatigue de la courbe de Wöhler, il y a variation rapide des deux paramètres, qui se poursuit jusqu'à rupture de l'éprouvette.

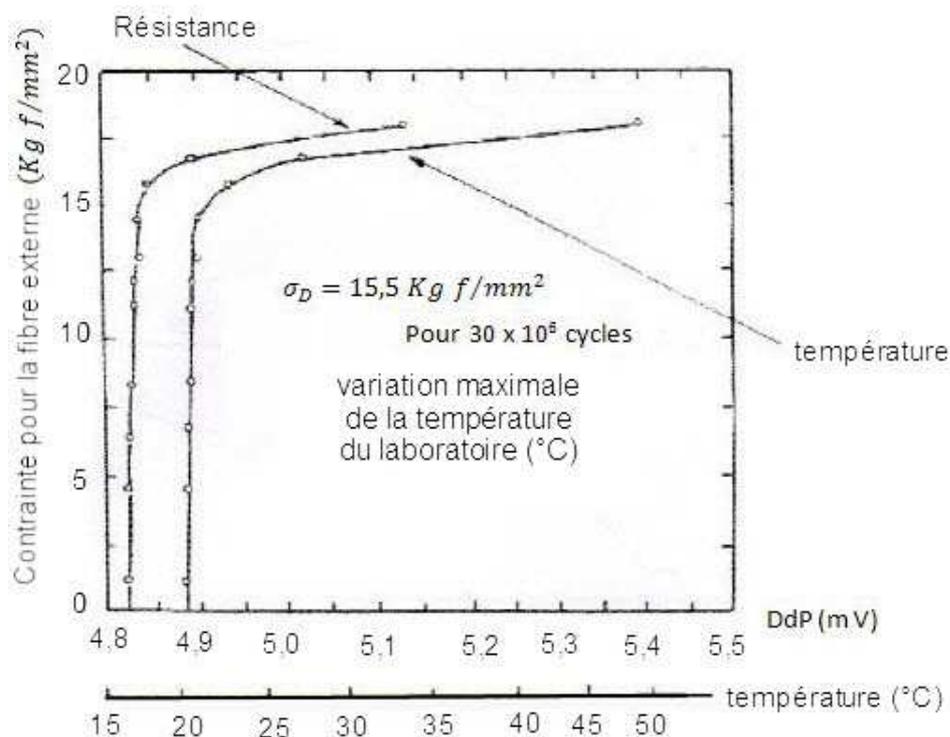


Figure IV.11 : Variation de la résistance électrique et la température d'une éprouvette, mesurées au cours d'un essai de flexion relative, sous charge croissante, d'un acier doux [16].

IV.10.1.2. Influence du nombre de cycles :

La figure IV.12 montre l'évolution de la résistance électrique et couple de torsion d'une éprouvette essayée en torsion alternée, à une contrainte supérieure à la limite de fatigue. Ces deux propriétés varient très rapidement au début de l'essai; elles passent ensuite par une phase stationnaire, puis elles évoluent à nouveau très rapidement jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

De façon plus générale, selon la propriété physique que l'on mesure, la phase intermédiaire peut être stationnaire, ou évolutive, et ceci dans un sens ou dans l'autre. De plus, lorsque la contrainte augmente, l'étendue de cette phase diminue et elle tend à n'être qu'une simple transition entre les deux stades extrêmes.

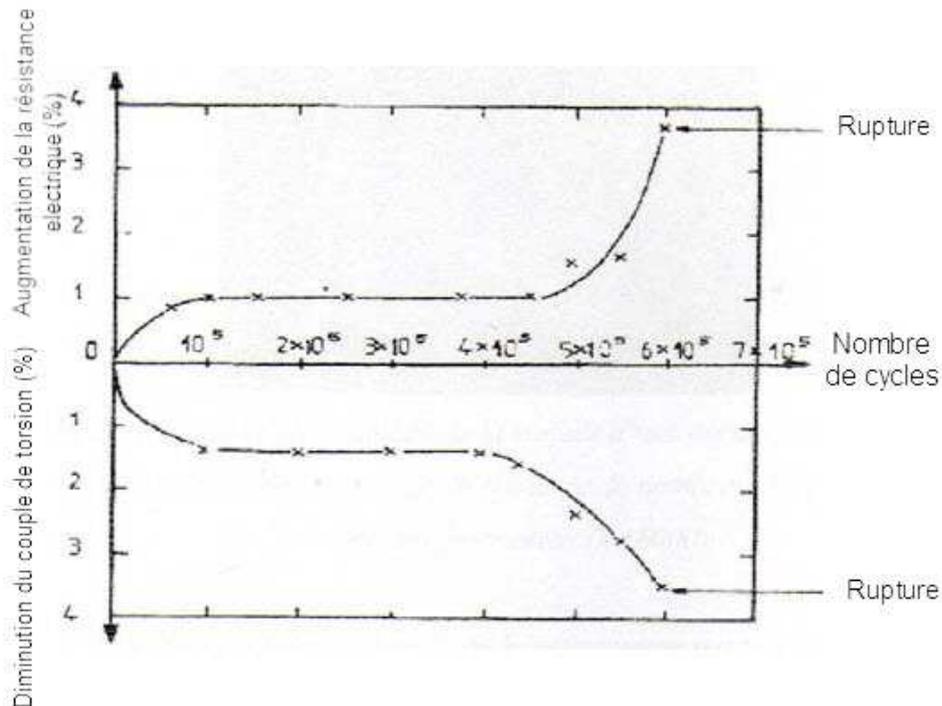


Figure IV.12 : Variation de la résistance électrique de l'éprouvette du couple de torsion exercé sur une éprouvette entaillée au cours d'un essai de fatigue en torsion alternée [16].

IV.10.2. Evolution structurale :

Les possibilités de la microscopie électronique ont permis de faire des progrès considérables dans la connaissance des phénomènes liés à la fatigue des métaux. Ce fut d'abord la possibilité d'observer, par microfractographie électronique, sur réplique, les surfaces de rupture. Puis, l'examen au microscope électronique par transmission de lames minces a permis de suivre l'arrangement des dislocations dans le métal. Enfin, l'apparition du microscope électronique à balayage, a offert de nouvelles facilités pour l'étude directe des surfaces, en particulier grâce à ses possibilités de grossissement continu et sa profondeur de champ.

IV.10.2.1. Modifications superficielles en cours de fatigue :

Dès les premiers cycles de déformation, on observe au microscope optique la formation superficielles de bandes de glissement (figure IV.13). Cet aspect est assez général, quelque soit le métal, et ne se distingue guère de celui d'une déformation unidirectionnelle à son début.



Figure IV.13 : *Défaut de la paroi externe d'une canalisation métallique*

Les différences apparaissent si on poursuit la déformation par fatigue: on observe bien une certaine multiplication des bandes de glissement mais surtout leur renforcement et l'application de bandes persistantes, c'est-à-dire qui ne disparaissent pas par simple polissage ou par recuit.

Ces bandes persistantes sont caractéristiques de la fatigue et leur rôle est essentiel dans l'endommagement des métaux. En effet, au début de la déformation, les bandes de glissement qui sont apparues peuvent être limitées par polissage électrolytique ou par recuit pour augmenter la durée de vie de l'éprouvette par rapport à celle d'une éprouvette non traitée. Par contre, lorsque les bandes persistent après polissage ou recuit, il n'est plus possible d'augmenter ainsi la durée de vie de l'éprouvette (endommagement irréversible).

En pratique, toutes les pièces soumises à la fatigue contiennent des défauts, irrégularités de surface ou inclusion, qui provoquent des concentrations locales de contraintes, conduisant à la formation de micro fissures. Le microrelief laissé par l'usinage des pièces, donne initialement des perturbations de la surface. La présence d'inclusions sous-cutanées, conduit à une concentration de contrainte locale très élevée qui peut amener la rupture rapide de la couche de métal entre l'inclusion et la surface formant une microfissure particulièrement dangereuse.

IV.10.2.2. Modification interne :

Si on observe en microscopie électronique par transmission, des lames minces prélevées dans des échantillons soumis à des sollicitations périodiques, on constate dès les premiers cycles une modification de la disposition des dislocations. On voit se former des amas de dislocations, constitués de dipôles et de multi pôles de dislocations, comme cela se produit par déformation unidirectionnelle.

Pour des contraintes maximales peu élevées, on observe une disposition planaire de dislocations-coins alignées dans les plans de glissement. Si l'amplitude de la contrainte reste faible, de l'ordre de la limite d'endurance, cette disposition n'évolue pratiquement plus au cours des cycles ultérieurs - si ce n'est par la formation de boucles. Cette répartition assez homogène des dislocations dans le métal ne peut pas conduire, sinon

très exceptionnellement, à la formation de microfissures.

Pour des contraintes plus élevées, il y a multiplication des dislocations au cours des premières dizaines de cycles. Simultanément, il y a rassemblement des dislocations en parois, formant des cellules plus ou moins bien dessinées.

Si l'on poursuit la déformation cyclique, les mouvements de va-et-vient conduisent à la formation de fragments de dislocation (petites boucles prismatiques, dipôles, etc.), qui se rassemblent dans les parois des cellules.

Pour les contraintes plus élevées, il y a formation de véritables cellules, beaucoup plus régulières que celles que l'on peut obtenir par déformation unidirectionnelle. Leur dimension décroît lorsque la contrainte augmente.

IV.10.2.3. Propagation des fissures :

Certaines pièces ou structures présentent des défauts plans à l'état brut de fabrication ou des fissures amorcées en service à partir de défaut ou de zone de concentration de contrainte (figure IV.14).

La détermination de la durée de vie de tels éléments passe par la connaissance de la vitesse de propagation de la fissure en fonction des conditions de chargement.

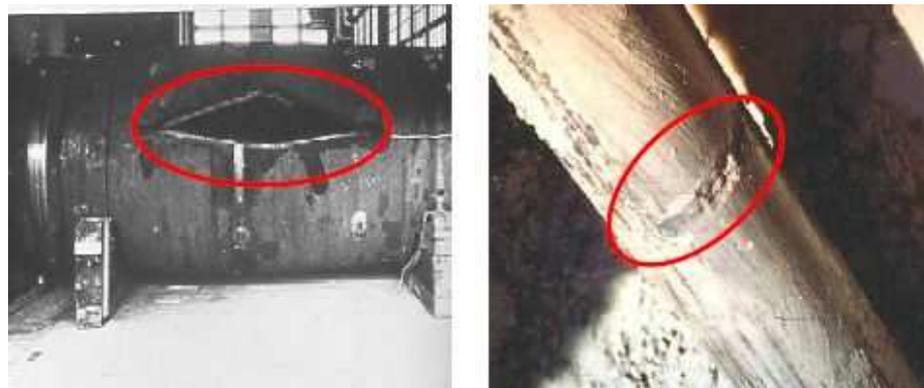


Figure IV.14 : Exemple de réservoirs sous pression contenant une fissure axiale et circonférentielle

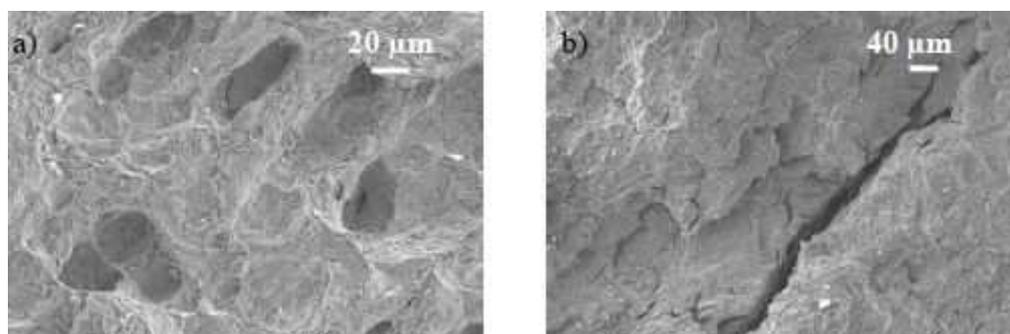


Figure IV.15 : Détail du faciès de rupture d'une éprouvette d'acier de type X65. [9]
a) zone ductile b) fissure interne.

La propagation d'une fissure en fatigue apparaît lorsque la variation ΔK au cours d'un cycle de chargement est supérieure au seuil de propagation ΔK_s . Cette propagation est limitée par la rupture brutale de la pièce lorsque le facteur d'intensité de contrainte atteint une valeur supérieure à K_c au cours d'un cycle (fig IV.16.) entre ces deux extrêmes il existe un domaine de propagation qui peut s'exprimer par une relation linéaire entre le logarithme de la vitesse de propagation et le logarithme de l'amplitude de la variation du facteur d'intensité de contrainte.

Dans les cas habituels, la fissure progresse avec un taux de croissance par cycle da/dN qui augmente avec la longueur de la fissure. Si la fissure initiale est non compatible avec le chargement appliqué, un certain nombre de cycles sont nécessaires pour initier la propagation et lorsque la longueur de fissure associée à l'effort remplit les conditions d'instabilité, il y a rupture brutale.

Nous nous limitons au cas de la propagation d'une fissure plane, étant donné que le bloc-fissure a été construit sur la base d'un défaut plan semi-elliptique. La modélisation de la propagation en 3D est basée sur l'utilisation de la loi de Paris (Paris et al.(1963)) en chaque nœud du front de fissure dans le plan normal au front. On décrit ainsi l'avancement de chaque point du front de fissure en considérant seul l'effet du mode I prépondérant :

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

Dans cette formule, « a » représente la profondeur de la fissure, « N » le nombre de cycles, et $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ la variation du facteur d'intensité de contrainte au cours d'un cycle de chargement, « C » et « m » sont des grandeurs caractéristiques du matériau.

Le taux de croissance d'une fissure peut être déterminé par une loi de propagation qui est basée essentiellement sur le facteur d'intensité des contraintes de la fissure. Paris et al. (1961) ont défini une loi macroscopique de propagation de fissure qui donne une relation entre le taux de croissance de fissure et la variation du facteur d'intensité des contraintes ΔK . Au cours des années, cette loi a beaucoup évolué pour prendre en compte l'effet de différents Paramètres sur le taux de croissance des fissures (figure IV.16). Il existe bien d'autres lois similaires, mais la simplicité et la forme générale conduit les chercheurs à utiliser le plus fréquemment pour leurs calculs la loi de paris proprement dite, après en avoir mesuré expérimentalement les paramètres de fissuration C et m .

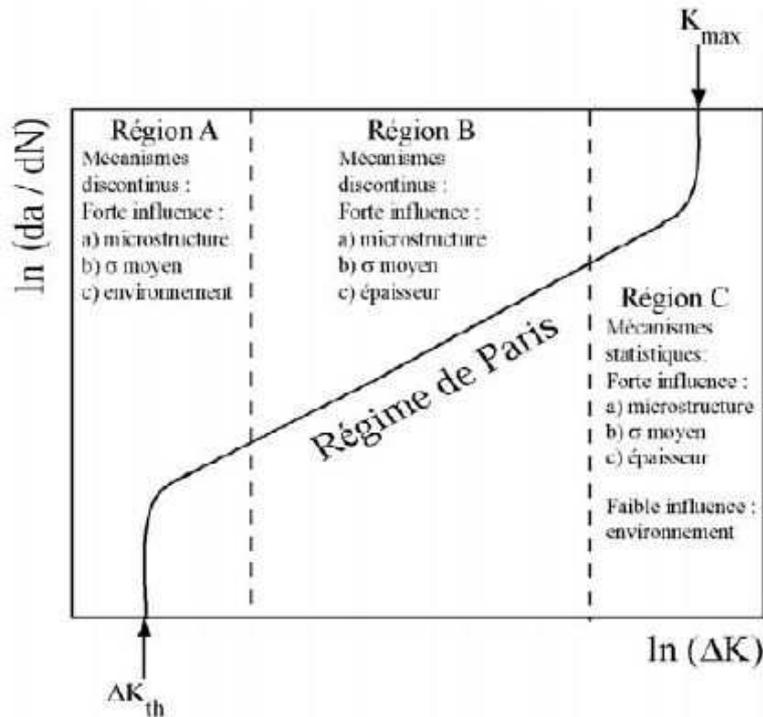


Figure. IV.16 : Représentation générale de l'évolution du taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes : $da/dN = f(\Delta K)$. (Bathias et Bailon 1981) [11].

- La présence de la zone de plasticité confinée crée un état de compression de chaque côté de la fissure ce qui tend à refermer la fissure. Cette fermeture peut ralentir la propagation de la fissure ;
- Lors de l'essai de fissuration par fatigue, la fissure peut rester partiellement fermée sur une portion du chargement cyclique. Ainsi l'amplitude de contrainte réellement subie par la fissure dépend de la portion du chargement sur laquelle la fissure reste ouverte. On introduit donc la notion de variation effective du facteur d'intensité des contraintes et on réécrit la loi de Paris en fonction de celle-ci.

IV.10.2.3.1. Méthode de mesure de la vitesse de propagation d'une fissure en fatigue :

La mesure de la vitesse de propagation d'une fissure est réalisée sur une éprouvette classique de mécanique de la rupture, pré fissuré en fatigue. La longueur de la fissure est mesurée optiquement ou par une autre méthode en fonction de nombre de cycles. Ces données font ensuite l'objet d'une analyse numérique pour déterminer la vitesse de propagation exprimée en fonction de nombre de cycles $\frac{da}{dN}$, pour chaque longueur de fissure pour la quelle la vitesse de propagation a été calculée, on calcule l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte ΔK le principe de cette mesure est indiqué sur la (figure IV.17).

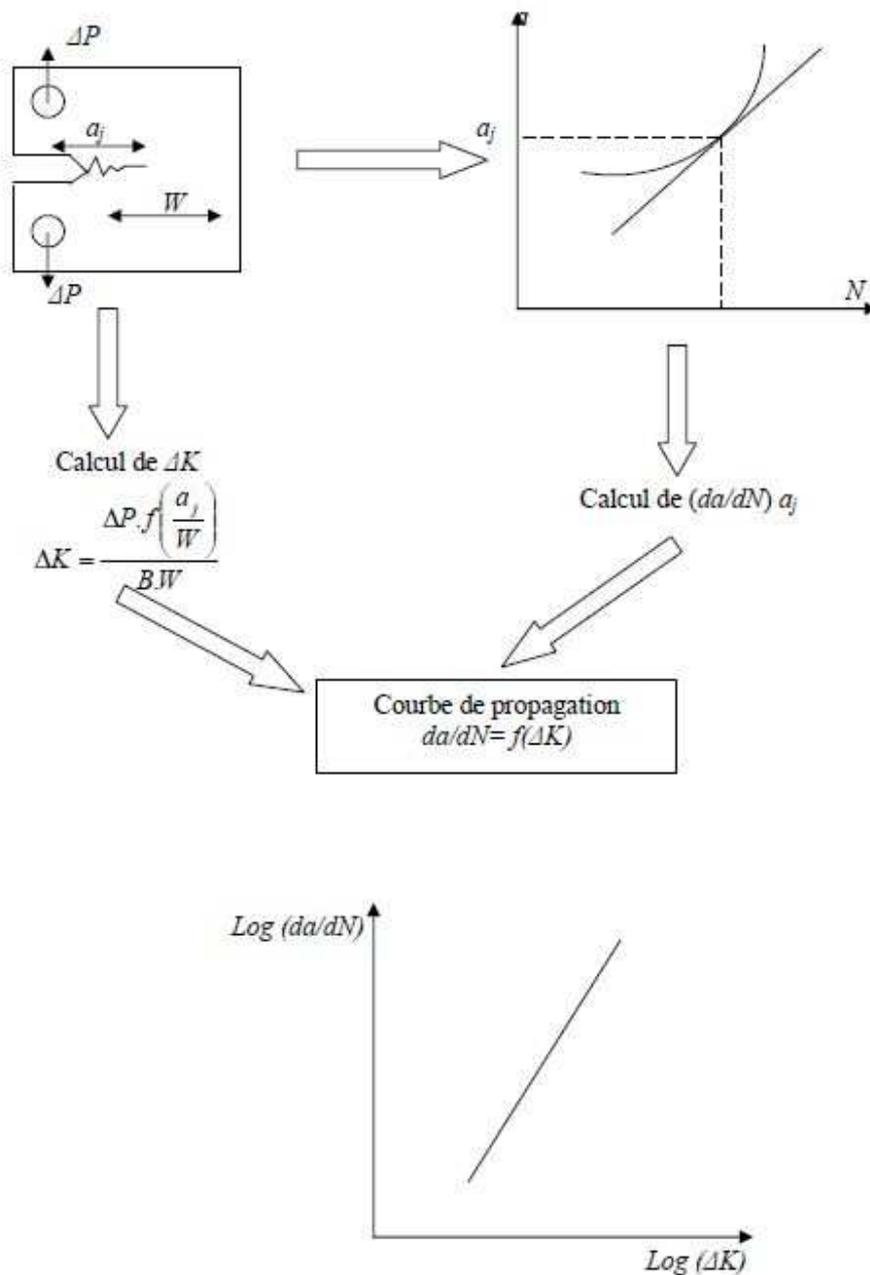


Figure IV.17 : Principe de la détermination de la vitesse de propagation d'une fissure en fatigue

IV.10.2.3.2. Principe du calcul de la durée de vie :

La durée de vie d'une pièce ou d'une structure peut être estimée en calculant le nombre de cycles d'amorçage d'une fissure et le nombre de cycles de propagation jusqu'à rupture.

Sur une éprouvette lisse ou sur une pièce ne présentant pas d'entaille ou de défaut préexistant, la phase d'amorçage représente 80% à 90% de la durée de vie pour le domaine d'endurance (grand nombre de cycles) et 10 à 20% de la durée de vie pour la fatigue oligocyclique (fig IV.18) dans la pièce où les structures présentent une entaille aiguë ou un défaut, la phase d'amorçage est réduite, en particulier les structures soudées,

on a habitude de considérer que la phase d'amorçage est négligeable et le calcul de la durée de vie se fait en propagation. D'une manière plus générale bien souvent les calculs en fatigue par la mécanique de la rupture sont effectués uniquement en propagation, cette pratique va dans le sens de la sécurité.

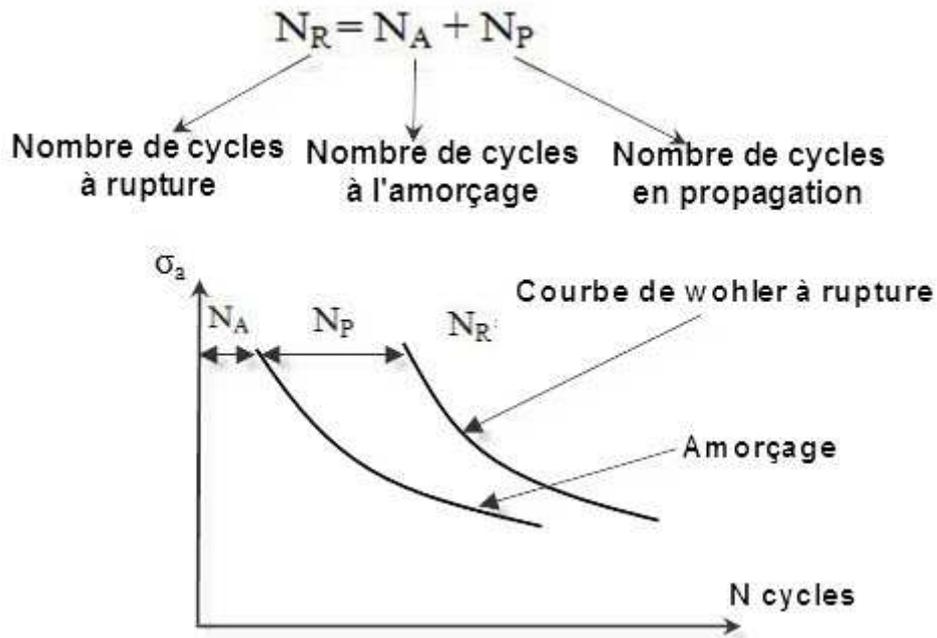


Figure IV.18 : Contribution de l'amorçage et de la propagation de fissure

IV.11. COURBES DE PROPAGATION DES FISSURES POUR LES MATERIAUX PIPELINES:

La courbe représenté la vitesse de fissuration de l'acier X42 et X70 utilisé pour les pipelines sous environnement (Hydrogène et azote) à $R=0,1$. La vitesse de fissuration pour l'acier X42 est supérieure à celle du X70. La présence de l'hydrogène présente un endommagement important comparativement par rapport à l'azote.

La propagation examiné dans le même gaz (soit H_2 ou N_2), pour X42 plus élevé que l'acier X70, a cause de composition chimique et les caractéristique mécanique de chaque matériau (X70 plus résiste que X42) (Figure IV.19).

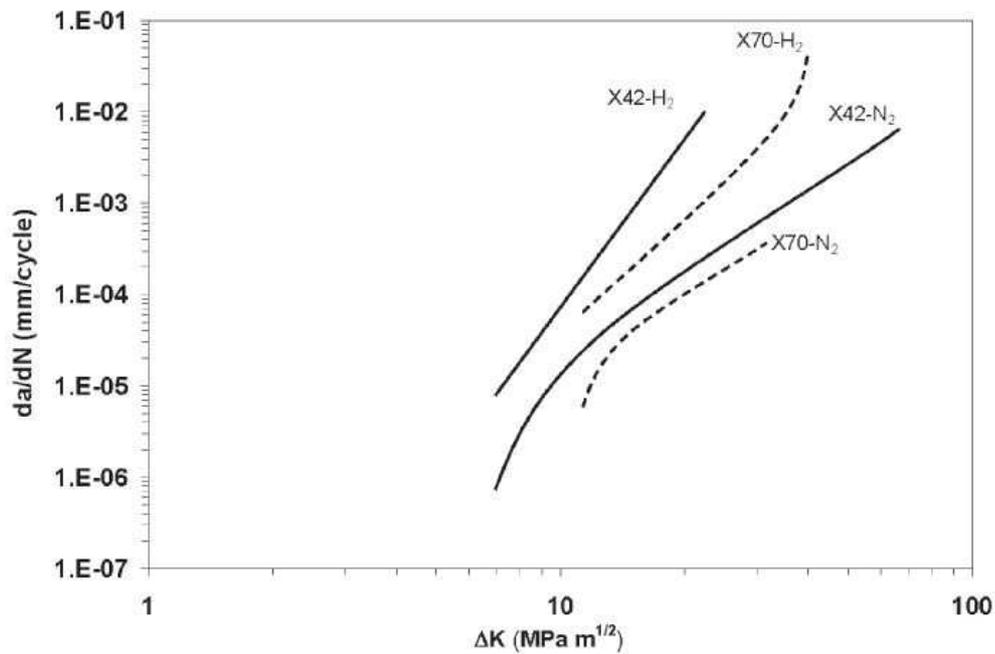


Figure IV.19 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X42, et X70 (résultats avec 6,9 hydrogen et l'azote, $f = 1 Hz$ et $R = 0.1$) [17]

Les essais de fissuration par fatigue sous l'acier X52 montrent que sous un environnement de l'acide (APB). La vitesse est important comparativement par rapport aux essais effectués à l'environnement éthanol-carburant (SFGE) et l'air (Figure IV.20).

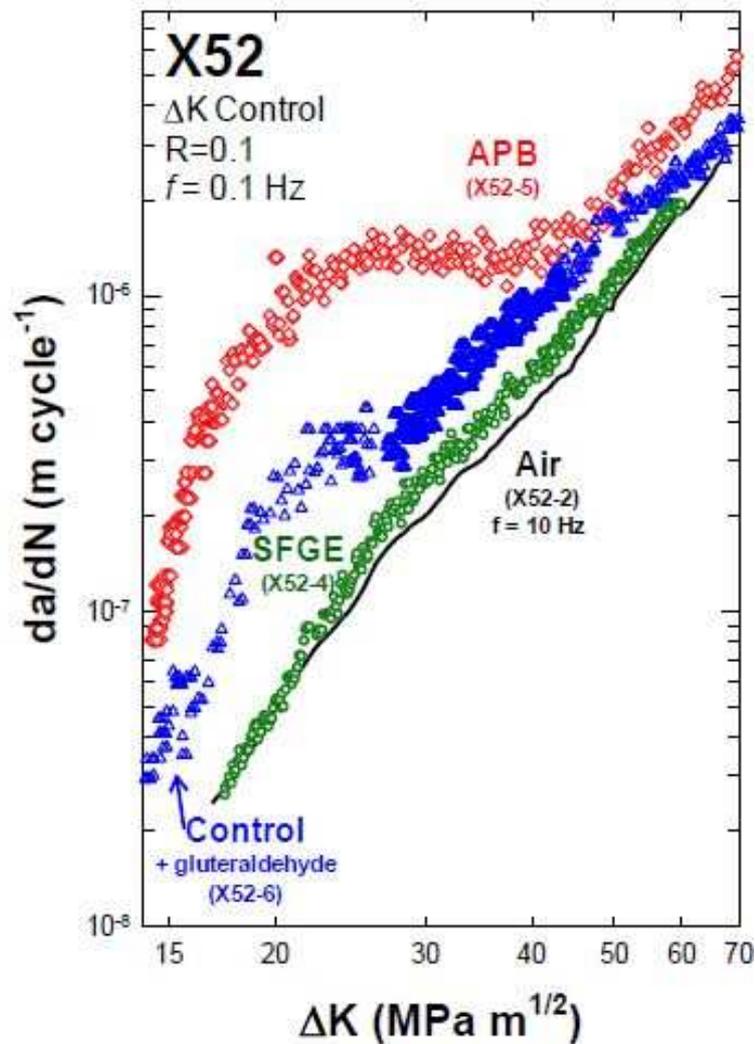


Figure IV.20 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X52 (APB : Acid producing bacteria, SFGE : Simulated fuel grade ethanol) [18]

La figure IV.21 montre la vitesse de fissuration de l'acier X70 dans les mêmes environnements précédent de X52 (l'acide (APB), éthanol-carburant et l'air) à $R=0,1$. La présence de l'acide présente un endommagement important comparativement par rapport à l'éthanol-carburant et l'air (Figure IV.21).

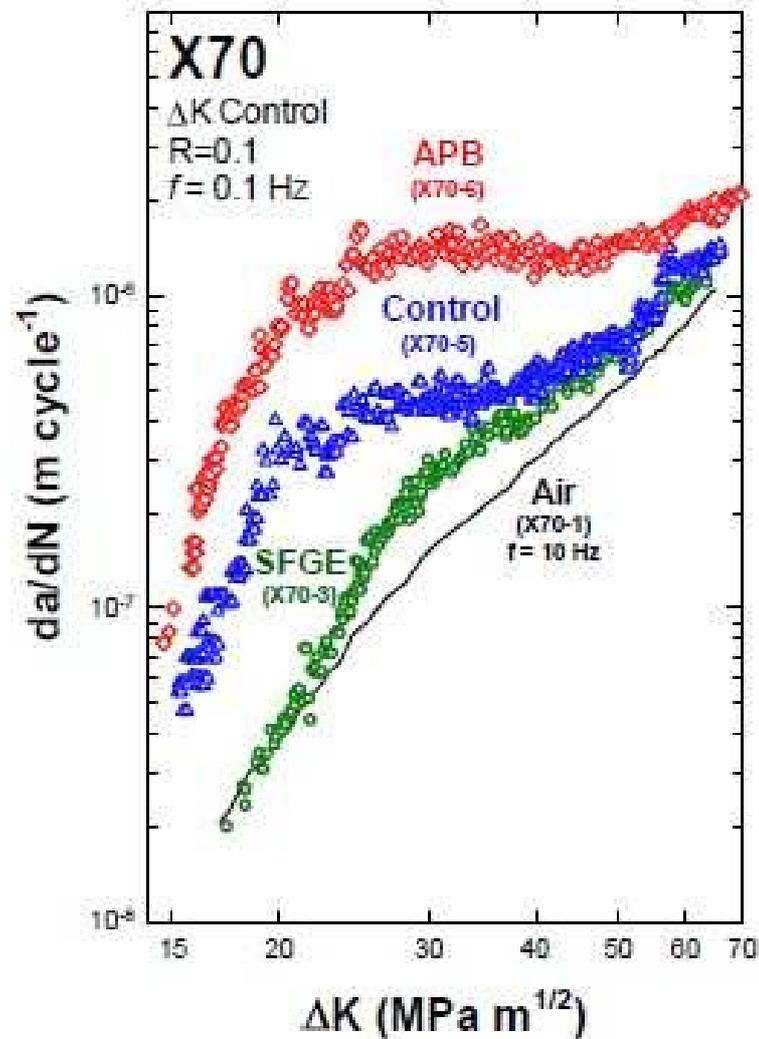


Figure IV.21 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X70 (APB : Acid producing bacteria, SFGE : Simulated fuel grade ethanol) [18]

La figure IV.22 montre l'évolution de la vitesse de fissuration pour l'acier X60 utilisé pour les pipelines. La présence de l'hydrogène diminue la résistance à la propagation sur des échantillons pris dans le métal de basse, la zone affectée thermiquement et la zone de fusion comparativement par rapport aux échantillons testés à l'air.

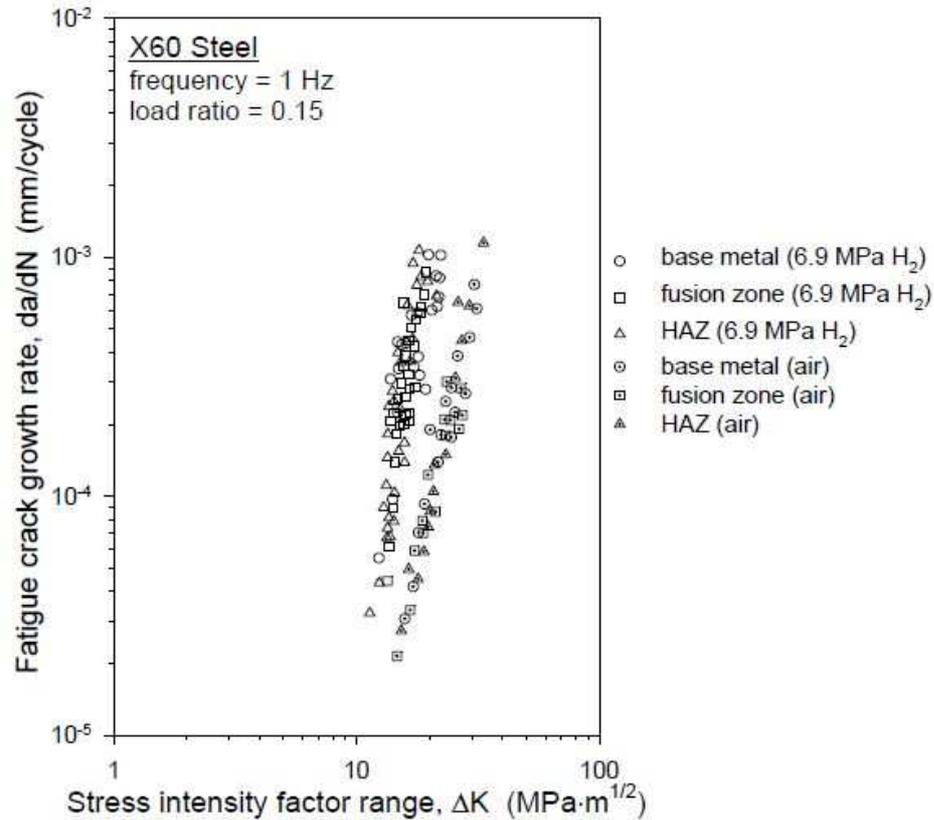


Figure IV.22 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour l'acier X60 [19]

La figure IV.23 montre la vitesse de propagation de fissure de l'acier X65 en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes suivant le sens Transversale-Longitudinale (T-L) et Transversale-Epaisseur (T-S) ou les modèles de propagations ont été déterminé selon la loi de Paris. Le résultat montre que le sens T-S présente une bonne résistance par rapport au sens T-L.

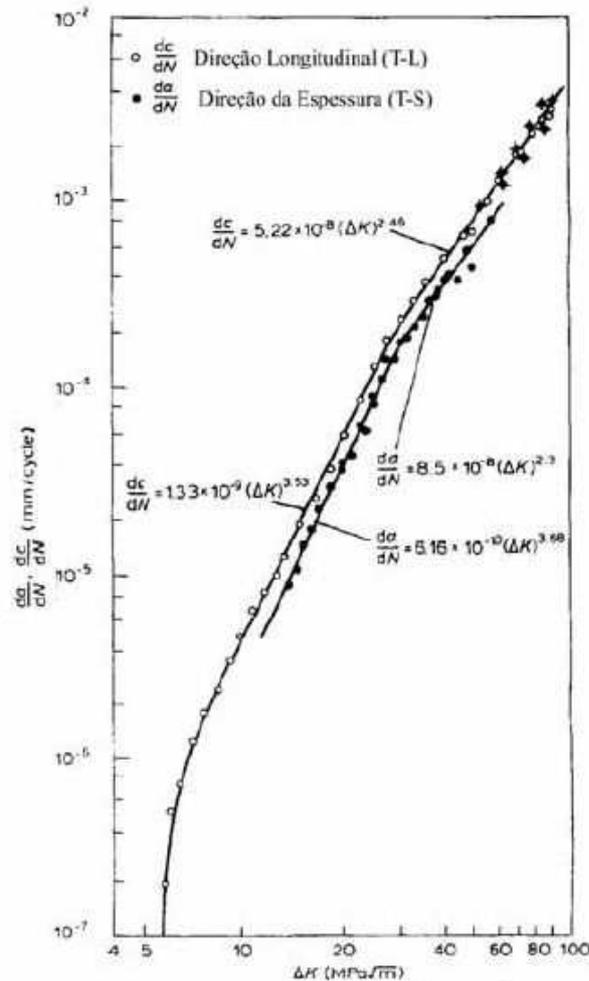


Figure IV.23 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X65 (Sens T-L et T-S) [20]

La Figure IV.24 montre l'acier X80 pour les pipelines. La présence de l'hydrogène diminue la résistance à la propagation, et l'augmentation de R diminue la résistance à la propagation.

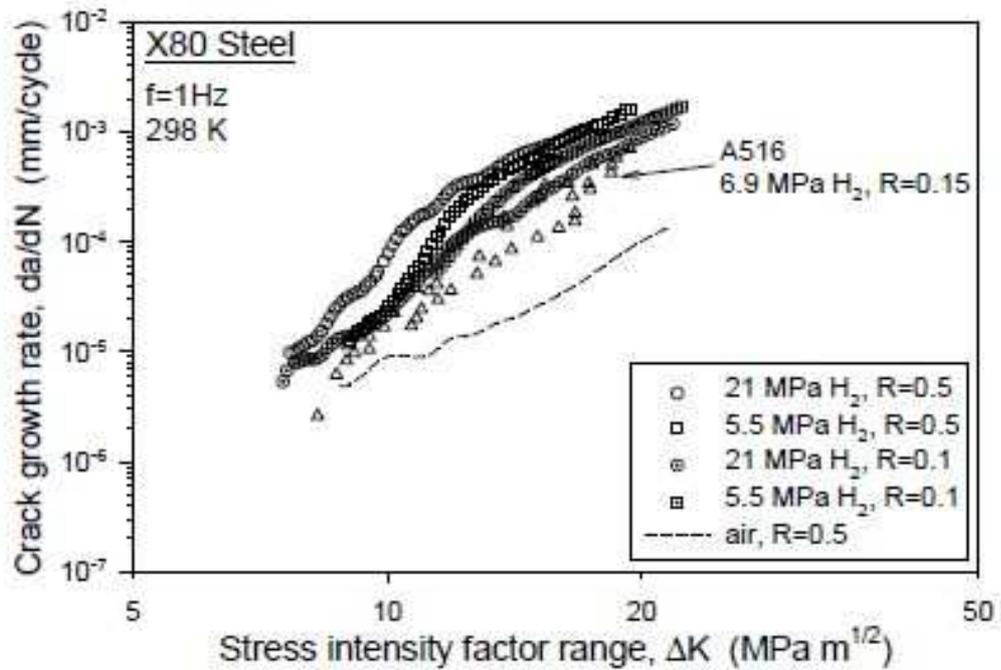


Figure IV.24 : Taux de croissance de fissure en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes pour L'acier X80 et A516 [19]

Chapitre V :
**PREDICTION DU COMPORTEMENT
EN FATIGUE**

V.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous présentons tous les aspects de la simulation du comportement en fatigue de deux nuance des aciers API 5L X70 et API 5L X65 par le code AFGROW [21] où les effets des paramètres de chargement sont étudiés.

V.2. PRESENTATION DU CODE :

AFGROW est un code de calcul permettant d'étudier la propagation des fissures de fatigue et la prévision de la durée de vie développé par HARTER au profit de la NASA. La version de code AFGROW qu'on utilisera travaille sous une interface sous Windows XP.

Le code possède deux interfaces principales l'interface « modèle géométrique » (Figure V.1) et l'interface « matériaux » (Figure V.2), De plus, il permet par des interfaces intermédiaires ou auxiliaires, d'introduire les spectres de chargement (figure V.3), les modèles d'amplitude et plusieurs d'autre fonction comme la fonction « Repair Menu ».

Il offre la possibilité d'introduire des matériaux différents et avec des résultats expérimentaux. L'introduction des modèles géométriques nouveaux nécessite l'élaboration des interfaces sous Microsoft Visual Basic. Les résultats sont sous forme graphique et données numérique de l'évolution de longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle $a=f(N)$ et de la vitesse de propagation $da/dN=f(\Delta K)$.

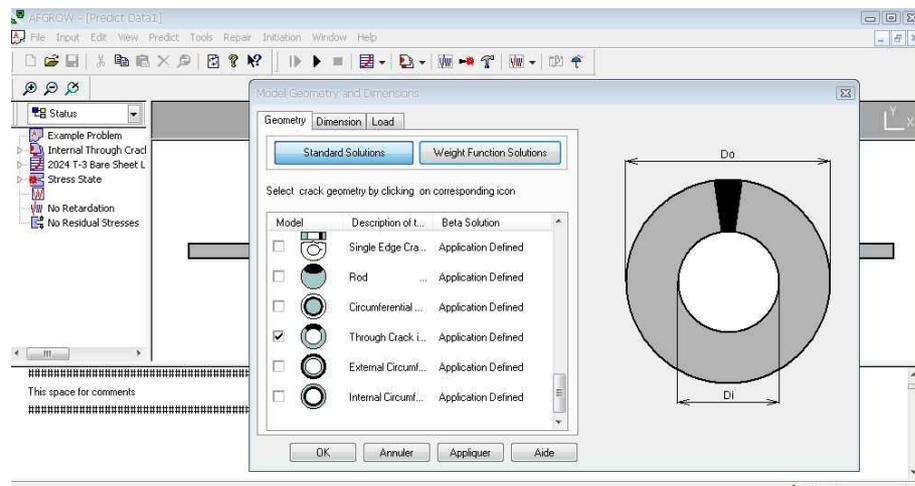


Figure V.1 : Interface géométrie

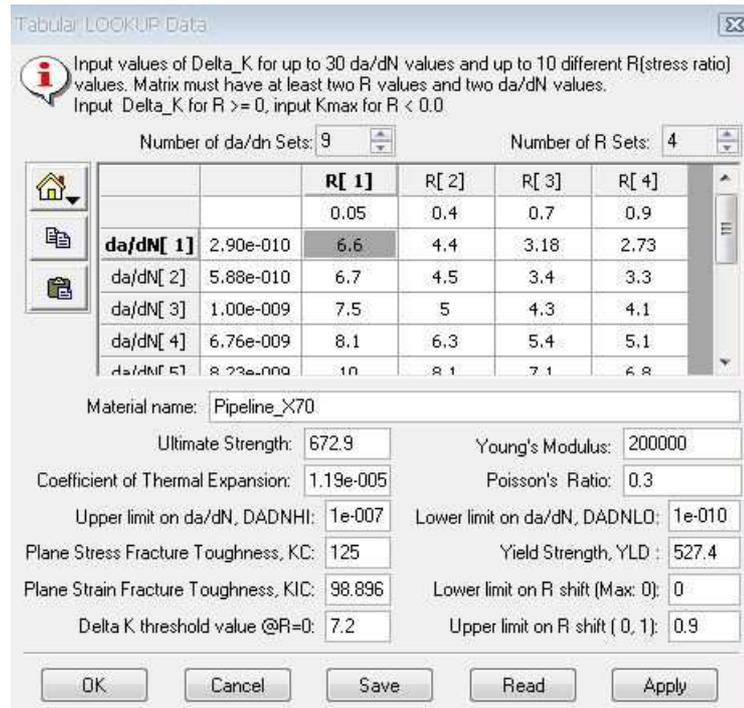


Figure V.2 : Interface matériau

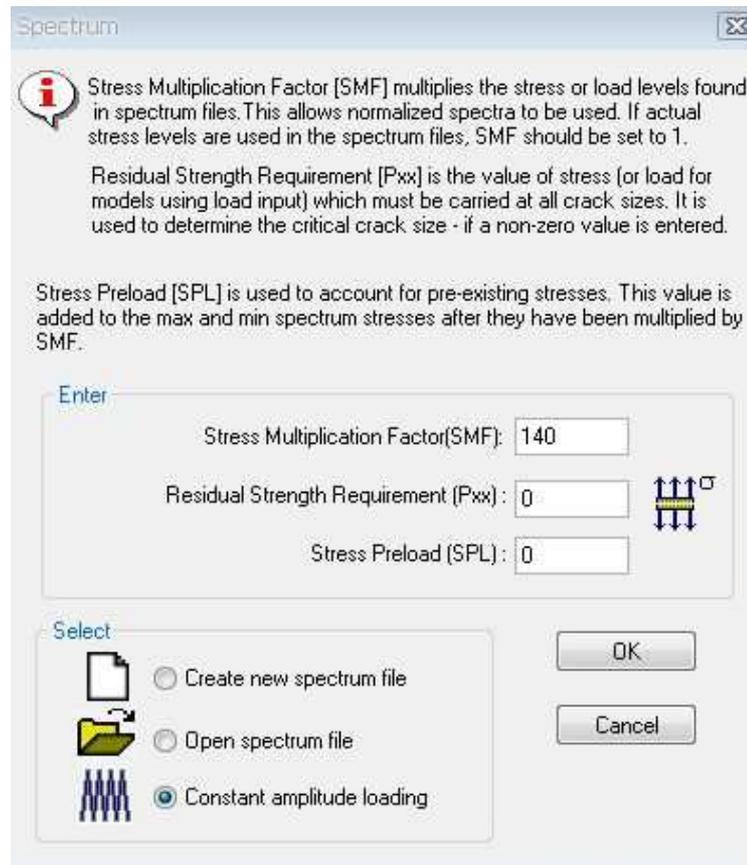


Figure V.3 : Interface chargement

V.2.1 Modèle de Harter :

La méthode de Harter (Harter T-méthode [22]) a été développée en 1983. Elle consiste à faire des interpolations des données des vitesses de fissuration en utilisant des données introduites sous forme de tableau (tabular crack growth rate).

Cette méthode utilise le modèle de propagation de Walker permettant de déterminer la variation de la vitesse da/dN en fonction du rapport de charge R .

$$\frac{da}{dN} = C[\Delta K(1 - R)^{(m-1)}]^n ; \text{Equation de Walker} \quad (\text{V.1})$$

À un da/dN donné, le rapport réduit à :

$$\Delta K = \Delta K_{R=0}(1 - R)^{(1-m)} ; \text{pour } R \geq 0 \quad (\text{V.2})$$

$$K_{max} = \Delta K_{R=0}(1 - R)^{(m-1)} ; \text{pour } R < 0 \quad (\text{V.3})$$

K_{max} est employé au lieu du ΔK quand $R < 0$. Il est important que la tendance appropriée dans le décalage de R soit maintenue. Cette tendance est qu'à mesure que m augmente, le décalage de R diminue. Cette méthode est simplement une manière aux données interpoler/extrapoler dans la balance de notation en employant la forme exponentielle. Cette méthode a donné des résultats très bons au cours des années.

La figure V.4 permet l'utilisation autant de données qu'est disponible (naturellement, plus de données sont meilleures) et une expérience est très utile quand les données sont limitées.

Voici comment cela fonctionne :

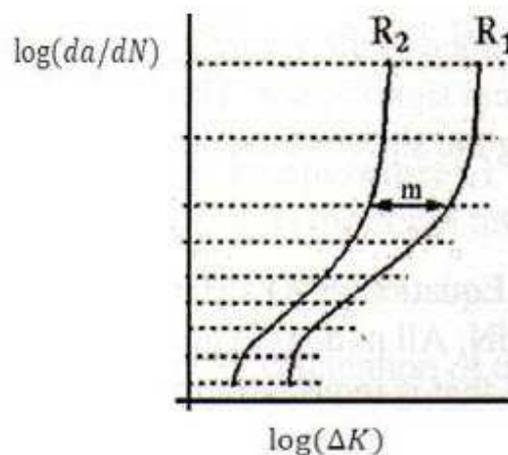


Figure V.4 : Taux de propagation de la fissure de T-méthode de Harter décalant en fonction de R .

En utilisant l'équation de Walker (voir ci-dessus) à un taux simple de propagation de la fissure pour deux valeurs positives de R, le rapport suivant est vu :

$$\Delta K_1 (1 - R_1)^{(m-1)} = \Delta K_2 (1 - R_2)^{(m-1)} \quad (\text{V.4})$$

Solution pour les valeurs de m :

$$m = 1 + \left[\log_{10} \left(\frac{\Delta K_1}{\Delta K_2} \right) / \log_{10} \left(\frac{(1 - R_2)}{(1 - R_1)} \right) \right] ; \text{ pour } R_1 \text{ et } R_2 \geq 0 \quad (\text{V.5})$$

Pour les raisons indiquées ci-dessus, la méthode pour manipuler des rapports négatifs d'effort implique simplement d'employer K_{\max} au lieu ΔK et de commuter l'exposant pour le R négatif comme suit :

$$K_{\max 1} (1 - R_1)^{(1-m)} = \Delta K_2 (1 - R_2)^{(m-1)} \quad (\text{V.6})$$

Solution pour les valeurs de m :

$$m = 1 + \left[\log_{10} \left(\frac{K_{\max 1}}{\Delta K_2} \right) / \log_{10} ((1 - R_1)(1 - R_2)) \right] ; R_1 < 0 \text{ et } R_2 \geq 0 \quad (\text{V.7})$$

Pour deux valeurs négatives de R, le rapport devient

$$K_{\max 1} (1 - R_1)^{(1-m)} = K_{\max 2} (1 - R_2)^{(1-m)} \quad (\text{V.8})$$

Solution pour les valeurs de m :

$$m = 1 - \left[\log_{10} \left(\frac{K_{\max 1}}{K_{\max 2}} \right) / \log_{10} \left(\frac{(1 - R_2)}{(1 - R_1)} \right) \right] ; R_1 < 0 \text{ et } R_2 < 0 \quad (\text{V.9})$$

Il est important de savoir que la signification de la valeur du m. la valeur de m est non dimensionnelle et n'a aucune vraie signification physique. La valeur de m est simplement des moyens mathématiques de commander le décalage des données de taux de propagation de la fissure en fonction du rapport de charge (R).

V.2.2 Modèle Géométrique :

Le modèle géométrique d'études est un tube mince sous pression soumise à un chargement en flexion en mode 1.

Le facteur d'intensité de contrainte pour les fissures circonférentielles est exprimé par la relation suivant :

$$K_I = (F_t \sigma_t + F_b \sigma_b) \sqrt{\pi R_m \theta} \quad (\text{V.10})$$

Avec :

- F_t et F_b sont les facteurs géométriques correspondants à σ_t et σ_b qui représentent le facteur d'intensité de contraintes normalisée. Ils augmentent avec l'angle de la fissure et le rapport $\frac{R_{moy}}{e}$.
- σ_t et σ_b sont respectivement la contrainte de traction et de flexion, elles sont données par les deux formules suivantes :

$$\sigma_t = \frac{F}{2\pi R_{moy} e} \quad (V.11)$$

$$\sigma_b = \frac{M}{\pi R_{moy}^2 e} \quad (V.12)$$

Dont : R_{moy} : est le rayon moyen du tube

e : est l'épaisseur du tube

F et M sont respectivement la force de traction et le moment fléchissant

F est donné par la formule suivant :

$$F = \pi \left(R_{moy} - \frac{e}{2} \right) \cdot P_i \quad (V.13)$$

Avec P_i est la pression interne du tube.

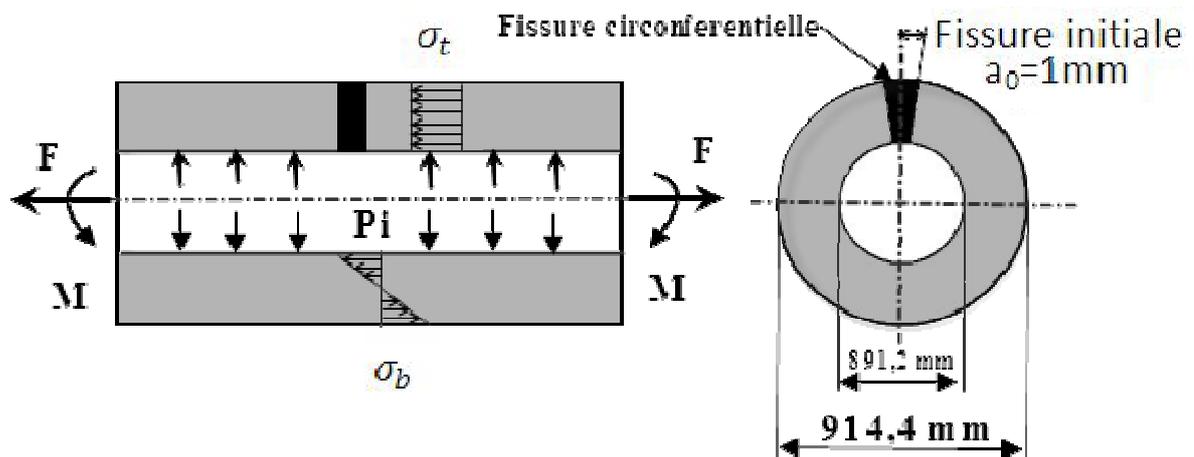


Figure V.5 : Géométrie de l'éprouvette

V.3. Matériaux d'étude :

La présente étude est menée sur deux matériaux à savoir les aciers X70 et X65

Les propriétés mécaniques des deux matériaux étudiées sont reportées sur le tableau V.1:

Acier	E (MPa)	ν	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	σ_R (MPa)	K_{IC} MPa \sqrt{m}	K_C MPa \sqrt{m}
X70 [23]	200000	0,3	527,4	672,9	98,896	125
X65 [3]	200000	0,3	500	600	96	125

Tableau V.1 : *Caractéristiques mécaniques des aciers X70 et X65*

Le modèle de propagation utilisé dans cette étude est le modèle Harter (équation V.1). Les paramètres du modèle inclus dans la base donnée de Harter ont été déterminés à partir des résultats expérimentaux.

Les principaux paramètres sont reportés sur le tableau V.2

Acier	C	Mn	P	S
X70 [23]	0,06	1,9	0,002	0,009
X65 [3]	0,09	1,59	0,03	0,08

Tableau V.2 : *Paramètres du modèle de propagation pour les aciers X70 et X65.*

La vitesse de fissuration est évaluée par la méthode de la sécante (V.14) à partir des résultats obtenus du couple (a, N).

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (V.14)$$

V.4. RESULTATS & DISCUSSION :

Dans cette partie nous étudions la fissuration d'un pipeline en X70 et X65 utilisé pour le transport du gaz et pétrole. Généralement la pression maximale est de 70 bars. Ce pipeline est soumis à un effort cyclique de flexion et un effort de traction dû à la pression interne.

V.4.1. Effet du rapport de charge R :

La figure V.6 montre la variation de la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles pour différents rapports de charges du pipeline en acier X70 sous pression de bars. On remarque que la durée de vie augmente avec l'augmentation du rapport de charge. Pour une même longueur de fissure ($a=60$ mm), la durée de vie a passé de 9.85×10^5 cycles à $R=0.1$ à 14.13×10^5 cycles à $R=0.4$. Le taux d'augmentation est environ de 1.5 fois. L'évolution de la vitesse de fissuration de l'acier pour pipeline X70 en fonction du facteur d'intensité de contrainte est montrée par la figure V.7. La vitesse de fissuration est affectée par le rapport de charge. On remarque un décalage des courbes de fissuration vers les faibles valeurs de ΔK sous l'augmentation du rapport de charge. Cette augmentation augmente la vitesse de fissuration et diminue le facteur d'intensité de contrainte seuil (ΔK_{seuil}). A $R=0.1$, le facteur d'intensité de contrainte seuil est de l'ordre de $7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, par contre à $R=0.4$, ΔK_{seuil} est de l'ordre de $4.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. La figure V.7 montre aussi la comparaison avec des valeurs expérimentales à $R=0.05$ et $R=0.9$ [23] utilisés pour prédire la fissuration pour d'autres rapports de charge.

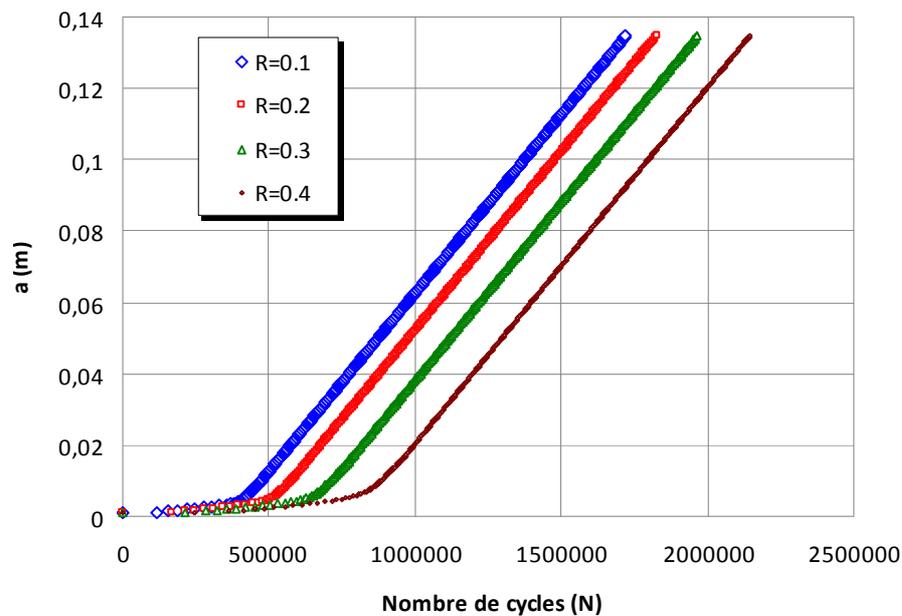


Figure V.6 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue du pipeline en X70

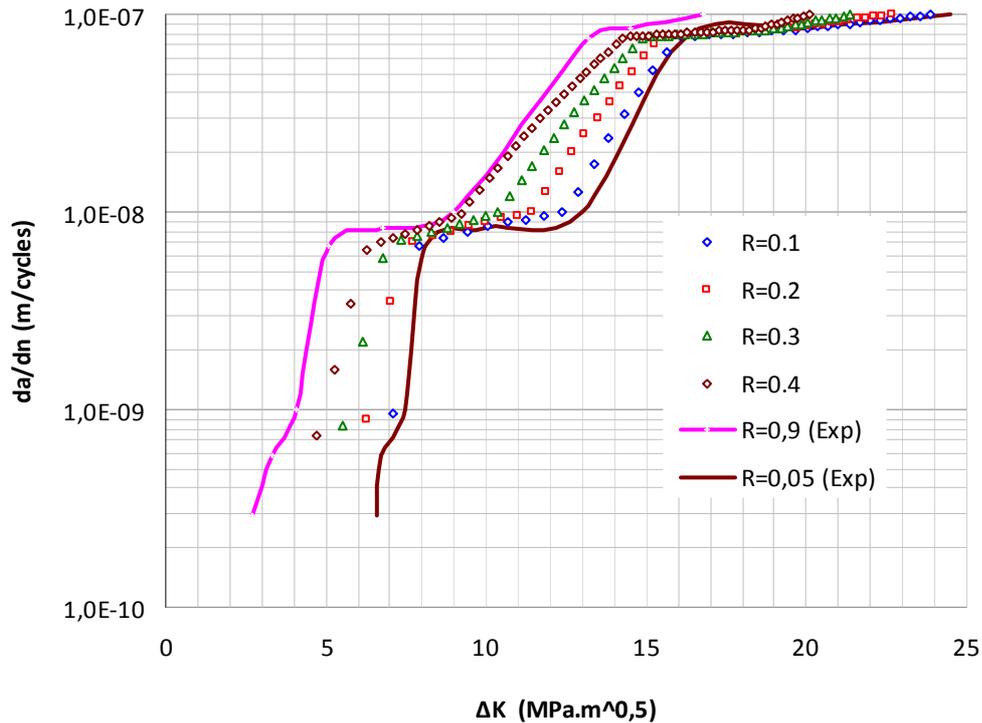


Figure V.7 : Effet du rapport de charge sur la vitesse de fissuration du pipeline en X70

V.4.2. Effet de l'amplitude de chargement :

La fissuration à amplitude constante pour différents niveaux de chargement à rapport de charge R constant ($R=0.1$) est étudiée où l'amplitude maximale est variable pour l'acier pipeline X70. L'amplitude de chargement maximale (σ_{\max}) varie de 140 MPa à 180 MPa en considérant l'effet de pression interne. L'effet de l'amplitude de chargement est montré sur les figures (V.8 et V.9). L'augmentation de l'amplitude du chargement a fait diminuer le nombre de cycle à la rupture. On remarque qu'à une même longueur de fissure ($a=0.04$ m), la durée de vie a passé de 5.32×10^5 cycles à 7.9×10^5 cycles respectivement de $\sigma_{\max}=180$ MPa à 140 MPa. A titre d'exemple, la durée de vie à la rupture (figure V.8) a passé de 1.12×10^5 cycles pour $\sigma_{\max}=180$ MPa à 1.72×10^5 cycles pour $\sigma_{\max}=140$ MPa. Cet effet peut se traduire par effet du chargement moyen qui a passé de 99 MPa à 77 MPa. La vitesse de fissuration garde la même allure et l'amplitude de chargement affecte la valeur du facteur d'intensité de contrainte seuil (figure V.8). La figure V.10 montre l'effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue de l'acier pour pipeline X65 à $R=0.1$. Le même effet est remarqué comparativement à l'acier pour pipeline X70.

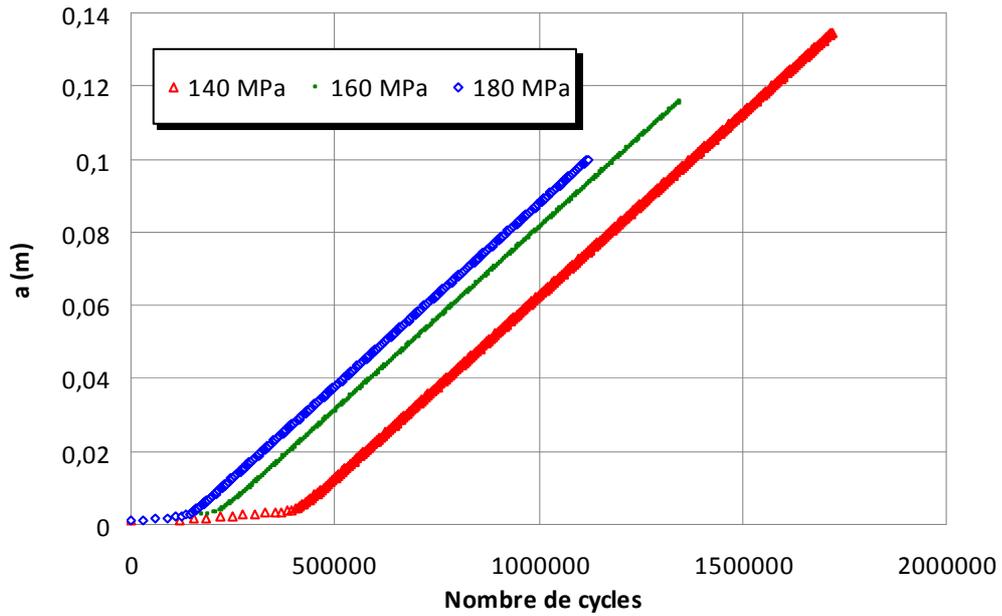


Figure V.8 : Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue du pipeline en X70 à $R = 0.1$

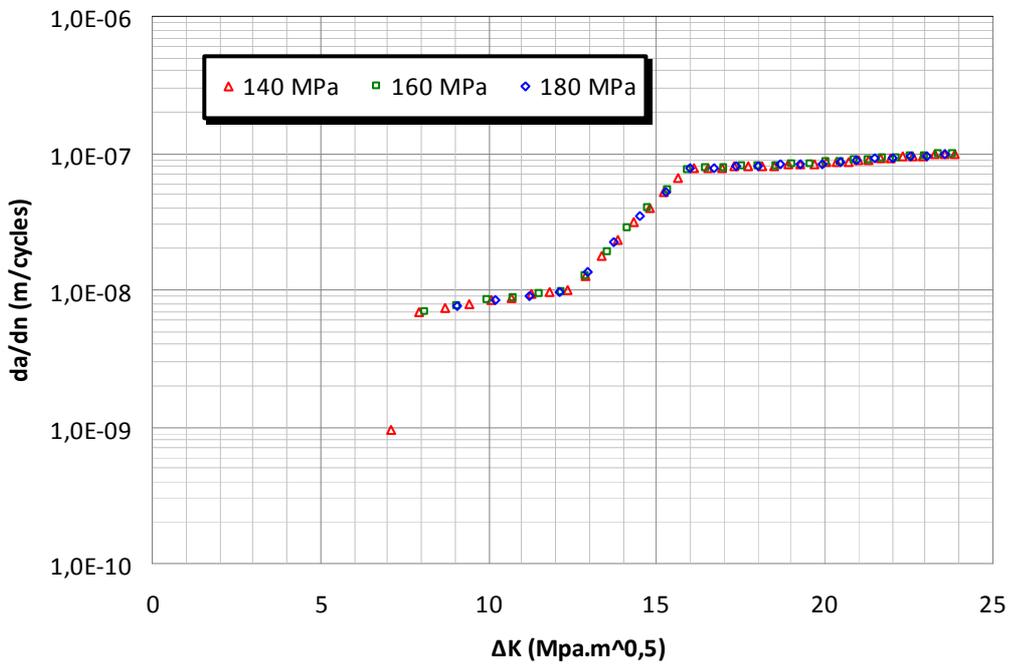


Figure V.9 : Effet de l'amplitude de chargement sur la vitesse de fissuration du pipeline en X70 à $R = 0.1$

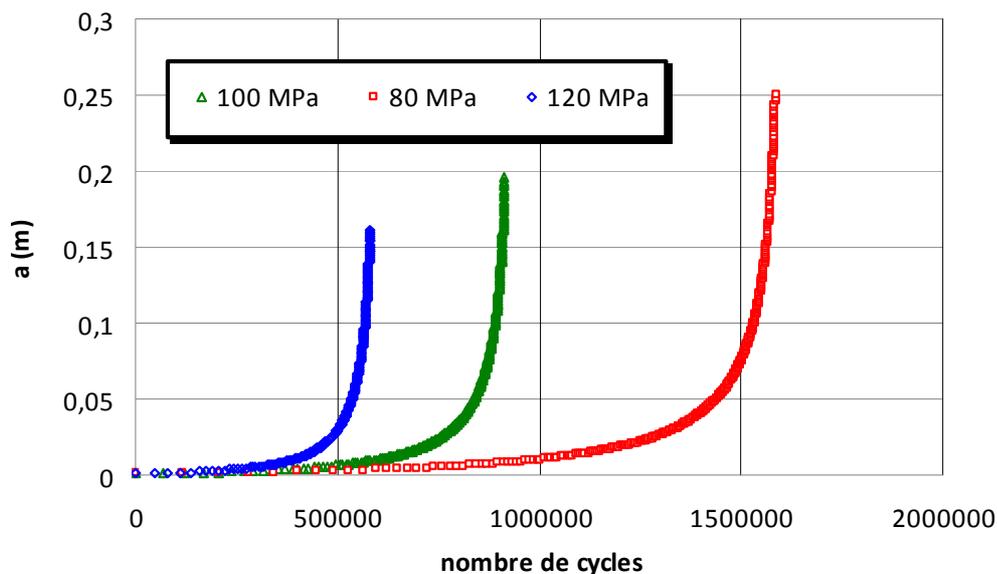


Figure V.10 : Effet de l'amplitude de chargement sur la durée de vie en fatigue du pipeline en X65 à $R = 0.1$

V.4.3. Effet de la pression à $R = 0.1$:

L'effet de la pression interne sur la durée de vie en fatigue est montré sur la figure V.11. La pression interne ne présente aucun effet sur la propagation de la fissure. Cette pression développe en plus des contraintes radiales, des contraintes de tension, Ces dernières sont faibles par rapport au chargement de flexion appliqué. Le tableau V.3 montre l'effet de la pression sur la variation de la contrainte de tension qui reste faible.

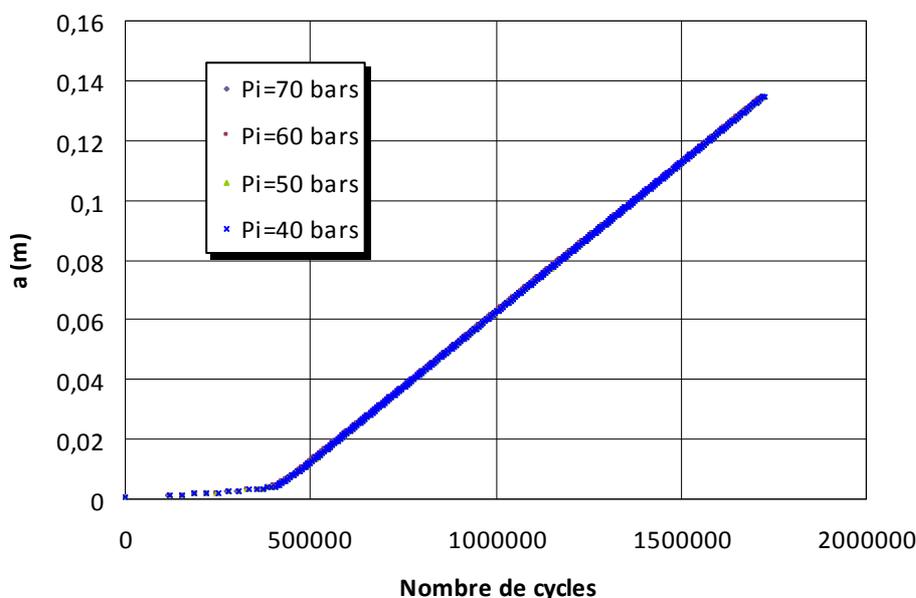


Figure V.11 : Effet de la pression interne sur la durée de vie en fatigue du pipeline en X70

Pression interne P [MPa]	la force de traction F [N]	La contrainte de la traction σ_t [MPa]
7	9794,288	0,29
6	8399 ,362	0,25
5	6999,46	0,21
4	5599,574	0,17

Tableau V.3 : *L'effet de la pression sur la variation de la contrainte de tension*

V.4.4. Effet de la fissure initiale :

Les résultats présentés sur la figure V.12, montrent que la taille de la fissure initiale affecte la durée de vie en fatigue. Une augmentation de la fissure initiale de 5 fois (de 1 mm à 5 mm) a diminué la durée de vie à la rupture par fatigue de 1.32 fois.

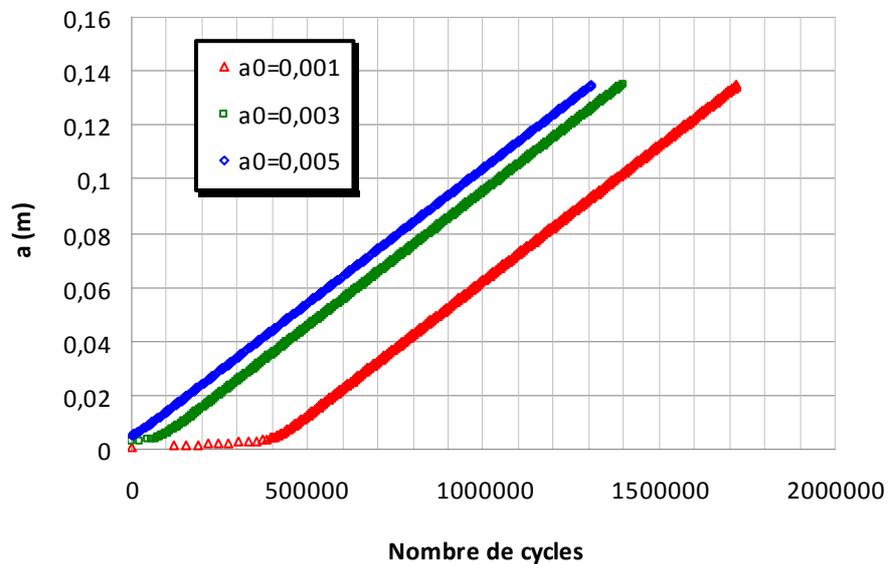


Figure V.12 : *Effet de la longueur initiale de la fissure la durée de vie en fatigue du pipeline en X70*

V.4.5. Comparaison des vitesses de fissuration pour deux types de matériaux X70 et X65 :

La figure V.13 montre la comparaison des vitesses de fissuration pour deux nuances d'aciers utilisés pour les tubes de transport de gaz à savoir l'acier X65 et X70. Les vitesses de fissuration évaluées pour l'acier X65 sont supérieures à celles de l'acier X70 avec quelques interactions et est comparé aux valeurs expérimentales de X70 pour R=0.05. Cela montre que les vitesses de fissurations sont influencées par les conditions de chargement et les caractéristiques du matériau (limité élastique, limite à la rupture, la taille des grains...etc.).

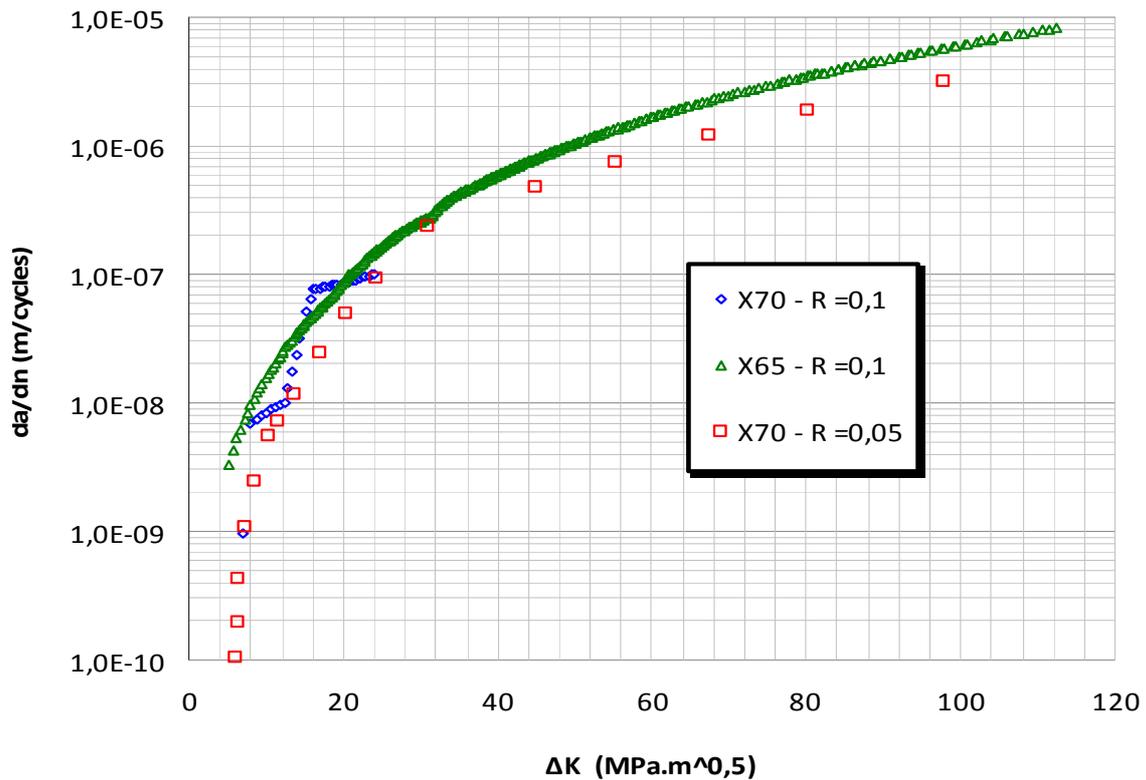


Figure V.13 : Comparaison des vitesses de fissuration pour les matériaux X65 et X70

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Cette étude a été conduite en vue de simuler le comportement en fatigue des aciers utilisés pour pipelines à savoir l'acier API 5L X70 et X65. L'effet de chargement est caractérisé par la variation du rapport de charge et de l'amplitude de chargement a été mis en œuvre. L'étude a été menée sur des tubes sous pression interne. Le chargement appliqué sur les tubes est un chargement de flexion dû à un moment externe et un chargement de tension dû à la pression interne provoquant le mode d'ouverture 1. La propagation des fissures est une propagation circonférentielle.

Suivant le type de sollicitations cycliques appliquées (flexion + traction), les résultats ont montré que la durée de vie et la vitesse de fissuration sont affectées par la variation du rapport de charge et de l'amplitude de chargement. Les différents résultats ont montré que la pression interne n'a aucun effet sur la propagation des fissures des tubes avec défauts circonférentielles. La prédiction du comportement en fatigue a montré que l'acier API 5L X70 présente une meilleure résistance à la fatigue comparativement à l'acier X65 ceci est dû à l'amélioration des caractéristiques mécaniques et la taille des grains.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] « Comparaison des coûts de transports » Groupe d'information, La roche en ardenne (www.leseoliennes.be)
- [2] **F. AGGOUNE**, Thèse de magister en génie mécanique « Évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation » Université Mentouri, Constantine 2009-2010.
- [3] **M. BOUZIANE**, Thèse de magister en génie mécanique productique « Contribution à la détermination des critères de qualité des tubes soudés soumis à une pression intérieure » Université de M'HAMED BOUGARA BOUMERDES 2007-2008
- [4] **F. COEUILLE**, Thèse de doctorat en Science et génie des matériaux « revêtements polymères de canalisation de fluide : caractérisation et évolution de l'adhésion en milieu agressif » de l'Ecole des Mines de Paris 2002.
- [5] **B. RACHID** Thèse de doctorat en génie mécanique « Analyse des propriétés et caractéristiques des aciers des tubes et leurs influences sur la fiabilité des gazoducs » Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES 2009-2010.
- [6] **American Petroleum Institute**, « API Specification 5L » 42nd ed., Washington, D.C, 2004.
- [7] **K. NIBOUCHA, H. HOUALIA, M. ZERGOUGA, R. HALIMIB** « Contrôle et caractérisation de la corrosion par CND pour l'inspection des canalisations enterrées » Centre de Recherche en Soudage et Contrôle -Alger
- [8] **A. ALHUSSEIN**, Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux « Transport et stockage des dérivés pétroliers, Problématique d'endommagement des pipes par érosion de sable et par hydrogène » Université de Metz, 2010
- [9] **SMANIO-RENAUD Véronique** « Étude des mécanismes de fragilisation par l'hydrogène des aciers non alliés en milieu H₂S humide : contribution de l'émission acoustique »
- [10] **ISABELLE MORO**, Thèse de doctorat en Science et Génie des Matériaux « Fragilisation par l'hydrogène gazeux d'un acier ferrito-perlitique de grade API X80 » Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2009
- [11] **A. BENHAMOUDA**, Thèse de magister en génie mécanique « Etude du comportement des fissures dans les tubes sous pression interne » Université Mentouri, Constantine 2009-2010.
- [12] **EMANUEL ROY**, Université de Joseph Fourier Grenoble, publié le 08-10-2009

- [13] **M. ALLOUTI** Thèse de doctorat en Mécanique des matériaux « Étude de la nocivité de défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaisons » Université Paul Verlaine de Metz – 2010.
- [14] **BOUZIANE AMEUR**, Thèse de magister en génie mécanique « Modélisation et simulation du comportement en fatigue des aciers » Université de M'sila 2009-2010.
- [15] Sylvie Pommier « Mécanique des Matériaux »
- [16] **M. MAMMAR, F. ZAÏRI**, Mémoire de l'ingénieur en génie mécanique « Analyse des défauts dans les pipelines et comportement en fatigue » l'Université de Tlemcen, 2011.
- [17] « A review of fatigue crack growth for pipeline steels exposed to hydrogen », Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 115, Number 6, November-December 2010
- [18] **NIST, MATERIALS RELIABILITY DIVISION USA** « Effect of ethanol fuel and microbiologically influenced corrosion on the fatigue crack growth behavior of pipeline steels ».
- [19] **SANDIA NATIONAL LABORATORIES** « Technical reference on hydrogen compatibility of materials ».
- [20] **M.AUGUSTO NEVES**, « Propagação de trincas de fadiga em juntas soldadas longitudinais de aço para dutos da classe api 5L X70 » Université Fédérale de Rio de Janeiro, 2005.
- [21] **JAMES A.HARTER** « Afgrow users guide and technical manual », Juin 2006.
- [22] **HARTER, JAMED**, «MODGRO users manual, Version 1.2, Technical Memorandum» AFWAL-TM-88-157-FIBE, AFWAL Dynamics Laboratory, Wright-Patterson AFB, OH, Revised in July 1994.
- [23] **O. VOSIKOVSKY** « Effects of stress ratio on fatigue crack growth rates in X70 pipeline steel in air and saltwater » Journal of Testing and Evaluation, March 1980.
- [24] TRAPIL, Société des transports pétroliers par pipeline.