



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

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAI-TLEMCEN
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de Magister

Spécialité : Sciences Des matériaux

Option :

Endommagement et fiabilité mécanique

Présenté par : HOUARI ALI

THEME

Etude sur le comportement des aciers API 5L X42 sollicités
en sol et approche par modèle de weibull
- cas de la ligne GPL / AST-

Soutenu : le 17/09/2014

Devant le jury :

Président	: Mr. BOURDIM	Abdelghafour	MCA	UABB-Tlemcen
Examineur:	Mr. BACHIR BOUIADJRA	El Abbas	Professeur	Université SBA
Examineur:	Mr. SEBAA	Fethi	MCB	UABB-Tlemcen
Encadreur	: Mr. BENMOUSSAT	Abderrahim	Professeur	UABB-Tlemcen

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2013 - 2014

Dédicace

Avec beaucoup de respect et d'amour.

Je dédie ce mémoire à :

A la Mémoire de mon père.

*A Ma mère et Mon grand frère Mohamed pour
touts les sacrifices, les efforts prodigieux, qu'ils ont
consentie pour moi qu'ils trouvent ici le témoignage
de mon profond amour et respect.*

A ma femme, mes sœurs et mes frères.

A toute la famille de près ou de loin.

A tous mes amis et mes collègues.

A Mr BENMOUSSAT

REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie mon Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force de terminer ma thèse de Magister.

Je remercie très sincèrement le Professeur Monsieur BENMOUSSAT Abderrahim, d'avoir proposé et encadré cette thèse, je tiens à lui exprimer mes profonds respects et mes respectueuses gratitude pour sa patience, ses orientations et son suivi durant l'élaboration de ce Magister

Mes vifs remerciements aux membres du jury :

Mr. BOURDIM	Abdelghafour
Mr. BACHIR BOUIADJRA	El Abbas
Mr. SEBAA	Fethi

Je remercie vivement tous les enseignants du département mécanique.

Je remercie monsieur KEBIR Abdelkarim Chef service d'inspection et maintenance de la canalisation AST et son collègue du travail monsieur MADANI Fouatih Toufik Chef service planning et méthode du département Technique et Maintenance du District GPL Tlemcen/NAFTAL de m'avoir soutenu durant mon stage.

الملخص

نظرا للمشاكل التي تتعرض لها الأنابيب لنقل الغاز خاصة مشكل التآكل ونظرا لعبورها تحت الأرض الذي يجعل تتبع حالتها جد صعبة وبما أن استعمال أداة تتبع بالأقمار الصناعية كل مرة مكلف جدا. لهذا وضعنا هذه الدراسة لتوقع حياة الأنبوب بأخذ معطيات هذه الأداة مرة واحدة فتجعل عملية تتبعها سهلة من طرف مصلحة الصيانة.

في مشروعنا وضحنا معظم قوانين الاحتمالات والطرق التحليلية المستخدمة في موثوقية وعلى وجه الخصوص قانون "Weibull".

لتحقيق هذه الدراسة وباستعمال نتائج مراقبة الانبوب وضعنا برنامج "ماتلب Matlab" الذي سهل لنا سرعة ايجاد المعلمات الموثوقية، على الخصوص معدل الفشل وحياة خط الأنبوب (AST /GPL) (NAFTAL /GPL).

الكلمات المفتاحية: حديد الصلب API، خط انبوب الغاز AST/GPL، التآكل، موجات فوق الصوتية، نمودح واييل، برنامج "ماتلب Matlab"، حياة المتبقية للأنبوب .

ABSTRACT

Steels pipelines transporting hydrocarbons are approached by corrosion by soils particularly where they are buried. The method for detecting these failures is non-destructive ultrasonic testing.

In this work we are developed a theoretical and practical study of pipeline reliability based on industrial experience feedback and probability model in order to know well during its service period. Many probability models can be used such as exponential, analytical methods, weibull ...we are interested in this project by «Weibull" model.

To determine the reliability parameters, which are used to evaluate the failure rate and the pipeline life of AST (NAFTAL GPL we have developed a MATLAB program which from the operating pipeline data.

Keywords: API Steels, Line GPL/AST, failures, failure rate, Non-destructive test (NDT), Optimization, WEIBULL, Programmed MATLAB, pipeline's life.

RESUME

Les aciers de pipelines pour le transport des hydrocarbures, sont sollicités par des phénomènes de corrosion par les sols particulièrement où ils sont enfouis. Les méthodes de détection de ces défaillances se fait par contrôle non destructif par ultrasons.

Notre travail est consacré à l'étude théorique et pratique de la fiabilité, Cette étude permet de bien connaitre la structure durant sa période de fonctionnement et d'optimiser son exploitation.

Les lois de probabilité peuvent être développées dans ce contexte tel que la loi exponentielle ou la loi de WEIBULL que nous avons considérée dans ce projet.

Pour déterminer les paramètres de fiabilité, qui sont utilisés pour l'évaluation du taux de défaillance et la durée de vie du pipeline AST (NAFTAL GPL), Nous avons développé un programme en MATLAB à partir des données d'exploitation du pipeline.

Mots clés : Aciers API, ligne GPL/AST, défaillances, Corrosion, contrôle non destructif (CND), modèle de WEIBULL, Programme MATLAB, durée de vie de la canalisation.

LISTES DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 : station canalisation	05
Figure 1.2 : Poste de coupure	05
Figure 1.3 : Exemple de propriétés à concilier dans un acier HSLA	08
Figure 1.4 : Effet de la taille du grain ferritique sur la limite d'élasticité et la température de transition (acier à 0.1 %C, 0.5 % Mn, 0.2 % Si, 0.006%N, d'après IRVINE.....	09
Figure 1.5 : effet du taux de carbone sur la courbe de transition Charpy des aciers ferrito – perlitiques	12
Figure 1.6 : Résilience au niveau du palier ductile causé par l'allongement	13
Figure 1.7 : Evolution des compositions des aciers pour tubes en fonction de la soudabilité	14
Figure 1.8 : Exemples des Modèles de dégradation.....	
Figure 1.9 : Schéma d'une courbe de traction.....	17
Figure 1.10 : Processus auto - catalytique de propagation d'une piqûre.....	21
Figure 1.11 : Courbe schématiques de fatigue et de corrosion.....	24
Figure 1.12 : Dynamique de l'usure des lois de dégradation.....	25
Figure 1.13 : Courbe de durée de vie de l'ouvrage étudié	27
Figure 1.14 : Propriétés sans mémoire de la loi exponentielle.....	30
Figure 1.15 : Fonction de distribution.....	31
Figure 1.16 : Evolution de la fonction de distribution	33
Figure 1.17 : Evolution de la fonction de répartition F(t) et de la fonction fiabilité R(t).....	33
Figure 1.18 : Taux d'avarie de la loi de Duane	34
Figure 1.19 : Influence du facteur de forme β sur la courbe de la densité probabilité.....	35
Figure 1.20 : Courbe de la densité en fonction du paramètre de position (γ)	36
Figure 1.21 : Conception du papier d'Allan plait.....	43
Figure 1.22 : Régression des nuages de point en une droite (D)	44
Figure 2.1 : Prise de vue aérienne du Tracé SBA-Tlemcen.....	53
Figure 2.2 : Sphères de stockage GPL.....	58
Figure 2.3 : Microstructure des aciers (x500)- : X42.....	59
Figure 2.4 : Schéma de l'éprouvette de traction (NF EN 100002-1)	59
Figure 2.5 : Courbes effort – allongement acier X42.....	60
Figure 2.6 : Illustration Equipement d'aide au contrôle visuel.....	72

Figure 2.7 : Illustration Equipement d'aide au contrôle visuel.....	73
Figure 2.8 : Principe de la magnétoscopie.....	76
Figure 2.9 : Schéma générique d'un instrument à ultrasons.....	79
Figure 2.10 : Exemple du contrôle par ultrasons.....	80
Figure 2.11 : Schéma type d'un racleur instrumenté.....	82
Figure 2.12 : L'outil intelligent MagneScan HR.	84
Figure 2.13 : Distribution des pics de corrosion entre le point 0m et 6000m.....	
Figure 2.14 : Distribution des pics de corrosion entre le point 0m et 1000m.....	
Figure 2.15 : Distribution des pics de corrosion entre le point 1000m et 3000m.....	
Figure 2.16 : Distribution des pics de corrosion entre le point 4000m et 6000m.....	86
Figure 2.17 : Distribution des profondeurs de corrosion.....	86
Figure 2.18 : Localisation des profondeurs de corrosion.....	87
Figure 3.1 : Courbes de fiabilité, taux de défaillance et densité de probabilité.....	98
Figure 4.1 . Outils utilisés pour l'évaluation de complexité de détérioration des pipes (nouvelle version de RSG313)	109
Figure 4.2 : Défaut de corrosion sur un pipe (a – rectangulaire b – parabolique).....	111
Figure 4.3 : Types d'interactions de perte en métal	112
Figure 4.4 : Plusieurs profils de perte en métal.....	113
Figure 4.5 : Défaut de corrosion selon forme parabolique.....	115
Figure 4.6 : Défaut de corrosion projeté selon une forme rectangulaire.....	116
Figure 4.7 : dimensionnement des défauts des pics de corrosion.....	118
Figure 4.8 : Ajustement de l'épaisseur et la profondeur du défaut avec la corrosion généralisée.....	119
Figure 4.9 : Projections des inters agentes déserte dans la direction circulaire	119
Figure 4.10 : Projections des défauts dans la ligne de projection	120
Figure 4.11 : Combinaisons des défauts inter agentes.....	120

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1 : Caractéristiques mécaniques requises des pipelines en acier de grade API.....	11
Tableau 1.2 : Principaux couples métal/solution pour lesquels la CST peut apparaitre	22
Tableau 1.3 : Des valeurs A et B pour le calcul du MTBF (loi de" Weibull").....	42
Tableau 2.1 : Composition chimique de l'acier X42 étudié.....	58
Tableau 2-2 : Caractéristiques mécanique de l'acier X42.....	59
Tableau 2.3 : Composition chimique de la solution de sol AST	62
Tableau 2.4 : Caractéristiques des polyéthylènes.....	65
Tableau 2.5 : Caractéristique de l'époxyde en poudre.....	66
Tableau 2.6 : Caractéristique d'un revêtement polyuréthane.....	67
Tableau 3.1 : Résultats de temps de bonne fonction TBF par ordre i.....	93
Tableau 4.1 : critère d'évaluation des pics de corrosion.....	114

NOTATIONS UTILISÉES

API	American Petroleum Institute
HSLA:	High Strength low Alloy Steels.
HV:	Essais Vickers
HRB:	type Brinell
CSC:	Corrosion sous contrainte
CND:	Contrôle non destructif
CST:	Corrosion sous tension
Ep:	Epaisseur de paroi du tube
Ec :	Epaisseur de corrosion
Ecd :	Epaisseur de corrosion admissible
E _{OFF} :	Potentiel de la polarisation
E _{ON} :	Potentiel de la canalisation
Fp:	Coefficient de piqûration
F(E) :	Fréquence observée de l'événement E
F(t) :	Densité de probabilité.
F(t _i) :	Fonction de réparation à l'instant t _i
GPL	Gaz de pétrole liquéfier
I:	Courant injecté dans la canalisation
L _{max} :	Profondeur maximale de pénétration mesurée à l'aide d'un microscope optique
L _{av} :	Profondeur moyenne de dissolution déterminée par perte de poids.
L ₁₀ :	La durée de vie « nominale » associée au seuil ($R(L_{10}) = 0.9$)
MTBF :	(Mean Time Between Failure) , moyenne des temps de bon fonctionnement
N ₀ :	Le nombre de tubes fonctionnement à t=0.
N(t) :	Le nombre de tubes fonctionnement à l'instant t.
N(t+Δt) :	Le nombre de tubes fonctionnements à l'instant t+Δt.
N :	Taille d'un échantillon de défaillances.
t :	Température
Tr :	Temps d'expertise de pipeline par racleur
TBF :	Temps d'apparition d'une panne.(temps de bon fonctionnement avant défaillance) Intervalle entre deux dates de pannes
R(t _i) :	Probabilité de bon fonctionnement à l'instant t _i (l'anglais "reliability" qui signifie "fiabilité").
R(t) :	Fiabilité au temps t [%]
P(E):	Probabilité vraie de l'événement (E).
V _c :	Vitesse de corrosion
λ(t) :	Taux de défaillance instantané
λ (lambda):	Taux de défaillance constant [nbr/h]
γ(gamma):	Paramètres de position
β(beta) :	Paramètres de forme
η (eta):	Paramètres d'échelle
σ (sigma minuscule)	Écart type
μ :	Taux de réparation
m :	Indice
n :	Nombre de défaillances
ns	Nombre de survivants
i :	Rang de la ième de défaillance
xi :	Les mesures données
yi :	Les valeurs données
Ecd :	Profondeur de pic de corrosion en (mm).
Z :	Quantité scalaire utilisée dans la méthode des moindres carrés
Req :	Résistance moyen de l'acier (Mpa)

SOMMAIRE

	page
Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	VIII
Nomenclature.....	IX
Sommaire.....	X
Introduction Générale.....	01
CHAPITRE 1 : Etude bibliographique	04
1.1. Introduction.....	05
1.2. Transport par canalisation.....	05
I.2.1. Définition.....	05
I.2.2 Composants des réseaux de transport par canalisation.....	05
1.3. Aciers pour pipelines.....	06
I.3.1 Introduction.....	06
I.3.2 Caractéristiques des aciers de pipelines.....	07
1.4. Défaillances des aciers de pipelines	15
I.4.1 Définition	15
I.4.2 Défaillance mécanique.....	17
I.4.3 Défaillances par corrosion.....	18
I.4.4 Dynamique de l'usure.....	25
1.5. Modèles Mathématiques d'expression de la durée de vie.....	26
I.5.1.Introduction	26
I.5.2.Durée de vie et défaillance.....	26
I.5.3.Durée de vie et fiabilité.....	28
I.5.4.Modèles Mathématiques.....	30
I.5.4.1 Loi exponentielle.....	30
I.5.4.2 Loi normale de Gauss.....	32
I.5.4.3 Loi de Duane.....	34
I.5.4.4 Loi de WEIBULL.....	35
I.5.4.4.1 Domaine d'utilisation.....	35
I.5.4.4.2 Expressions Mathématiques.....	36
I.5.4.4.3 Ajustement graphique: La détermination des paramètres.....	39
I.5.4.4.4 Recherche de la MTBF : usage des tables numériques.....	42
I.5.4.4.5 Détermination graphique des paramètres (η , β , γ)	43
I.5.4.4.6 Méthode analytique pour déterminer les paramètres de "Weibull".....	45
I.5.4.5 Choix Du Modèle.....	45
1.6. Synthèse bibliographique	46
I.7.Conclusion.....	51

CHAPITRE 2 : Contexte Industriel	52
II.1. Introduction	53
II.2. Description de la ligne AST	53
II.3. Caractéristiques Acier API X42	58
II.3.1 Composition chimique.....	58
II.3.2 Caractéristiques mécaniques.....	55
II.3.2.1 Essai de traction.....	59
II.3.2.2 Essai de Dureté.....	61
II.4 Analyse du sol sur le tracé de ligne AST	61
II.5 Expertise de la ligne AST	62
II.5.1 Système de protection anticorrosion.....	62
II.5.1.1 Protection passive.....	62
II.5.1.2 Protection cathodique.....	64
II.5.2 Détection des fuites.....	71
II.6 Contrôle non destructif (CND)	71
II.6.1 contrôle visuelle.....	71
II.6.1.1 Objectifs spécifiques.....	71
II.6.1.2 Principe.....	71
II.6.1.3 Application.....	73
II.6.2 Contrôle par flux magnétique.....	74
II.6.2.1 Objectifs spécifiques.....	74
II.6.2.2 Principe.....	74
II.6.2.3 Mise en œuvre.....	77
II.6.2.4 Application et limites.....	77
II.6.3 Contrôle par ultrason.....	78
II.6.3.1 Objectifs Spécifiques.....	78
II.6.3.2 Principe.....	78
II.6.3.3 Principe physique.....	78
II.6.3.4 Contrôle par ultrasons.....	79
II.7. Détection par outil intelligent	81
II.7.1 Objet.....	81
II.7.2 Détection par outil intelligent Cas de la ligne AST.....	82
II.7.3 Détection par outil intelligent (ligne GZ1)	84
II.7.3 .1 Données d'entrée.....	84
II.7.3 .2 Résultats des mesures de la sonde.....	85
II.8 Conclusion	88
CHAPITRE 3 : Simulation numérique	89
III.1 Acquisition des données	90
III.2 Linéarisation l'expression de Weibull	94
III.3 Calcul les paramètres de Weibull	95
III.4 Conclusion	98
CHAPITRE4 : Résultats et Discussions	99
IV.1 Introduction	100
IV.2 Caractéristiques des matériaux d'étude	101
IV.2.1. Caractéristiques chimiques.....	102
IV.2.2 Caractéristiques mécaniques.....	102
IV.2.3 Microstructure.....	102

IV.3 Caractéristiques des solutions de sol.....	102
IV.3.1 Solution de sol AST.....	102
IV.4 Rappel sur la Loi de WEIBULL.....	103
IV.4.1 Domaine d'utilisation.....	103
IV.4.2 Expressions Mathématiques.....	103
IV.4.3 Recherche de la MTBF : usage des tables numériques.....	106
IV.5 Les résultats de la sonde et paramètres de Weibull.....	112
IV.6 Critère B31G développé par API.....	108
IV.6.1 Introduction.....	108
IV.6.2 Méthodes d'évaluation des défauts localisés.....	109
IV.6.3 Critère B31 G.....	110
IV.7 Estimation de la durée de vie restante.....	121
<i>Conclusion générale et perspectives.....</i>	124
<i>Références Bibliographie.....</i>	127
<i>Annexes.....</i>	132

Introduction générale

L'acheminement des hydrocarbures : produits pétroliers et gaz naturel s'effectue par canalisation en acier depuis leurs gisements vers les zones de raffinage et les centres de distribution et de consommation. On estime qu'en Algérie le réseau de pipelines est estimé à plus de 18000 Kms tout diamètre confondu.

La ligne AST de ce réseau relie le centre de raffinage à Arzew au centre enfûteur GPL à Chetouane (Tlemcen) en passant par Sidi bel Abbes sur une distance de 165.247Km.

Les canalisations en acier de grade API sont protégées contre la corrosion par un revêtement externe et interne aussi étanche que possible à base de liants hydrocarbonés (brai de houille ou de bitume de pétrole) ou encore par un revêtement passif en système multicouche élaboré généralement en usine, associant un primaire époxy pour l'adhérence à l'acier, un adhésif intermédiaire et une couche de plusieurs millimètres de polyéthylène, ou polypropylène. Cette protection est complétée par une protection cathodique) dont le potentiel est maintenu à $- 850 \text{ mV /Cu/CuSO}_4$ par courant imposé ou par anode sacrificielle. [1]

Les canalisations, dont le matériau constitutif le plus répandu est l'acier non allié, sont particulièrement exposées à la corrosion par suite des interactions avec le sol environnant comme dans le cas des tubes enterrées de pipelines d'hydrocarbures ayant pour conséquences : la rupture des revêtements, le développement des piqûres de corrosion ou des fissures, la fuite des hydrocarbures et l'arrêt prolongé d'unités importantes de production (énergie, pétrochimie, etc.).

Les désordres apparents rencontrés sur la ligne de pipeline sont très souvent dus aux problèmes de corrosion par suite des interactions chimiques de l'acier avec le milieu environnant de sol et au vieillissement des matériaux. La durée de service dépend largement de la durabilité des matériaux utilisés et du comportement notamment en corrosion. Les matériaux réagissent en permanence avec le milieu environnant avec l'accélération des paramètres physico-chimiques (température, humidité, gaz, sels agressifs).

Les aciers de pipelines sont soumis à un vieillissement sous l'effet d'environnement, qui résulte de l'endommagement mécanique, chimique. Cet endommagement peut avoir des conséquences importantes, et conduire à la ruine de la canalisation. On estime que le quart de la production annuelle mondiale d'aciers est détruite par la corrosion, soit environ 5 tonnes d'acier détruites par seconde [2].

L'étude dans le cadre de ce projet porte sur l'ouvrage de canalisation AST (Arzew – Tlemcen et Sidi Bel Abbes) exploité par la société NAFTAL pour le transport GPL ayant pour but d'alimenter en Butane et Propane les Centres de Stockage GPL Vrac de Tlemcen et Sidi Bel Abbes à partir du complexe GPL SONATRACH GP1Z située à Bethioua- Arzew, sur une distance de 165 Kms et de diamètre 10'' et 8''. L'avantage du transfert par canalisation du produit butane vers les centres enfûteur Tlemcen et Sidi Bel Abbes est qu'il se fait régulièrement, tout en évitant tous risques d'acheminement par camions (accidents, fuites de gaz,...etc), et dans un temps bien réduit.

Les tubes sont en acier API 5L X42 étirés et sans soudures. L'ouvrage a été construit en 2004. Les aciers API 5L selon la norme API (American Petroleum Institute), impose des valeurs maximales pour la composition chimique et des valeurs minimales pour les caractéristiques mécaniques.

Après exploitation, des inspections ont montrés des défaillances sur les tubes particulièrement par corrosion qui se sont développés par suite des interactions de l'acier nu avec les sols corrosifs. Ce qui motivé notre étude. Selon les rapports d'expertise, les défaillances par corrosion notamment par pics de corrosion se sont produis dans le temps sous certaines conditions lorsque l'acier nu après échec des systèmes de protection anticorrosion est en interaction avec les sols corrosifs,

On s'intéressera particulièrement au contexte industriel, à la maintenance et la protection de l'ouvrage et l'évaluation de la durée de vie par approche de weibull comprenant :

- Une étude sur le système de détection des défaillances par Inspection visuelle sur toute la ligne de la canalisation AST et inspection ultrasonique par outil intelligent
- Exploitation des données

- étude de l'influence des défaillances par corrosion sur la durée de vie par approche de weibull (Les résultats d'expertise permettront en outre d'évaluer la durée de vie par approche probabilistique par modèle de Weibull.

La méthodologie d'étude consiste à exploiter les données de défaillances obtenues par outil intelligent et d'évaluer la durée de vie par modèle de weibull en développant un programme en logiciel Matlab. Il est à noter que la ligne AST a été récemment réceptionnée pour l'exploitation et que le programme d'inspection de cette ligne par outil intelligent étant en cours, on a pas pu avoir les résultats. Afin d'appliquer le modèle de weibull, nous avons utilisé les résultats d'une partie de la ligne GZ1 reliant le gisement de gaz naturel à Hassi r'mell à la raffinerie d'arzew qui est en exploitation depuis environ une quarantaine d'années et qui présente aujourd'hui beaucoup de défaillances par corrosion.

Nous présenterons dans le chapitre 1 une recherche bibliographique sur les défaillances des ouvrages métalliques enterrés et les méthodes mathématiques d'évaluation de la durée de vie par approche probabilistique. Le chapitre 2 sera consacré au contexte industriel, la présentation de la ligne GPL/AST et la présentation des caractéristiques du matériau d'étude. Dans le chapitre 3 nous développons les calculs mathématiques selon le modèle de weibull par le code Matlab. Les discussions des résultats seront données dans le chapitre 4 et nous terminerons notre mémoire par une conclusion et les perspectives.

CHAPITRE 1

Etude bibliographique

- Introduction
- Transport par canalisation
- Aciers pour pipelines
- Défaillances des aciers pour pipelines
- Modèles Mathématiques d'expression de la durée de vie
- Synthèse Bibliographie
- Conclusion

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons le moyen du transport des hydrocarbures par canalisation avec les caractéristiques des aciers de fabrication, et aussi nous citerons les différentes modes de défaillances des aciers de pipelines, et nous terminons le chapitre par une synthèse bibliographique.

I.2 Transport par canalisation

I.2.1 Définition

Le transport par canalisation est un mode de transport de matières gazeuses, liquides, solides ou état de la matière polyphasiques, réalisé au moyen de conduites constituant généralement un réseau système de transport.



Figure 1 station de canalisation [3]

Cependant, les produits généralement visés par le terme *transport par canalisation* sont : le pétrole et autres hydrocarbures liquides transportés par oléoduc., le gaz naturel, transporté par gazoduc ;

I.2.2 Composants des réseaux de transport par canalisation



Figure 1.2 : Poste de coupure [3]

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'atterrages, 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 sectionnement** permettent d'isoler un tronçon de canalisation afin d'assurer sa maintenance ou de limiter les conséquences néfastes en cas de fuite. Ces postes sont parfois équipés de **coupure** pour introduire et recevoir des pistons (pig en anglais), destinés à contrôler les différents paramètres d'intégrité de la canalisation : géométrie, propreté, perte de métal, fissuration, etc. La distance entre deux postes de sectionnement consécutifs dépend de la réglementation applicable, selon le fluide transporté et le pays concerné. La distance entre deux postes de coupure (ou de demi-coupure) consécutifs varie d'une dizaine de kilomètres pour de courtes antennes ou points spéciaux, à quelques centaines de kilomètres pour de grandes canalisations de transit.
- 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.

I.3 Aciers pour pipeline (aciers API)

I.3.1 Introduction

L'acier de part ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques occupe une place importante dans l'industrie des métaux ferreux, d'où son utilisation dans divers domaines comme dans le transport par canalisation des hydrocarbures (pétrole et gaz naturel). Il est utilisé pour la fabrication des pipelines (gazoducs et oléoducs) pour acheminer des quantités importantes d'hydrocarbures sur de grandes distances depuis leurs gisements vers les zones de consommation et de transformation. A nos jours il existe plus d'un million de Km de réseau de pipelines en exploitation dans le monde. Le réseau en Algérie est évalué à plus de 16.000 Km pour des diamètres allant de 8 à 48 pouces. Pour leur efficacité ces canalisations doivent répondre à des impératifs de rentabilité et de sécurité. Plus de 95% des aciers utilisés pour les canalisations sont

des aciers micro alliés à haute résistance. Ils sont obtenus par des schémas métallurgiques de plus en plus performants en augmentant la vitesse de refroidissement après laminage contrôlé, comme les tôles TMCP (thermo mechanical controlled process) obtenues par laminage à température contrôlée suivi d'un refroidissement accéléré. [4]

Les canalisations enterrées dans le sol sont soumises à des contraintes importantes et un environnement corrosif. Pour cela le développement de nouveaux aciers HSLA a été orienté vers une modification des propriétés mécaniques afin d'éviter une augmentation trop importante de l'épaisseur des tubes. On est arrivé à obtenir un compromis entre une haute limite d'élasticité pour supporter les grandes pressions et une bonne ténacité afin de résister à la propagation de fissures grâce au développement des tôles TMCP. Les aciers sont passés du grade X52 au grade X70 employés de nos jours avec des microstructures *ferritoperlitique*. Le passage à des grades supérieurs X80, X100 passe par le développement d'aciers de structures *ferritobainitiques*. [5]

I.3.2 Caractéristiques des aciers de pipelines

1) Composition chimique:

Chaque élément d'addition a un effet spécifique que l'on résume ci-dessous :

- ✓ La faible teneur en carbone et en éléments d'alliage permet de garantir la bonne soudabilité de l'acier.
- ✓ Les éléments d'alliage gamma gènes (Mn, Ni, Cu) abaissent la température de transition $\gamma \rightarrow \alpha$ de l'acier, favorisant ainsi la germination des grains fins de ferrite. Ces éléments ont également un effet de durcissant par solution solide.
- ✓ Le silicium agit principalement par effet de solution solide, il a également un rôle de désoxydant.
- ✓ L'aluminium est employé comme désoxydant lors des traitements en poche de l'acier liquide, l'aluminium et le silicium sont des éléments alphagènes, mais ils sont présents de faibles teneurs.
- ✓ La très faible teneur en impuretés (S et P) est caractéristique d'une faible teneur inclusionnaire et d'une bonne résistance à la corrosion.
- ✓ L'addition de calcium est effectuée lors du traitement de l'acier liquide en poche pour contrôler la morphologie des inclusions.
- ✓ Le vanadium et le titane précipitent à plus basse température, participent ou durcissement final de la ferrite.

Chacun de ces éléments a un rôle vis-à-vis du durcissement par solution solide ou par précipitation.

2) Caractérisation et Propriétés

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

Pour répondre à ces exigences la classe des aciers dits (HSLA) (High Strength Low Alloy Steels) a été développée au fil des quarante dernières années[7]. Ces aciers à bas teneur en carbone et micro-alliés dont la microstructure ferrito-perlitiques ou ferrito-bainitiques (ont connus des progrès considérables liés au développement des schémas de traitements thermo-mécaniques de laminages à température contrôlée. 95% des aciers utilisés pour les gazoducs sont des aciers micro-alliés à haute résistance (HSLA). (La figure 1.3) illustre les différentes propriétés d'emploi à concilier pour les aciers HSLA pour gazoducs. (La figure 1.4) montre l'effet de la taille du grain ferritique sur la limite d'élasticité et la température de transition. Pendant que la limite d'élasticité augmente avec la diminution de la taille du grain, la température de transition prend le sens inverse pour augmenter.

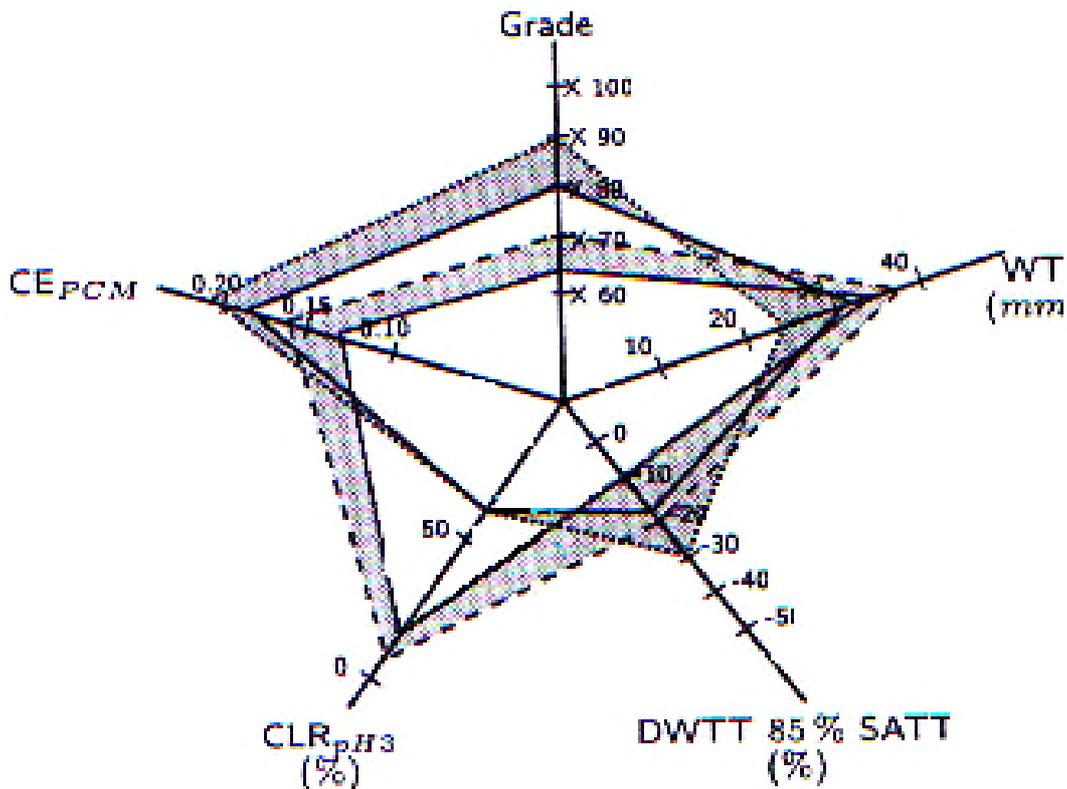


Figure 1.3 : Exemple de propriétés à concilier dans un acier HSLA. [8]

Grade : limite d'élasticité ; WT : wallthickness ; épaisseur ; DWTT : 85% température de Transition à 85 % de rupture ductile (c°) ; CLR : indice de résistance au test Hic (%) ;

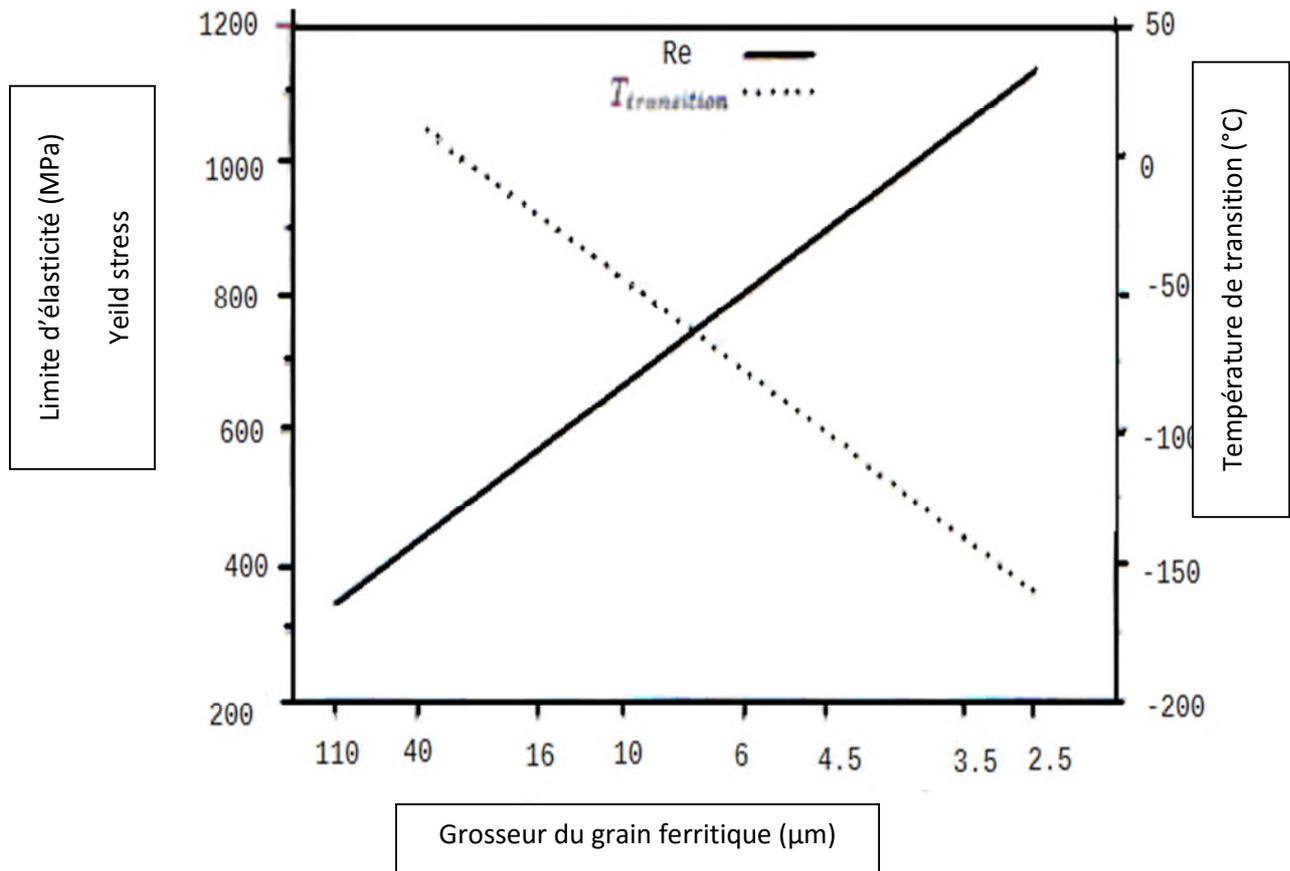


Figure 1.4 : Effet de la taille du grain ferritique sur la limite d'élasticité et la température de transition (acier à 0.1 % C, 0.5 % Mn, 0.2 % Si, 0.006%N, d'après IRVINE. [9])

Cependant, pour arriver aux propriétés requises par les gazoducs, différents mécanismes peuvent être employés pour parvenir à satisfaire les exigences d'un gazoduc, et encore l'impact sur la ténacité et les autres propriétés. Dans ce qui suit, nous développons quelques principaux mécanismes d'amélioration des propriétés du matériau.

Propriétés des aciers, Ils ont un module de Young d'environ 210 GPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermomécanique et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis.

Le traitement thermomécanique est l'association :

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

Le traitement de surface consiste à modifier la composition chimique ou la structure d'une couche extérieure d'acier. Cela peut être :

- une réaction en phase liquide (chromatation, carburation, nitruration en bain de sel, galvanisation...);
- une réaction en phase gazeuse (nitruration en phase liquide);
- une projection d'ions (implantation ionique);
- un recouvrement (peinture, zingage).

Les aciers sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques ou des agressions chimiques ou une combinaison des deux.

Pour résister à ces sollicitations et/ou agressions, des éléments chimiques peuvent être ajoutés en plus du carbone. Ces éléments sont appelés éléments d'additions, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo).

Les éléments chimiques présents dans l'acier peuvent être classés en 3 catégories :

- Les **impuretés**, originellement présentes dans les ingrédients de haut fourneau qui serviront à produire la fonte qui servira à fabriquer l'acier. Ce sont le soufre (S) et le phosphore (P) présent dans le coke mais aussi le plomb (Pb) et l'étain (Sn) qui peuvent être présent dans les aciers de récupération ainsi qu'un tas d'autres éléments à bas point de fusion comme l'arsenic (As), l'antimoine (Sb),
- Les **éléments d'addition** mentionnés plus haut et qui sont ajoutés de manière intentionnelle pour conférer au matériau les propriétés recherchées, et enfin
- Les **éléments d'accompagnement** que l'aciériste utilise en vue de maîtriser les diverses réactions physico-chimiques nécessaires pour obtenir en final un acier conforme à la spécification. C'est le cas d'éléments comme l'aluminium, le silicium, le calcium.

3) Caractéristiques des aciers API :

Ces aciers sont produits dans le plus grand respect des normes de qualité afin de satisfaire aux cahiers des charges les plus sévères. La norme de référence est le standard API 5L (American Petroleum Institute).

Ils permettent de satisfaire à des exigences particulières, comme la résistance à la fissuration par l'hydrogène (HIC) ou une haute ductilité à basse température.

Les principales caractéristiques des aciers pour tubes d'Arcelor Mittal sont leur très haute résistance à la rupture et leur excellente ténacité à très basse température pour les aciers de forte épaisseur. De plus, ces qualités présentent une bonne aptitude au soudage, obtenu grâce à une composition chimique adaptée (valeur particulièrement basse de leur carbone équivalent). La

régularité des caractéristiques mécaniques des aciers d'Arcelor Mittal destinés à la fabrication de gros tubes soudés facilite les opérations de formage et de soudage.

Le tableau 1.1 rassemble les propriétés mécaniques minimales requises pour les pipelines en acier. Un gazoduc est une structure dont l'intégrité doit être garantie. En particulier, pour éviter tout amorçage de rupture, le dimensionnement de la structure est effectuée pour travailler dans le domaine élastique avec un coefficient de sécurité adéquat, ce qui autorise une taille critique de défaut

Tableau 1-1 : Caractéristiques mécaniques requises des pipelines en acier de grade API [4].

	Direction	Epaisseur (mm)	R _e (MPa)	R _m (MPa)	A ₅₀ (%)	KV 0°C (J)	DWTT 10°C (%)
Grade B AFCS	T	5 - 20	241 - 448	414 - 758	≥ 28,8	≥ 27	≥ 100
X42 AFCS	T	5 - 20	290 - 496	414 - 758	≥ 28,8	≥ 27	≥ 100
X46 AFCS	T	5 - 20	317 - 524	434 - 758	≥ 27,5	≥ 27	≥ 100
X52 AFCS	T	5 - 20	359 - 531	455 - 758	≥ 26,4	≥ 40	≥ 85
X56 AFCS	T	5 - 20	386 - 544	490 - 758	≥ 24,7	≥ 40	≥ 85
X60 AFCS	T	5 - 20	414 - 565	517 - 758	≥ 23,5	≥ 40	≥ 85
X65 AFCS	T	5 - 20	448 - 600	531 - 758	≥ 23	≥ 40	≥ 85
X70 AFCS	T	5 - 20	483 - 621	565 - 758	≥ 21,7	≥ 40	≥ 85
X80 AFCS	L	5 - 14	-	-	-	≥ 40	-
	T	5 - 14	552 - 690	621 - 827	≥ 20	-	≥ 85

4) Ténacité

❖ Température de transition

La première caractéristique de la ténacité d'un acier est la température de transition, ductile – fragile, où l'on cherche à diminuer celle-ci pour privilégier le domaine ductile ou la ténacité est bien meilleure.

Une microstructure fine permet de diminuer la température de transition, La loi de Hall et Petch, permet de relier la contrainte de clivage à la taille de grain qui conduit à une diminution de la température de transition par affinement du grain ferritique, selon (Pickering 1992). Le coefficient de proportionnalité du grain ferritique dans la relation de Cottrell-Petch se situe aux alentours de 12 :

$$T(C^0) = T_0 - 11,5.d^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

La figure 1.5 exprime tout le gain obtenu par affinement de la taille de grain sur la limite d'élasticité et la température de transition. Le taux de perlite a pour sa part un effet néfaste sur la température de transition car les nodules de cémentite constituent des amorces possibles de rupture fragile. La morphologie de la perlite (taille des ilots et espacement inter-lamellaires) a également une influence notable sur les propriétés de traction au niveau ductile.

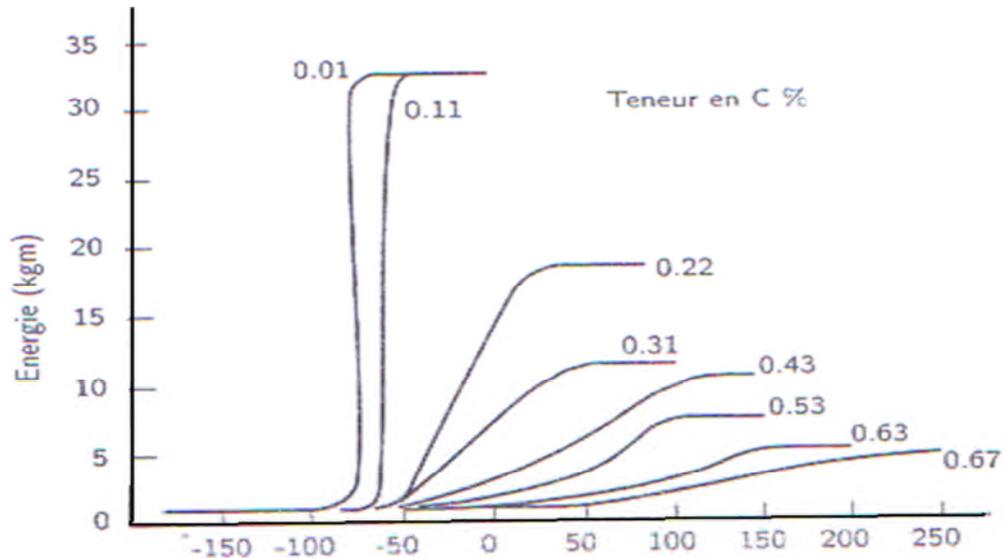


Figure 1.5 : effet du taux de carbone sur la courbe de transition Charpy des aciers ferrito – perlitiques [10].

Tous les autres procédés de durcissement – précipitation et solution solide, ont pour effet d'augmenter la température de transition; seuls le manganèse, le nickel et l'aluminium peuvent dans une certaine mesure diminuer la température de transition par des effets secondaires. Le manganèse affecte la taille des carbures présents aux joints de grain, sites d'amorçage du clivage. L'effet bénéfique de l'aluminium intervient à de très faibles quantités par le piégeage de l'azote libre en solution solide; à des teneurs plus élevées, il augmente la température de transition comme tous les autres éléments contribuant au durcissement par solution solide (Si, Cu, Mo ...).

❖ Résilience au palier ductile

L'influence de la propreté inclusionnaire sur les propriétés de rupture ductile n'est plus à démontrer parce qu'elle constitue des sites privilégiés d'endommagement par germination de micro-cavités qui ont un rôle néfaste sur la tenue à la rupture ductile. Les deux manifestations les plus évidentes de ce rôle sont une chute de la résilience et de la ductilité en traction. Les inclusions sont généralement des oxydes (Al_2O_3 , MgO , CaO ,...) ou des composés formés à partir d'impuretés (S).

Une diminution de la taille des inclusions jusqu'à environ 5 μm entraîne une augmentation de la ténacité pour des tailles inférieures. L'effet semble moins marqué selon Baker [10]

La présence d'inclusion de type MnS allongées par le laminage est à l'origine d'une anisotropie des propriétés de rupture (résilience et ductilité). En effet on retrouve ce type d'inclusion sous forme de plaquettes allongées dans la direction de laminage, leur section apparente est plus élevée dans un plan longitudinal que dans un plan transversal. La résilience dans la direction travers des tôles est généralement plus faible que dans la direction de laminage comme illustré sur la Figure 1.6.[11]

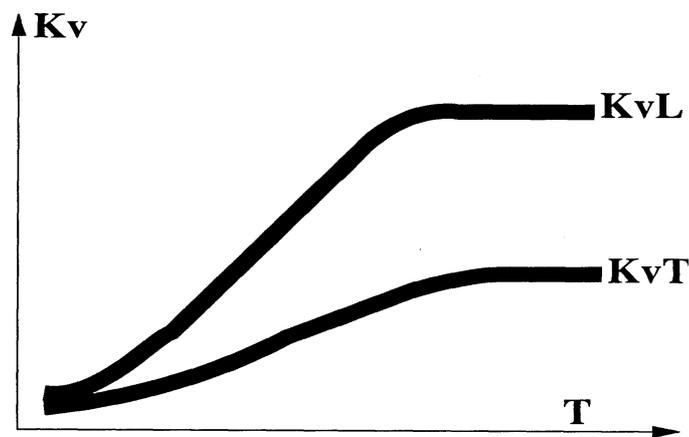


Figure 1.6 : Résilience au niveau du palier ductile causé par l'allongement des

5) Soudabilité

Compte tenu du procédé de fabrication d'un gazoduc, les propriétés de soudabilité de l'acier sont très importantes. Elles seront meilleures si la teneur en carbone est faible. Le rôle des autres éléments d'alliages n'est cependant pas négligeable.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn+Si}{6} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5} \quad (1.2)$$

Les propriétés de soudabilité sont meilleures si ce paramètre C_{eq} est plus faible. Ceci explique l'évolution des aciers pour tubes, constatée au cours des 40 dernières années et présentée dans un diagramme (C, C_{eq}), figure 1.7. Aujourd'hui, la plupart des aciers utilisés pour fabriquer des tubes ont une teneur en carbone de l'ordre de 0.05 %.

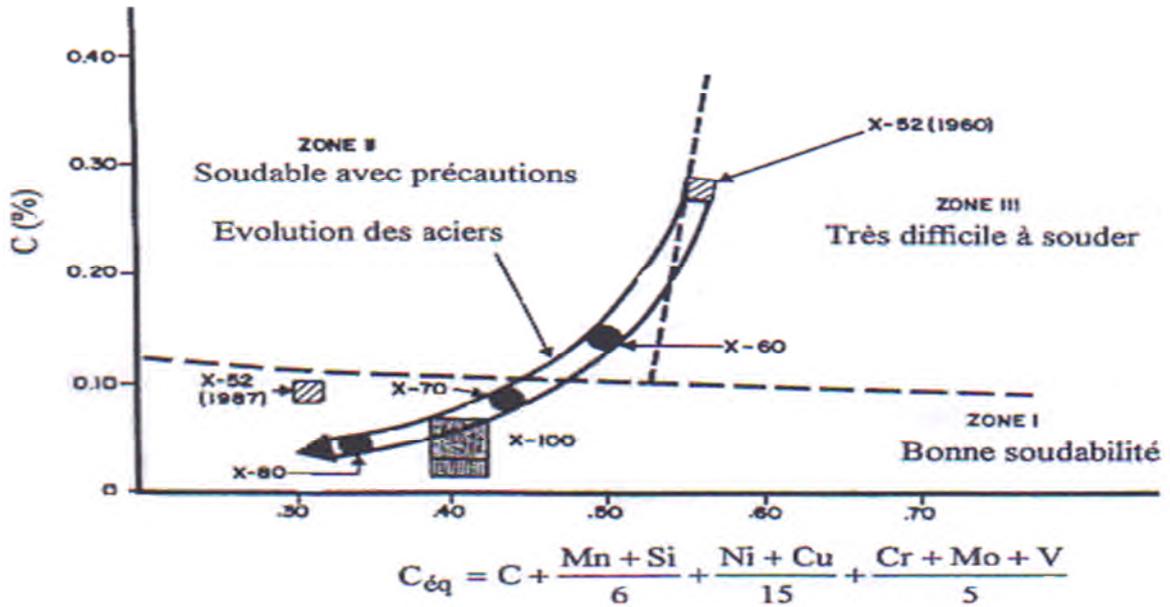


Figure 1.7 : Evolution des compositions des aciers pour tubes en fonction de la soudabilité [12].

A l'exception des tubes sans soudure, tous les aciers sont soudés deux fois, une fois lors de leur fabrication, une deuxième fois à la pose : la soudabilité est donc le deuxième critère de choix, après la résistance mécanique. L'acier doit donc posséder d'excellentes caractéristiques de soudabilité.

Ceci suppose, non seulement, un carbone équivalent bas, mais également une grande régularité au point de vue des analyses chimiques visées, dans la fourchette fixée. Nous donnons en rappel la formule du $C_{\text{éq}}$ la plus utilisée : formule de IIS (l'Institut International de la Soudure)

Une autre formule d'essence japonaise s'appliquerait à un large éventail de nuance d'acier à haute limite d'élasticité à plus bas carbone (cas des aciers pour tubes) [13]

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (1.3)$$

L'acier doit être soudable par une technique simple et le pipeline posé, doit avoir aussi peu de défauts que les normes de sécurité autorisent, le tout à un coût économique. La définition de la qualité est basée souvent sur les normes API (5 L, 1104) [14]. Le coût et la durée de l'opération doivent être vus sous l'angle de la vitesse de pose. Il est actuellement devenu nécessaire d'optimiser la composition chimique de l'acier et le traitement thermomécanique, afin de le rendre insensible à la fissuration et d'augmenter sa ductilité. En effet, une rupture accidentelle de conduite peut causer un accident très grave. C'est ainsi que, dans le but de garantir la sécurité

vis-à-vis de la rupture fragile, les spécifications des gazoducs exigent des tests de résilience non seulement pour le métal de base mais également pour la zone soudée.

Pour résumer, dans le cas des pipelines, deux exigences techniques et économiques influencent le soudage :

- remplir les normes de qualité et de sécurité (exigences des utilisateurs et codes de construction).
- coût et durée de l'opération (productivité de la pose).

I.4 Défaillances des aciers de pipelines

I.4.1 Définition

La notion de défaillance selon la norme NFX60-010 (AFN88) stipule que toute cessation de l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise est une défaillance. [4]

Toute défaillance qui se trouve sur un chemin critique ou sous une critique de sécurité ; de production ou de qualité ; devra faire l'objet d'une action de maintenance.

Cause de défaillances : circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance.

Mécanisme de défaillances : processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance.

Mode de défaillance : effet par lequel une défaillance se manifeste, soit en mode cataleptique ou en mode progressive.

Panne : état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise.

Dégradation : évolution irréversible des caractéristiques d'un bien liée au temps ou à la durée d'utilisation.

- Degré (partielle, complète, intermittente).
- Vitesse d'apparition (défaillance soudaine et défaillance progressive).

Les modes de défaillances peuvent être par :

- Action chimique de corrosion sous différentes formes : localisée, sous contraintes : par effet hydrogène...
- Action mécanique
- Action thermique
- Physique par rayonnement ou par irradiation

La norme NF X 60-011 propose plusieurs mises en famille des défaillances :

- Suivant leur cause :
 - **Défaillances de causes intrinsèques** : défaillances dues à une mauvaise conception du bien, à une fabrication non conforme du bien ou à une mauvaise installation du bien. Les défaillances par usure (liées à la durée de vie d'utilisation) et par vieillissement (liées au cours du temps) sont des défaillances intrinsèques.
 - **Défaillance de causes extrinsèques** : défaillances de mauvais emploi, par fausses manœuvres, dues à la maintenance, conséquences d'une autre défaillance.
 - **Suivant leur degré** : défaillance complète, partielle, permanente, fugitive, intermittente, etc.
 - **Suivant leur vitesse d'apparition** : soudaine ou progressive

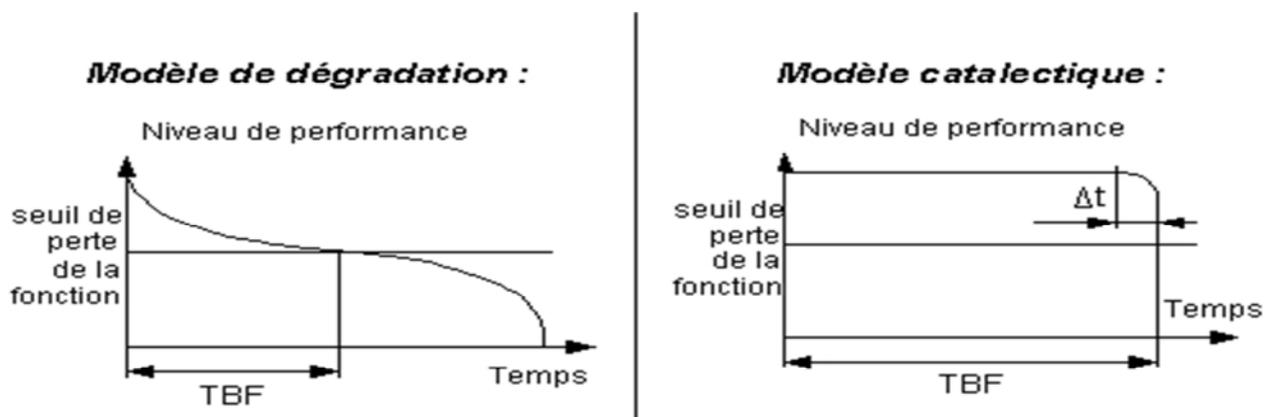


Figure 1.8 : Exemples des Modèles de dégradation [15]

I.4.2 Défaillances mécaniques

I.4.2.1 Défaillances par fissuration

La fissuration est un défaut ou une discontinuité brutale apparue ou apparaissant dans un matériau sous l'effet de contraintes interne ou externe, où la matière est séparée sur une certaine surface.

Tant que les forces de contraintes ne sont pas libérées, elle entraîne une grande concentration de contrainte à son fond.

Sa propagation, sous l'effet de contraintes suffisantes, combinée ou non avec un environnement agressif (corrosion sous contrainte) mène à la rupture.

I.4.2.2 Défaillances par déformation

Tout solide auquel est appliqué un effort mécanique se déforme. Différents essais de laboratoire (traction, compression, torsion...) permettent d'étudier les modes de déformation des matériaux

d'un point de vue macroscopique et phénoménologique, et de déterminer leurs lois de comportement. Lors de tels essais, tant que le matériau est soumis à une contrainte inférieure à une valeur spécifique (appelée limite d'élasticité), il va se comporter de manière réversible : si l'on effectue une décharge (annulation de la contrainte appliquée), le matériau recouvre sa forme initiale. A l'inverse, si l'on contraint le matériau au-delà de sa limite d'élasticité, une déformation persiste après la décharge : c'est la déformation plastique (figure 1.8). La déformation plastique est donc (essentiellement) irréversible. En général, elle est isochore : le volume de l'objet qui se déforme est inchangé tout au long du processus de déformation plastique.

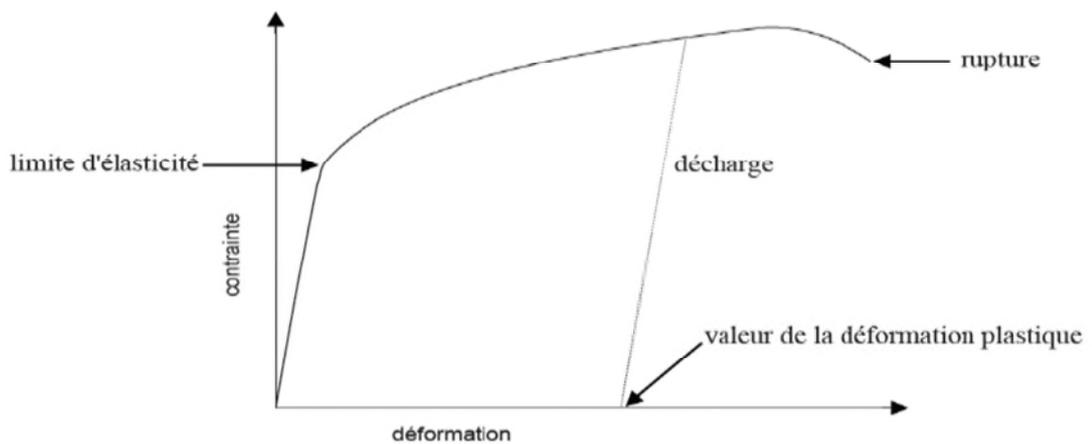


Figure 1.9 : Schéma d'une courbe de traction.

Déformations plastiques sous contrainte mécanique : dues à un dépassement de la limite élastique R_e du matériau. Une inspection des pièces vérifiant l'apparition d'une zone de striction peut prévenir le risque d'une rupture prochaine. Déformation plastique sous contrainte thermique et dans le temps : c'est le fluage qui est une déformation apparaissant sous contrainte mécanique associée à des températures de services supérieures à 40% de la température de fusion.

1.4.3 Défaillances par corrosion :

Selon le point de vue de l'ingénieur constructeur, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par réaction chimique avec l'environnement, tandis qu'en terme plus général, la corrosion est synonyme de rouille ou de ternissement.

Cependant, la corrosion peut se traduire sous de nombreuses formes, dont la rouille des aciers plats alliés et le ternissement d'une surface (argenté par exemple), ne sont que des cas particulier,

les produits de corrosion ne sont pas toujours observés et on peut avoir des ruptures complètes de pièces sans pouvoir relever de pertes en poids appréciables.

Il est de pratique courante de classer les nombreux incidents dus à la corrosion en fonction de l'aspect du dommage observé soit à l'œil nu, soit avec examen micrographique.

Ces différents modes (formes) ne sont pas toujours indépendants les uns des autres. Certains peuvent se développer de façon simultanée sur la même pièce.

La corrosion a affecté les réseaux de transport des produits pétroliers et gaz naturel et on a estimé que 10 % des accidents de conduites de gaz naturel sont causés par la corrosion.

L'historique de ces accidents permet de mieux préciser la nature des problèmes qui peuvent survenir et ainsi que d'établir les scénarios d'accident qui seront utilisés dans l'analyse de risques. Ils peuvent aussi servir à améliorer la conception de réseaux, le revêtement et la construction de pipeline.

La corrosion des matériaux métalliques se justifie qu'on lui accorde car :

- Les métaux et les alliages sont de plus en plus employés dans les domaines de la technologie.
- On estime que la corrosion des matériaux métalliques et les mesures anticorrosion coûtent des millions de dinars par an (revêtement en place, aviat de production, échange du matériel corrodé) il faut y ajouter les dommages corporels et les maladies

I.4.3.1 Défaillances par piqûres (pitting corrosion)

C'est la forme de défaillances de surface la plus destructive, de forme localisée peut progresser très rapidement, en profondeur, alors que le reste de la surface reste indemne. L'installation peut-être perforée en quelques jours sans qu'une perte en poids appréciables de l'ensemble de la structure n'apparaisse. Le fer, le chlore, le cobalt, le cuivre, l'aluminium et leur alliage et les aciers inoxydables en particulier sont sensibles à la corrosion par piqûres. Elle s'effectue par mécanisme électrochimique en présence des solutions de chlorures, bromures, hypochlorites ou thiosulfates. La présence d'un cation oxydant (Fe^{3+} ; Cu^{2+} ; Hg^{2+}) permet la formation des piqûres en absence d'oxygène.

Le phénomène de corrosion par piqûres n'est pas encore complètement élucidé. Cependant le processus comprend deux étapes :

- Initiation
- Propagation

Initiation de la piqûre

Toutes imperfections de l'état de surface (rayures, crevasse, dépôts provenant de la solution, aération différentielle, etc.) peut provoquer l'initiation d'une piqûres (amorce) dans la mesure où elle introduit une hétérogénéité physique ou chimique favorisant l'apparition de zone anodiques est cathodique bien caractérisées.

Une surface rugueuse qui de plus favorise les dépôts de produits divers possède une plus grande susceptibilité à la corrosion par piqûres d'une surface polie.

La géométrie de la piqûre est fonction des solutions denses, concentrées et des produits de corrosion. Elle croit et se propage généralement dans le sens de gravité.

L'initiation de la piqûre consiste en une rupture locale de la couche protectrice [ou film de passivité], cette période d'incubation ; d'une durée variable dépend de nombreux paramètres dans la stabilité ou rigidité de reconstitution de la couche passive dans le milieu environnant.

Les caractéristiques physico-chimiques des ions agressifs sont importantes puisque celle-ci (faible diamètre, mobilité, caractère polaire). Sont d'autant plus marqués que l'ion est dangereux : dans l'ordre croissant : NO_4^{2-} , F^- , Br^- , Cl^- , I^- . Ces ions agressifs s'absorbent (préférentiellement à O_2 ou OH^-) dans la couche passive en modifiant localement celle-ci.

Il peut participer ainsi à des réactions d'hydrolyse au cours desquelles l'acide correspondant apparaît. Cette augmentation de l'acidité favorisait la dissolution locale de la couche passive.

Les piqûres mettent parfois plusieurs mois ou années avant d'apparaître dans les installations en service.

Ceci rendent délicats les interprétations de tout essai de laboratoire, qu'il est classique (immersion dans un milieu agressifs essai chimique) ou qu'il fasse appel à des techniques électrochimiques (essais électrochimiques : indiquant le potentiel de piqûres lors d'une polarisation anodique. Pour ces raisons, en caractérisée le degré d'attaquer par :

- Coefficient de piqûration F_p définie par :

$$F_p = \frac{L_{\max}}{L_{av}} \quad (1.4)$$

L_{\max} : profondeur maximale de pénétration mesurée à l'aide d'un microscope optique.

L_{av} : profondeur moyenne de dissolution déterminée par perte de poids.

La nécessité pour commencer une piqûre lorsque la solution est désaérée est d'avoir un cation oxydant, alors en solution aérée, l'oxygène et l'espèce réduite.

- Propagation de la piqûre

Une concentration élevée en $M^+ Cl^-$ entraîne une réaction d'hydrolyse qui s'accompagne d'une modification de pH.



Les ions H^+ et Cl^- sont connus pour accélérer le processus de corrosion de la plupart des métaux.

D'autre part, la solution étant localement plus concentrée dans la piqûre, la concentration en oxygène est plus faible : la réaction cathodique [B]. (Réaction de O_2 en OH^-) s'effectue préférentiellement sur les régions adjacentes qui sont ainsi protégées cathodiquement.

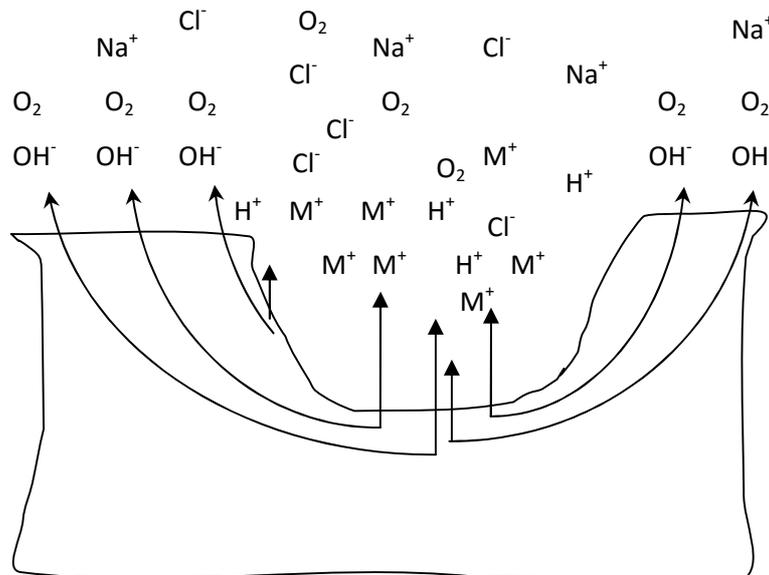


Figure 1.10: Processus auto - catalytique de propagation d'une piqûre.

La corrosion par crevasse est une autre forme de la corrosion par piqûres. Si tous les matériaux sensibles à la piqûre sont aussi sensibles à la crevasse, l'inverse n'est pas toujours vrai. La piqûre

s'initie seule, sur une surface propre, sans présence préalable d'une crevasse, ce qui n'est pas le cas de la crevasse proprement dite.

I.4.3.2 Défaillances par corrosion sous contrainte CST:

On définit ce type de corrosion, comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à rupture complète de la pièce (sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif) (réaction électrochimique). Ce sont les contraintes de tension qui sont dangereuses ; les contraintes de compression exerçant au contraire une action protectrice. Les pertes en poids sont très faibles par analogie avec la corrosion par piquûre

Les types de fissures dépendent du couple (alliage -- solution), ils peuvent être :

- ❖ Intergranulaire (se propager le long des joints de terrains).
- ❖ Transgranulaire (progresses à travers les grains).
- ❖ Mixtes (rarement)

Les contraintes de tension qui peuvent être de natures très diverses :

-- trentaine de sévices : de pression ou du à un des gradients thermiques (dilatation des contractions hétérogènes).

-- contraintes dues au mode de jonction : brassage, rivetages, sertissage, filetage, soudage.

-- contraintes dues aux procédés d'élaboration ou de mise en forme : forgeage, laminage, étirage, emboutissage, torsion, pliage, dudgeonnage, usinages divers,...

-- contraintes internes : dues à des transformations métallurgiques et avec chargements de phase, (fer γ (c.f.c) \leftrightarrow fer α (c.c) ; titane α (Hexagonal) \leftrightarrow Titane β (c.c).

L'expérience montre que le temps avant rupture est d'autant plus faible que les niveaux de la contrainte est plus élevé. Le seuil de contraintes est très faible.

En pratique, la CST constitue un risque permanent pour les installations industrielles et les ouvrages de pipelines. Les matériaux comme le verre, les matières plastiques et le caoutchouc sont sujets, à la CST. Les mécanismes d'initiation et de propagation des fissures ne sont pas bien expliqués.

Tableau 1.2 : Principaux couples métal/solution pour lesquels la CST peut apparaître.

Matériaux	Milieu corrosif	Types de fissuration
Aluminium et Alliage	solutions chlorurées en général, l'air, vapeur d'eau, l'eau de mer	régions adjacentes aux joints de grains I
Alliage de Magnésium	H ₂ O Distillée, Cl ⁻	T ou I
Laitons (70Cu - 30Zn)	vapeur et solutions ammoniacales, amines	T a bas pH I en solution neutre (season cracking)
Acier ordinaire	solution de soude, solution de nitrates de Ca, de NH ₄ ⁺ et de sodium (engrais), mélanges acides (H ₂ SO ₄ -HNO ₃), eau de mer	I
Alliage de titane	acide nitrique fumant Cl ⁻ , méthanol-HCl, N ₂ O ₄	T et I
Alliages de Nickel	soude l'eau et vapeur d'eau à haute température	-
Alliages d'Or	solution FeCl ₃ acide acétique	-
Acier Inoxydable	solution acide chlorurée (MgCl ₂ -BaCl ₂) solution chaude chlorurée (fertilisants chlorés, détergents français...), eau de mer	T I (principalement) T et I -

T : transgranulaire

I : intergranulaire.

Le temps nécessaire à la rupture d'une pièce par corrosion sous tension peut varier de quelques minutes à quelques années. Pour certains alliages, il existe une période d'incubation due par exemple à des phénomènes de vieillissement : les alliages Al-Mg (7 % Mg) deviennent de plus en plus sensibles à la CST, lorsque le vieillissement augmente.

Aucun mécanisme proposé actuellement ne permet d'apporter une réponse entièrement satisfaisante à la question :

Comment un matériau normalement (ductile) peut-il devenir (fragile) sous l'action combinée d'une contrainte mécanique (incapable à elle seule de rompre le matériau) et d'un milieu généralement non ou peu corrosif ?

L'interprétation du processus de propagation de la fissure dépend pour chaque auteur de l'importance qu'il accorde aux différents facteurs. Les divergences sont donc nombreuses.

On relève schématiquement :

-- des théories purement électrochimiques :

La propagation se poursuit par dissolution anodique rapide du front de la fissure, mis à nu la rupture du film d'oxyde (ou film passif). Sur les flancs de la fissure, le film reste stable.

-- des théories purement mécaniques :

La fissuration progresse par (saut) par suite de la rupture locale de type fragile du matériau due à la absorption de l'un des constituants du milieu agressif à fond de fissures provoquant la diminution de l'énergie de liaison des atomes sous-jacents. L'extension rapide de la fissure serait favorisée par l'augmentation de la concentration des contraintes à la pointe de celle-ci lorsqu'elle progresse.

Théories relevant d'un processus électrochimique -- mécanique alterné (ou mécano-chimique)

Une étape lente de dissolution électrochimique locale est alors nécessaire pour permettre la propagation de la fissure pas une autre étape de rupture mécanique. Quoi qu'il en soit, l'observation des faciès des cassures montre l'apparition de deux zones :

- ✓ Une zone de rupture fragile provoquée par le développement des fissures.
- ✓ Une zone non attaquée ou est intervenue la rupture finale du métal lorsque les contraintes appliquées ont dépassé la limite de résistance à la rupture du matériau. Cette zone a un aspect plus ou moins ductile selon la nature de la structure du matériau.

I.4.3.3 Défaillances par corrosion fatigue :

La corrosion -- fatigue (ou sous fatigue) se distingue de la CST par le fait que les contraintes appliquées ne sont plus statiques mais cycliques (efforts périodiques alternés). Dans le cas des aciers, la limite de fatigue classique relevée sur les courbes S-N (contraintes -- nombres des cycles) n'existe plus lorsque l'essai est effectué dans un milieu corrosif (figure 1.10) ; quel que soit le niveau de contraintes, la rupture va s'effectuer pour un nombre déterminé de cycles

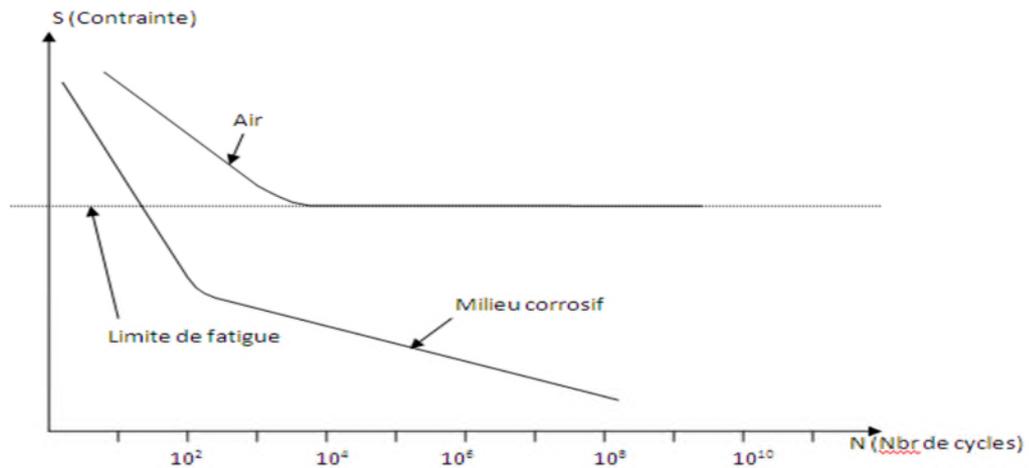


Figure 1.11: Courbe schématiques de fatigue et de corrosion -- fatigue pour les aciers

La corrosion--fatigue augmente lorsque la fréquence des cycles diminue. Les fissures sont de type transgranulaire avec généralement peu d'embranchement secondaire, quelques petites fissures peuvent apparaître au voisinage de la fissure principale.

Le fond des piqûres agit comme un facteur de concentration de contraintes ; les fissures de corrosion -- fatigue s'amorcent souvent à partir d'une piqûre. La teneur en oxygène du milieu, sa température, son acidité, sa composition, ont une grande influence sur la sensibilité d'un matériau à la corrosion -- fatigue.

Les alliages à haute résistance mécanique sont souvent les plus sensibles.

La corrosion--fatigue peut être éliminée ou réduite en diminuant les contraintes soit :

- Par un recuit de détente.
- En modifiant la conception de l'appareil.
- Et par des traitements mécaniques Le grenailage, qui introduit des contraintes superficielles de compression.

Les inhibiteurs de corrosion (exemple : $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dans le cas de l'acier) sont très efficaces.

I.4.4 Dynamique de l'usure:

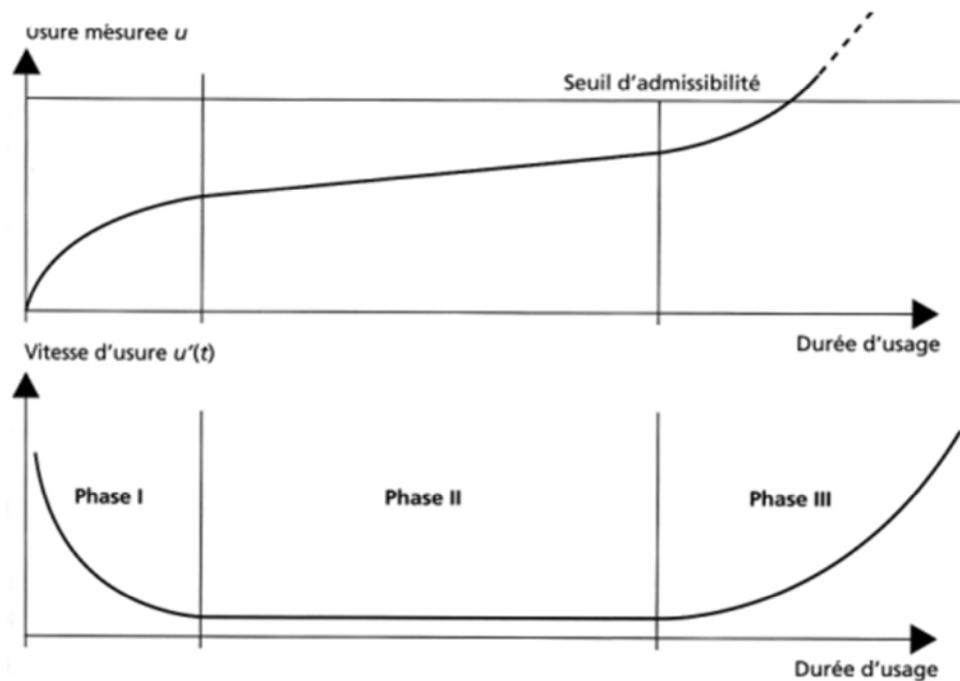


Figure1.12 :Dynamique de l'usure des lois de dégradation [15]

A partir de 2 surfaces initiales :

- La phase I est constituée de l'abrasion des principales aspérités : c'est la période de rodage affectant les ondulations et la rugosité liées au mode d'obtention.
- La phase II est constituée d'une usure stable, linéaire dans le temps. L'usure est reportée principalement sur l'une des surfaces de contact.
- La phase III, dite usure catastrophique, consiste en émissions particulaires ; débris engendrant un labourage de la surface la plus tendre et une dégradation rapide.

L'analyse des lubrifiants met en évidence cette succession de phases en caractérisant le nombre et la taille croissante des particules métalliques libérées.

I.5.Modèles Mathématiques d'expression de la durée de vie

I.5.1.Introduction

Nous présenterons quelques lois de distributions qui interviennent dans l'analyse des données dans une étude de fiabilité.

Nous citerons les principales propriétés de ces lois (densité, fonction de fiabilité, taux de Défaillance et durée de vie).

I.5.2.Durée de vie et défaillance

La durée de vie de l'ouvrage étudié de pipeline comme tout autre équipement ou ouvrage est défini principalement par les défaillances et le mode de leur apparition. La durée de vie est défini par la courbe baignoire de l'ouvrage considéré (figure 1.12) et qui se compose de trois périodes :

- ✓ **Période des défaillances précoces** : caractérisée par la mise en service de l'ouvrage et par une pré-usure. Cette période est appelée également période de jeunesse.
- ✓ **Période des défaillances aléatoires** : caractérisée par la durée de vie utile et de rendement optimal. Le taux de défaillance est constant et les défaillances peuvent apparaître sans dégradation visible ou par différents causes suivant un processus probabilistique. L'évaluation de la durée de vie peut se faire par approche selon des modèles différents. Nous reviendrons sur ce point car il constitue une étape importante dans ce travail. Cette période est appelée période de maturité.
- ✓ **Période de défaillances d'usure** : caractérisée par l'usure de l'ouvrage. Le taux de défaillance est défini par un seuil. Les défaillances apparaissent suivant un mode visible et une dégradation accélérée. C'est la période déterminée par l'apparition de toute forme de défaillances. Pour l'ouvrage étudié cette période est caractérisée par une dégradation de l'état de surface de l'acier et l'apparition des piqûres de corrosion à des profondeurs différentes ou des fissures qui peuvent se propager et entraîner une rupture de l'exploitation. Cette période est appelée également période d'obsolescence ou de vieillesse pouvant aboutir au déclassement du tube.

La notion de défaillance est définie par la norme X60-010 (AFN88) qui stipule que toute cessation de l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise est une défaillance.

Les défaillances de l'acier qui peuvent se développer en surface sont principalement les piqûres de corrosion ou les fissures provenant d'un mauvais état de surface. Ce qui explique la complexité du mode de dégradation par corrosion localisée et piqûres, corrosion sous contrainte, par fatigue, par les sols, corrosion microbienne, par fragilisation ...

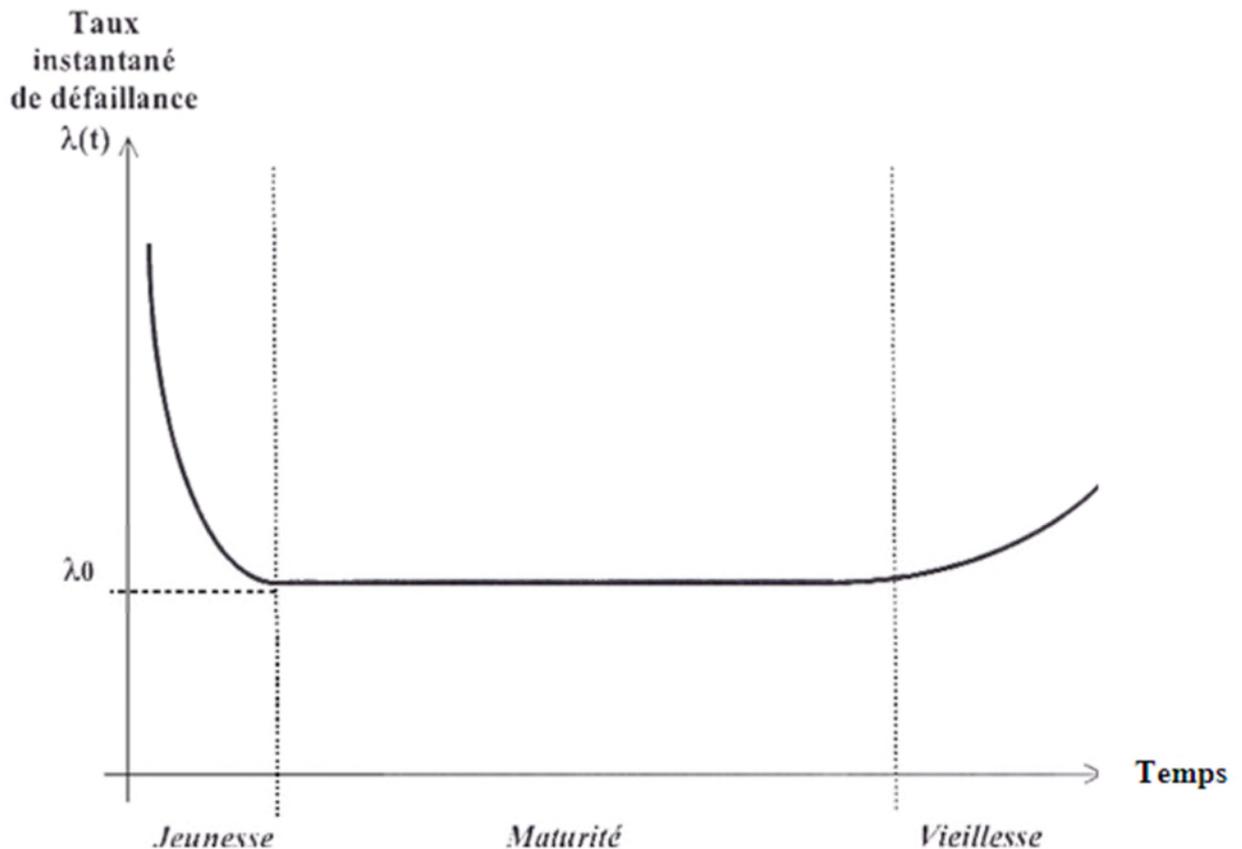


Figure 1.13 : Courbe de durée de vie de l'ouvrage étudié [15]

Cette courbe représente l'évolution du [taux de défaillance instantané](#) en fonction du temps.

Cette courbe se divise en 3 parties: jeunesse, maturité et vieillesse du système.

La jeunesse qui correspond à la période proche de la mise en fonctionnement possède une probabilité importante de défaillances: les causes possibles sont un défaut de fabrication, la mise en place des réglages et des corrections...

La maturité qui correspond à la période où le système est arrivé en période de fonctionnement normal et dont l'usure ne se fait pas ressentir possède la plus faible probabilité de défaillance de la vie du système

La vieillesse qui correspond à la période où l'usure commence à être importante et qui voit la probabilité de défaillance augmentée.

Cette courbe montre que les systèmes doivent être surveillés plus attentivement en début et fin de vie afin d'appliquer une maintenance plus réactive.

L'augmentation des défaillances en fin de vie soulève le problème du bon moment pour changer ses équipements, c'est à dire à quel moment il est plus rentable de changer un système au lieu de le maintenir sachant tous les problèmes que peut causer la mise en fonctionnement d'un nouveau système notamment en terme d'intégration et de gestion de la production.

I.5.3. Durée de vie et fiabilité

On définit la fiabilité comme une caractéristique des dispositifs ou des ouvrages à exprimer par une probabilité à accomplir une fonction requise dans les conditions d'utilisation et pour période de temps déterminé. (Norme AFNOR X 06-501 du 2 novembre 1977)

Nous avons quatre concepts dans la définition :

- ✓ Probabilité
- ✓ Fonction requise
- ✓ Conditions d'utilisation
- ✓ Période

La probabilité d'un événement E est obtenue :

- Soit par le dénombrement et ainsi à la probabilité :

$$P(E) = \frac{\text{Nombre de cas favorable}}{\text{Nombre de cas possible}} \quad (1.5)$$

C'est la probabilité vraie de l'événement (E). La difficulté est notamment d'avoir accès à ce décompte.

- Soit de façon expérimentale :

$$P(E) \approx F(E) \quad (1.6)$$

F(E) est la fréquence observée de l'événement E plus le nombre d'observations est grand, plus cette fréquence se rapproche de la probabilité vraie d'avoir E.

$$0 \leq P(E) \leq 1$$

La fonction requise : c'est accomplir une mission.

Les conditions d'utilisation : c'est-à-dire les conditions d'exploitation l'environnement, contraintes mécaniques, chimiques, physique,....

La période de temps : c'est la durée des missions en unités d'exploitation.

Il est possible de définir la fiabilité par plusieurs paramètres :

- ✓ Taux de défaillance $\lambda(t)$: est un estimateur de la fiabilité. En effet, il représente une proportion de dispositif, survivant à l'instant t.

✓ Fonction de réparation $F(t_i)$: c'est la possibilité pour que le dispositif soit en panne à l'instant t_i).

✓ Probabilité de bon fonctionnement à l'instant t_i symbole R

$R(t_i)$: l'anglais "reliability" qui signifie "fiabilité".

On définit la fiabilité complémentaire :

$$F(t_i) + R(t_i) = 1 \quad (1.7)$$

✓ MTBF (Mean Time Between Failure) ou moyenne des temps de bon fonctionnement correspond à l'espace mathématique de la variable aléatoire T, date d'apparition d'une panne.

✓ la fonction de distribution :

$$F(t).dt = \text{Prob}[t < T < t+dt]$$

Soit :

T : temps d'apparition d'une panne.

$F(t)$: densité de probabilité.

N_0 : le nombre de tubes fonctionnement à $t=0$.

$N(t)$: le nombre de tubes fonctionnement à l'instant t.

$N(t+\Delta t)$: le nombre de tubes fonctionnements à l'instant $t+\Delta t$.

$$N(t+\Delta t) - N(t) = -\Delta N$$

(Signe négatif car $N(t)$ décroît)

Si Δt tend vers 0, l'estimateur tend vers une limite qui est le taux de défaillance instantané :

$$\lambda(t) = - \frac{dN}{N(t)dt} \quad (1.8)$$

On intègre la fonction (1-8) entre 0 et t :

$$- \int_0^t \lambda(t) dt = \ln N(t) + K$$

$$N(t) = K e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

Pour $t = 0$, $N(t) = N_0$ d'où $K = N_0$

$$N(t) = N_0 e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.9)$$

Cette dernière relation est fondamentale, quelle que soit la loi de fiabilité, elle permet un tracé expérimental de la fiabilité en fonction du temps, les variations du temps de défaillance est encourue.

Si $F(t)$ et la densité de probabilité alors :

$$\lambda(t) = -\frac{F'(t)}{R(t)} \quad (1.10)$$

$$MTBF = \int_0^{\infty} t \cdot F'(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (1.11)$$

On peut estimer la durée de vie par approche probabilistique où trois lois statistiques sont utilisées pour ajuster le phénomène d'apparition de défaillance :

I.5.4. Modèles Mathématiques

I.5.4.1 Loi exponentielle :

a) Cas d'application

Les « courbes en baignoire » font apparaitre une longue période de fonctionnement pendant lequel le taux de défaillance est sensiblement constant.

Pour un système complexe, la courbe en baignoire peut être considérée comme une « ligne de tendance » des formes des défaillances des éléments.

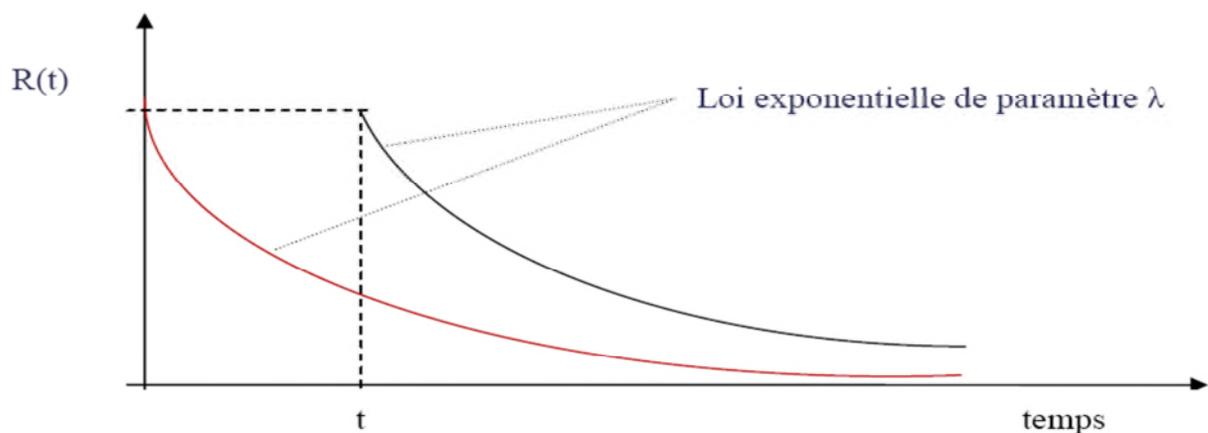


Figure 1.13. Propriétés sans mémoire de la loi exponentielle. [15]

A partir de la loi fondamentale de la fiabilité avec λ constant :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.9)$$

Il vient :

$$R(t) = e^{-\lambda t} = \text{Probabilité de survie entre 0 et } t$$

b) Caractéristique de la loi exponentielle

–Densité de probabilité des défaillances : $f(t)$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1-R(t))}{dt} = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (1.12)$$

Elle représente la probabilité de défaillance entre t et dt .

Allure de la courbe :

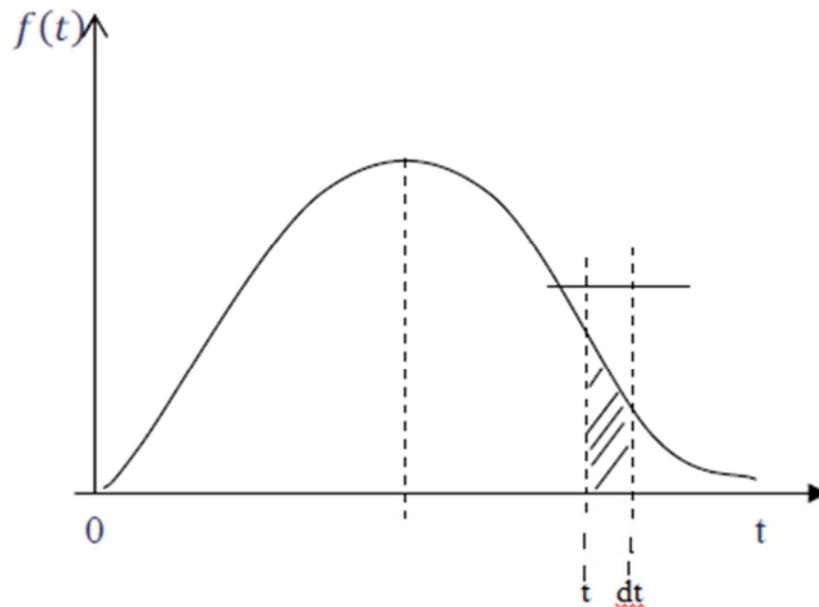


Figure 1.14 : Fonction de distribution [15]

Les aires hachurées représentent, à un instant t , la probabilité de défaillance $F(t)$ et la probabilité complémentaire de survie $R(t)$ (à droite).

–Fonction de répartition : $F(t)$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = \int_0^t f(t) \cdot dt = \text{probabilité de défaillance entre 0 et } t. \quad (1.13)$$

–Taux de défaillance : $\lambda(t)$

On va retrouver l'hypothèse de départ, caractéristique de cette loi :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.14)$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{constante}$$

– Espérance mathématique : E(t)

C'est la moyenne d'une loi de probabilité

$$E(t) = \frac{1}{\lambda} = \text{MTBF} \quad (1.15)$$

Remarque : pour $t = \text{MTBF} = \frac{1}{\lambda}$, durée moyenne entre deux défaillances, la fiabilité est

$$R(t) = \frac{1}{e} = 0.368, \text{ c'est-à-dire une chance de survie } < 50\%.$$

– Durée de vie L_{10} associée au seuil de fiabilité : $R=0.9$

Il faut tirer t de la loi $R(t) = e^{-\lambda t}$:

$$-\lambda t = \ln R(t)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{1}{R(t)}$$

En particulier, si L_{10} est associée au seuil de 0.90, on aura

$$L_{10} = \frac{0.105}{\lambda} = 0.105 \text{ MTBF} \quad (1.16)$$

I.5.4.2 Loi normale de Gauss :

La loi normale [6] est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. En fiabilité, la distribution normale est utilisée pour présenter la distribution des durées de vies des dispositifs en fin de vie (usure) car le taux de défaillance est toujours croissant. On l'utilisera que si la moyenne des durées de vie est supérieure à trois fois l'écart type.

La densité de probabilité d'une loi normale de moyenne " μ " et d'écart type " σ " s'écrit :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1.17)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (1.18)$$

La fiabilité est donnée par $R(t) = 1 - F\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$ où " F " est la fonction de répartition de la loi normale centrée ($\mu=0$) réduite ($\sigma=1$).

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{x^2}{2}} dt \quad (1.19)$$

La MTBF correspond à la moyenne μ (car la loi normale est une loi symétrique).

Enfin, $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$

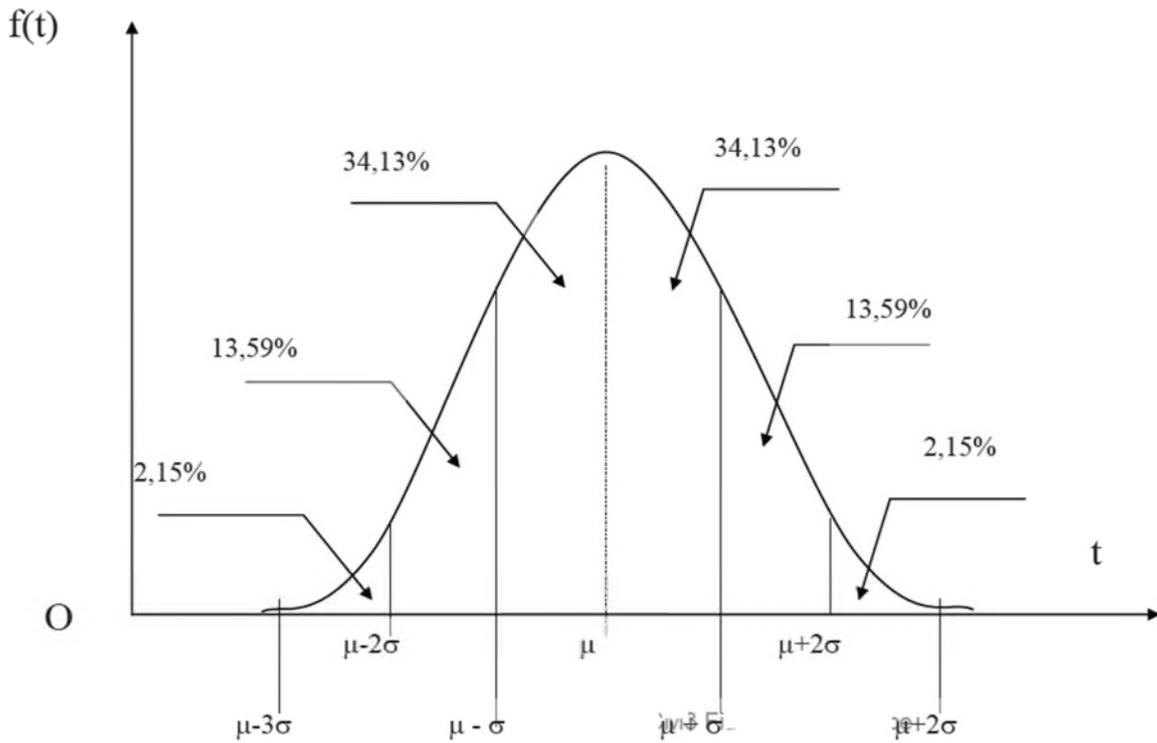


Figure 1.15: Evolution de la fonction de distribution [15]

La courbe de la figure montre l'évolution de la fonction de distribution $f(t)$: On observe que entre $\mu-3\sigma$ et $\mu+3\sigma$ on prend en compte plus de 99,7% de la population.

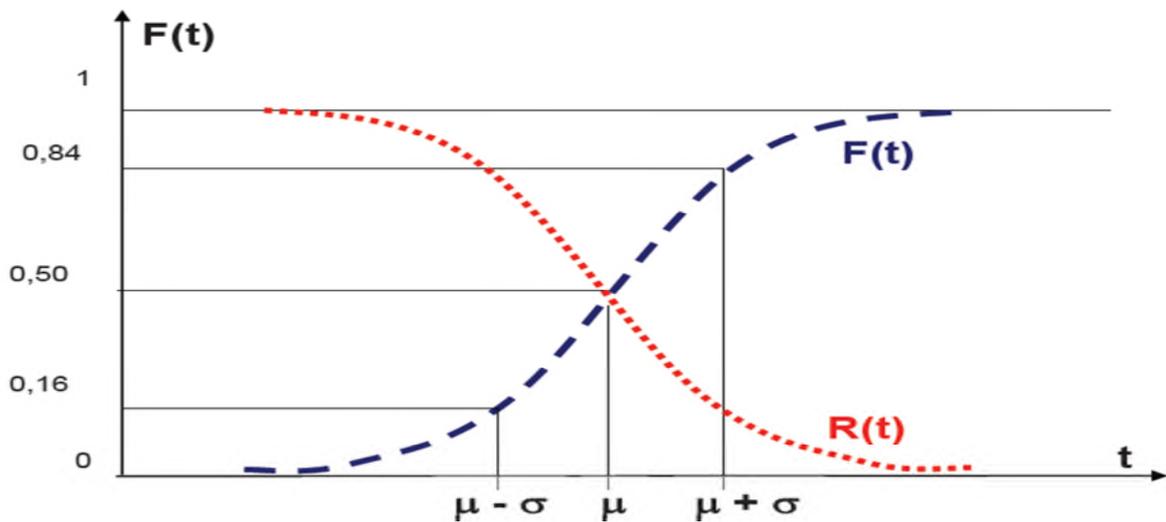


Figure 1.16: Evolution de la fonction de répartition $F(t)$ et de la fonction fiabilité $R(t)$ [55]

1.5.4.3 Loi de Duane

Cette loi permet de déterminer durant la période infantile de l'équipement, à partir d'une première évaluation du taux d'avarie, à quel moment on peut espérer atteindre une valeur donnée du taux d'avarie.

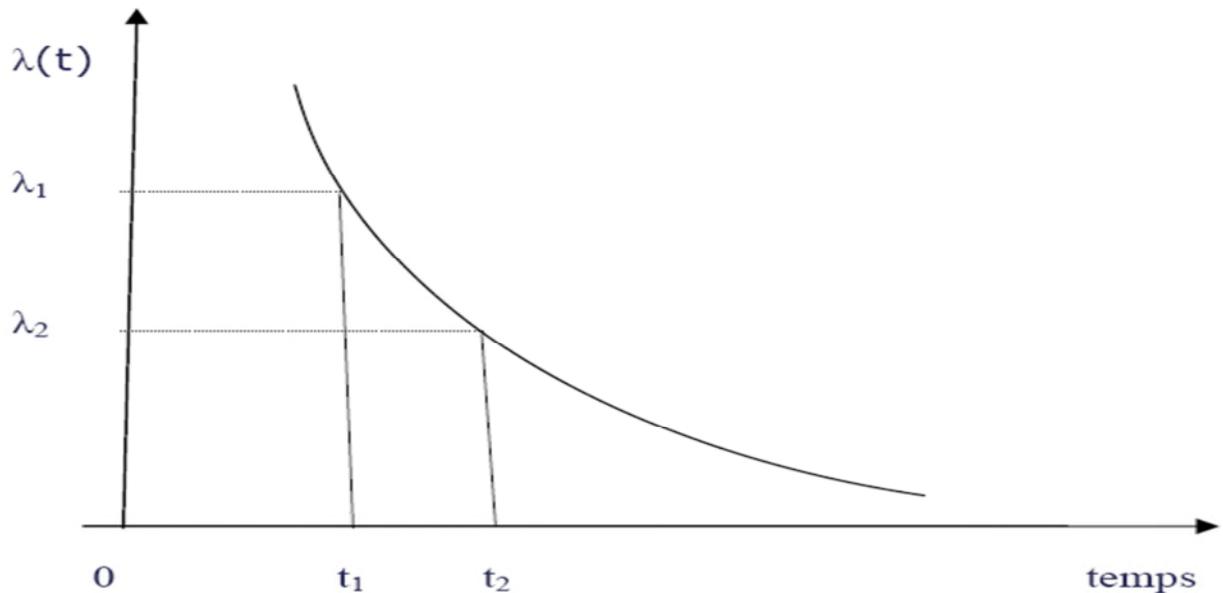


Figure 1.17 : Taux d'avarie de la loi de Duane [15]

à t_1 : nombre de défaillances N_1 d'où

$$\lambda_1 = N_1/t_1 \quad (1.20)$$

à t_2 : le taux d'avarie est :

$$\lambda_2 = K \cdot (t_2)^{-\alpha} \quad (1.21)$$

La mise au point de l'équipement correspond au déverminage et à l'amélioration de cet équipement ce qui donne un taux de défaillance (λ) décroissant dans le temps.

K : constante déterminée par la complexité du matériel, le niveau de fiabilité de ses composants et le degré de tolérance autorisé par la conception. La valeur du paramètre de conception de l'équipement (α) compris entre **(0,15 et 1)**, (α) augmente avec :

- le degré de nouveauté du matériel (conception, technologie...).
- la performance de l'équipe de mise au point.
- la rapidité de mise en place des actions correctives.

Si on a une bonne équipe de maintenance, ($\alpha = 0,5$) ; le suivi du taux d'avarie dans le temps permettra de vérifier l'efficacité de l'équipe de maintenance.

Premières mesures lors de la mise en service :

N_1, t_1, λ_1 : permettent de déterminer :

$$K = \lambda_1 \cdot 1/t_1^{-\alpha} = \lambda_1 t_1^{\alpha} \quad (1.22)$$

à t_2 , on a : $\lambda_2 = K \cdot (t_2)^{-\alpha} = \lambda_1 \cdot (t_2/t_1)^{-\alpha}$ (1.23)

I.5.4.4 Loi de WEIBULL :

ou loi à trois paramètres (η, β, γ) permettant d'ajuster correctement toutes sortes de résultats expérimentaux et opérationnels.

I.5.4.4.1 Domaine d'utilisation :

Le mode probabiliste de WEIBULL est très souple, car la loi a trois paramètres « d'ajuster » correctement toutes sortes de résultats expérimentaux et opérationnels. Contrairement au modèle exponentiel. La loi de WEIBULL couvre les cas où le taux de défaillance λ est variable et permet donc de s'ajuster aux périodes « de jeunesse » et aux différentes formes de vieillissement.

Son utilisation implique des résultats d'essais sur échantillons ou la saisie des résultats en fonctionnement (TBF = intervalle entre deux dates de pannes).

Ces résultats permettent d'estimer la fonction de répartition $F(t)$ correspondant à chaque instant t .

D'autre part, la connaissance du paramètre de forme β est un outil de diagnostic du mode de défaillance dans le cas où l'équipement étudié est une « boîte noire ».

Graphes de $f(t)$ et $\lambda(t)$:

Ces graphes montrent le polymorphisme de la loi de WEIBULL sous l'influence de son paramètre de forme β .

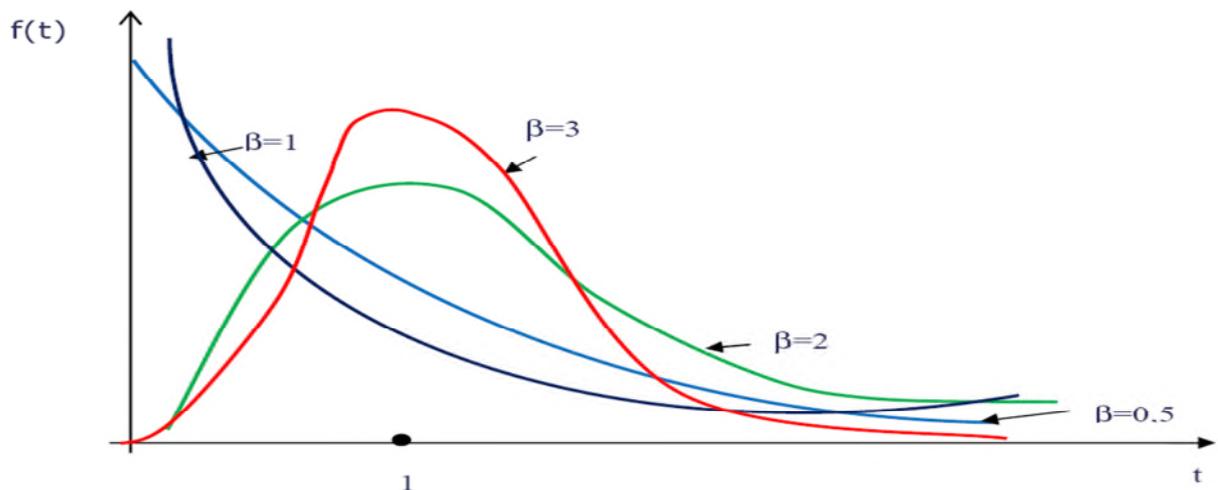


Figure 1.18 : Influence du facteur de forme β sur la courbe de la densité de probabilité [15]

I.5.4.4.2 Expressions Mathématiques :[7]

Soit la variable aléatoire continue t , distribuée suivant une loi de weibull.

a) Densité de probabilité $f(t)$.

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t)$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)} \quad \text{avec } t \geq \gamma \quad (1.24)$$

γ : est appelé paramètres de position $-\infty < \gamma < +\infty$ (en unités de temps), il définit un changement d'origine dans l'échelle de temps.

β : est appelé paramètres de forme $\beta > 0$ (sans dimension), souvent il est égal, inférieur ou supérieur à 1. La loi de "Weibull" correspond à un taux de défaillance instantané, constant, décroissant ou croissant.

η : est appelé paramètres d'échelle $\eta > 0$, parfois nommé « caractéristique de vie » c'est un simple paramètre de temps.

Par exemple ($\gamma > 0$) ; il y a une survie totale (pas de défaillance entre 0 et γ).

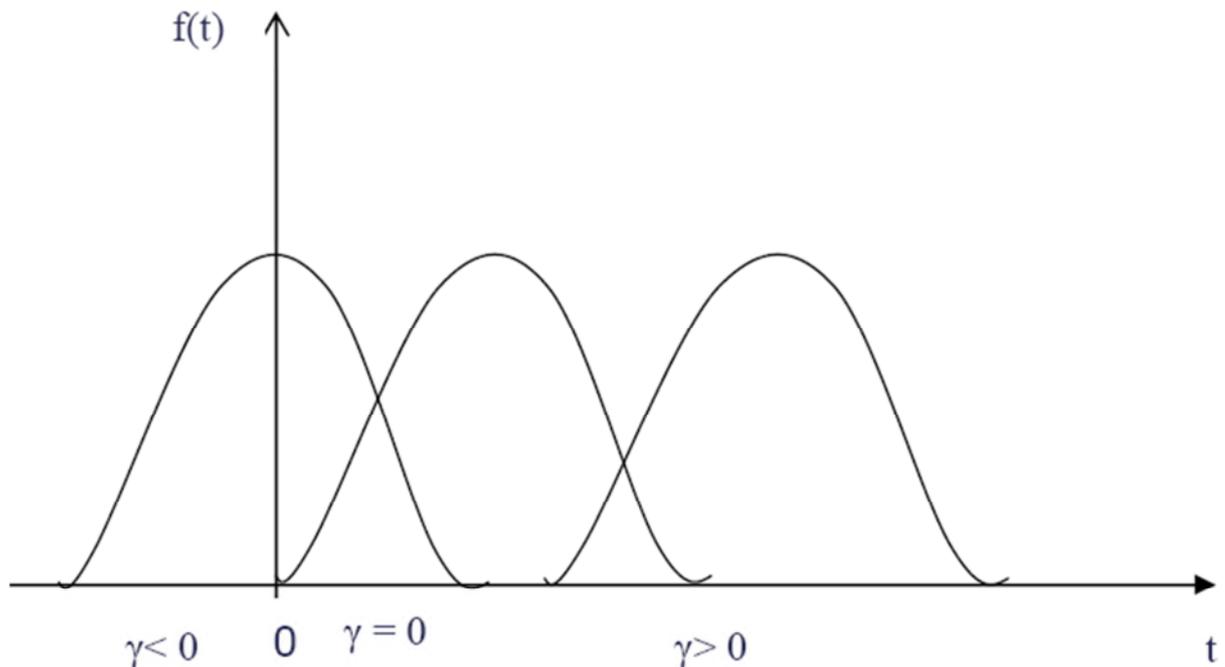


Figure 1.19 : Courbe de la densité en fonction du paramètre de position (γ) [7]

Remarque :

Le paramètre β est sans dimension le paramètre de position et le paramètre d'échelle η (Sont en unité de temps).

Signification : γ Indique la date de but des défaillances :

Si $\gamma > 0$ Il y a survie totale entre $t = 0$ et $t = \gamma$

Si $\gamma = 0$ Les défaillances débutant à l'origine des temps.

Si $\gamma < 0$ Les défaillances ont débutant avant l'origine des temps.

b) fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (1.25)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (1.26)$$

La fiabilité correspondante est donc $R(t) = 1 - F(t)$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (1.27)$$

Remarque : Pour $\gamma = 0$ et $\beta = 1$ on retrouve la distribution exponentielle cas particulier de la loi de WEIBULL.

Dans ce cas, $\lambda = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MTBF}$

c) Taux instantané de défaillance $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (1.28)$$

Avec : $t \geq \gamma$

$\beta > 0$

$\eta > 0$

Exploitation :

- Si $\beta < 1$ alors $\lambda(t)$ décroît : période de jeunesse (rodage, déverminage).
- Si $\beta = 1$ alors $\lambda(t)$ constant : indépendante du processus et du temps.
- Si $\beta > 1$ alors $\lambda(t)$ croît : phase d'obsolescence que l'on peut analyser plus finement pour orienter un diagnostic.
 - $1.5 < \beta < 2.5$: phénomène de fatigue
 - $3 < \beta < 4$: phénomène d'usure, de corrosion (débuté au temps $t = \gamma$)
 - $\beta = 3.5$: $f(t)$ est symétrique, la distribution est « normale »

d) Espérance mathématique du temps (MTBF)

La durée moyenne entre deux défaillances correspond à l'espérance mathématique de la variable aléatoire T.

L'espérance mathématique $E(t)=MTBF$ a pour expression

$$E(t) = \gamma + \eta \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \quad (1.29)$$

Γ : fonction

Dans le quel Γ est le symbole d'une fonction eulérienne de second espèce d'ou expression :

$$MTBF = A.\eta + \gamma(1.30)$$

e) Durée de vie t associée à un seuil de fiabilité R(t)

Nous avons vu que l'on peut associer à tout instant t une probabilité R(t). Réciproquement, il est souvent intéressant, à partir d'un niveau de fiabilité R(t), de trouver l'instant t correspondant. En particulier, nous noterons la durée de vie « nominale » associée au seuil $R(L_{10}) = 0.9$ (**notation généralisée à partir des durées de vie nominale des roulements**).

Développement :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Prenons le log népérien des deux membres :

$$\text{Ln } R(t) = -\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta \quad (1.31)$$

$$\text{Ln} \frac{1}{R(t)} = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta \quad (1.32)$$

$$\left[\text{Ln} \frac{1}{R(t)}\right]^{1/\beta} = \frac{t-\gamma}{\eta} \quad (1.33)$$

D'où

$$t = \gamma + \eta \left[\text{Ln} \frac{1}{R(t)}\right]^{1/\beta} \quad (1.34)$$

Et en particulier au seuil $R(t)=0.9$:

$$L_{10} = \gamma + \eta \left[\text{Ln} \frac{1}{0.9}\right]^{1/\beta} \quad (1.35)$$

$$L_{10} = \gamma + \eta [0.105]^{1/\beta} \quad (1.36)$$

Cette durée de vie est estimée des lors que l'on a déterminé les trois paramètres de la loi de WEIBUL.

I.5.4.4.3 Ajustement graphique: La détermination des paramètres

a) Principe

L'historique de fonctionnement d'un matériel permet de déterminer des TBF, ou des durées de vie de composants, donc des fréquences cumulées de défaillances notés $F(i)$, approximation de $F(t)$.

La détermination des trois paramètres de Weibull permet d'ajuster la loi probabiliste à la distribution statique relevée.

Nous porterons les points $M (F(i); t)$ sur un papier fonctionnel spécial. Le nuage de points ainsi formé sera alors ajusté par une droite dite droite de Weibull, selon des méthodes de redressement que nous allons préciser.

b) Structure du papier d'Allan Plait (papier dit de Weibull)

Ce papier log-log porte 4 axes :

Sur A, nous trouvons t ,

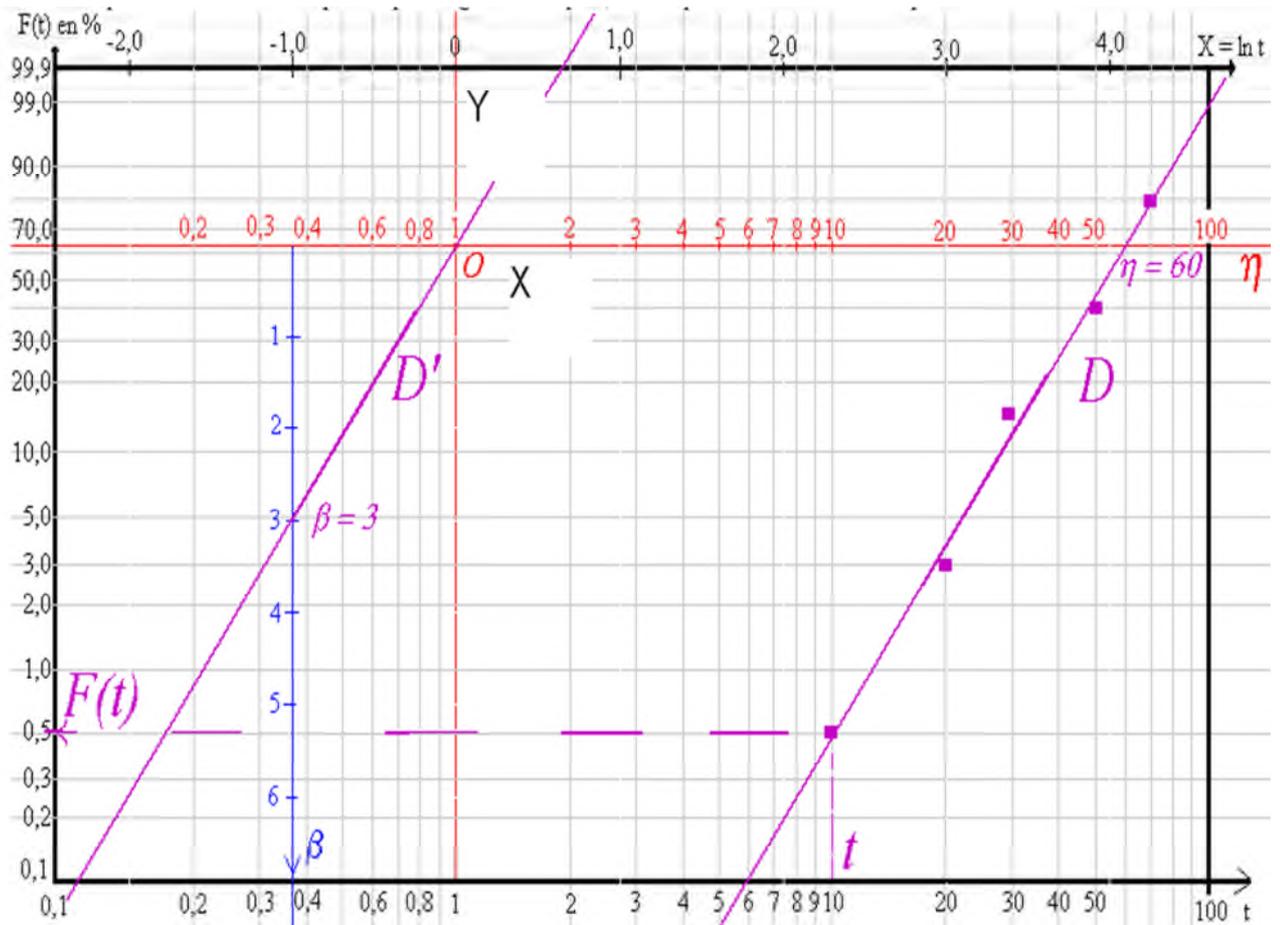
Sur B, nous trouverons $F(t)$ en %,

Sur a, nous trouverons $\ln t$,

Sur b, nous trouverons $\ln \ln \frac{1}{1-F(t)}$

Il porte également un référentiel secondaire X, Y justifié ci-dessous, permettant de déterminer β par $Y = \beta X$.

Chaque point $M (F(i) ; t)$; se porte sur les axes principaux (A ; B) :



A chaque pente du faisceau des droites (D') possibles correspond une valeur β .

Justification : (D') est la droite d'équation $Y = \beta X$ avec $X = \ln t$.

Pour $t = 1$, $\ln t = 0$ donc $X = Y = 0$.

Pour $\ln t = -1$ (sur l'échelle a), $Y = \beta \ln t = -\beta$.

Comme l'axe b portant β est orienté vers le bas, $Y = -b$ donc $b = \beta$.

I.5.4.4.4 Recherche de la MTBF : usage des tables numériques

Loi de Weibull : $MTBF = A.\eta + \gamma$

Tableau 1.3 : Des valeurs A et B pour le calcul du MTBF (loi de " Weibull") [7]

β	A	B	β	A	B	β	A	B
0,20	120	1 901	1,50	0,9027	0,613	4	0,9064	0,254
0,25	24	199	1,55	0,8994	0,593	4,1	0,9077	0,249
0,30	9,2605	50,08	1,60	0,8966	0,574	4,2	0,9089	0,244
0,35	5,0291	19,98	1,65	0,8942	0,556	4,3	0,9102	0,239
0,40	3,3234	10,44	1,70	0,8922	0,540	4,4	0,9114	0,234
0,45	2,4786	6,46	1,75	0,8906	0,525	4,5	0,9126	0,230
0,50	2	4,47	1,80	0,8893	0,511	4,6	0,9137	0,226
0,55	1,7024	3,35	1,85	0,8882	0,498	4,7	0,9149	0,222
0,60	1,5046	2,65	1,90	0,8874	0,486	4,8	0,9160	0,218
0,65	1,3663	2,18	1,95	0,8867	0,474	4,9	0,9171	0,214
0,70	1,2638	1,85	2	0,8862	0,463	5	0,9182	0,210
0,75	1,1906	1,61	2,1	0,8857	0,443	5,1	0,9192	0,207
0,80	1,1330	1,43	2,2	0,8856	0,425	5,2	0,9202	0,203
0,85	1,0880	1,29	2,3	0,8859	0,409	5,3	0,9213	0,200
0,90	1,0522	1,17	2,4	0,8865	0,393	5,4	0,9222	0,197
0,95	1,0234	1,08	2,5	0,8873	0,380	5,5	0,9232	0,194
1	1	1	2,6	0,8882	0,367	5,6	0,9241	0,191
1,05	0,9803	0,934	2,7	0,8893	0,355	5,7	0,9251	0,188
1,10	0,9649	0,878	2,8	0,8905	0,344	5,8	0,9260	0,185
1,15	0,9517	0,830	2,9	0,8917	0,334	5,9	0,9269	0,182
1,20	0,9407	0,787	3	0,8930	0,325	6	0,9277	0,180
1,25	0,9314	0,750	3,1	0,8943	0,316	6,1	0,9286	0,177
1,30	0,9236	0,716	3,2	0,8957	0,307	6,2	0,9294	0,175
1,35	0,9170	0,687	3,3	0,8970	0,299	6,3	0,9302	0,173
1,40	0,9114	0,660	3,4	0,8984	0,292	6,4	0,9310	0,171
1,45	0,9067	0,635	3,5	0,8997	0,285	6,5	0,9318	0,169
			3,6	0,9011	0,278	6,6	0,9325	0,167
			3,7	0,9025	0,272	6,7	0,9333	0,165
			3,8	0,9038	0,266	6,8	0,9340	0,163
			3,9	0,9051	0,260	6,9	0,9347	0,161

Algorithme de l'étude de la loi de WEIBULL :

1. Saisie des données, recensement des TBF :

Les données étude de fiabilité proviendront le plus souvent des historiques de défaillance, parfois de résultats d'essais.

2. Nous les classerons, ordre : attribué à chaque TBF: $1 \leq i \leq N$ Le nombre de TBF enregistré est N taille de l'échantillon.

3. Suivant la taille N de l'échantillon :

*si $N > 50$, nous regroupons les TBF par classes, dans ce cas, la fréquence cumulée notée :

$$F(i) = \frac{i}{N} \quad (1.37)$$

Est très voisine de la fonction de répartition $F(t)$ de la loi de WEIBULL.

*si $20 \leq N \leq 50$: nous donnerons un rang i à chaque défaillance (nous dirons : la i^{eme} défaillance).

Nous utilisons la formule d'approximation des rangs moyens :

$$F(i) = \frac{i}{N+1} \quad (1.38)$$

*Si $N < 20$ nous utiliserons la formule d'approximation des rangs médians :

$$F(i) = \frac{i-0.3}{N+0.4} \quad (1.39)$$

Détermination des paramètres de WEIBULL : β, γ, η

La détermination des trois paramètres se fait par l'utilisation du papier de WEIBULL, c'est une méthode graphique.

I.5.4.4.5 Détermination graphique des paramètres (η, β, γ)

a) Cas d'une droite ($\gamma=0$)

Au point " $t=\eta=1$ " qui est l'origine du repère (X, Y), alors " $\ln \eta=0$ ", et la droite (D₂) parallèle à (D₁) passe par l'origine (X, Y) et aura pour équation " $y=\beta X$ ". Elle permet de déterminer la valeur (β) sur l'axe "b".

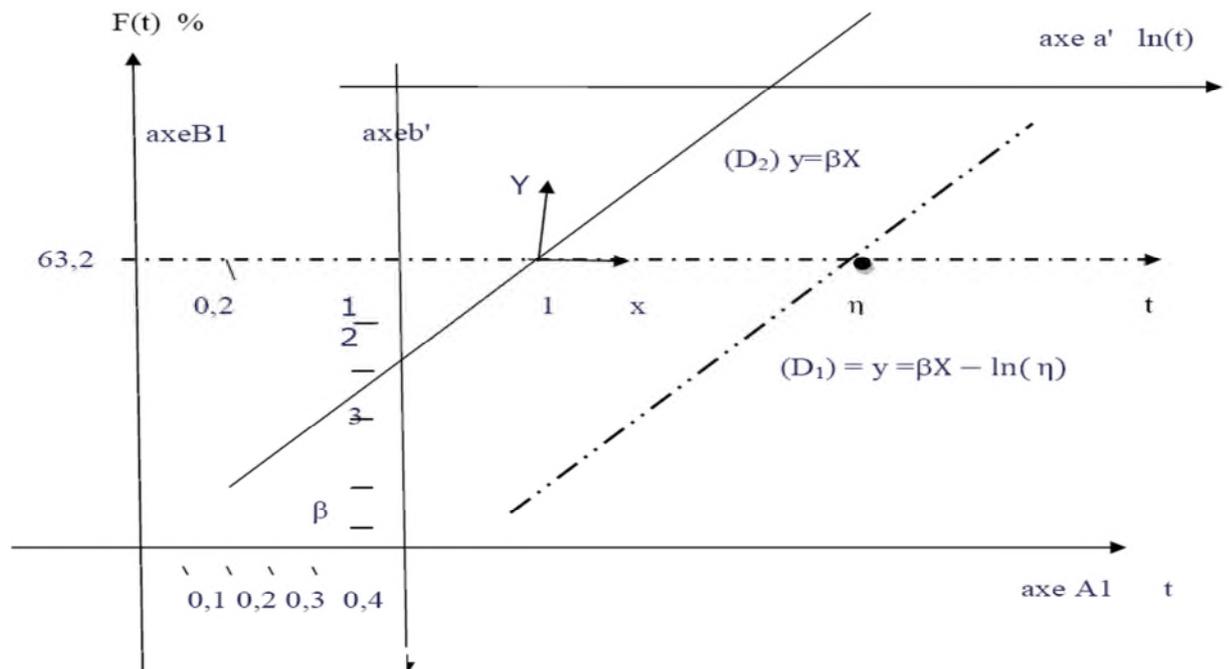


Figure 1.20 : Conception du papier d'Allan plait [7].**b) Méthodologie de l'analyse de fiabilité**

- 1-Préparation des données
- 2-Tracé du nuage des points (ti, Fi(ti)).
- 3-Tracé de la droite dite de " Weibull" (D1)
- 4-Déterminations des valeurs des trois paramètres β, η, γ .
- 5-Équation de la loi de "Weibull" (représentation graphique)
- 6-Détermination de la " M.T.B.F" en utilisant la table N°2 des valeurs x et y ;

$$x = \Gamma = (1 + 1/\beta) \text{ et } y = \sqrt{\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2}$$

- 7-Exploitation des résultats.

c) Structure de tableau de valeurs

Les (n) valeurs de données de bon fonctionnement « TBF » obtenues en exploitation et enregistrées dans les données historiques des équipements. Ces valeurs (n) seront classées par valeurs selon un ordre (i) allant de (i=1 à i=n).

F(i) est la probabilité consultative de défaillance sur (o, t) suivant la taille(n) de l'échantillon.

Si $n > 50$; $F(i) = i/n$

Si $20 < n < 50$; $F(i) = i/n + 1$ formule des rangs moyens

Si $n < 20$; $F(i) = \frac{i-0.3}{N+0.4}$ formule des rangs médians.

➤ **Ajustements graphiques**

Les ajustements graphiques se font sur des papiers à échelles fonctionnelles qui sont conçus pour linéariser la fonction de répartition "F(t)" à partir du nuage des points (ti, F(i)) représentant les données obtenues en exploitation.

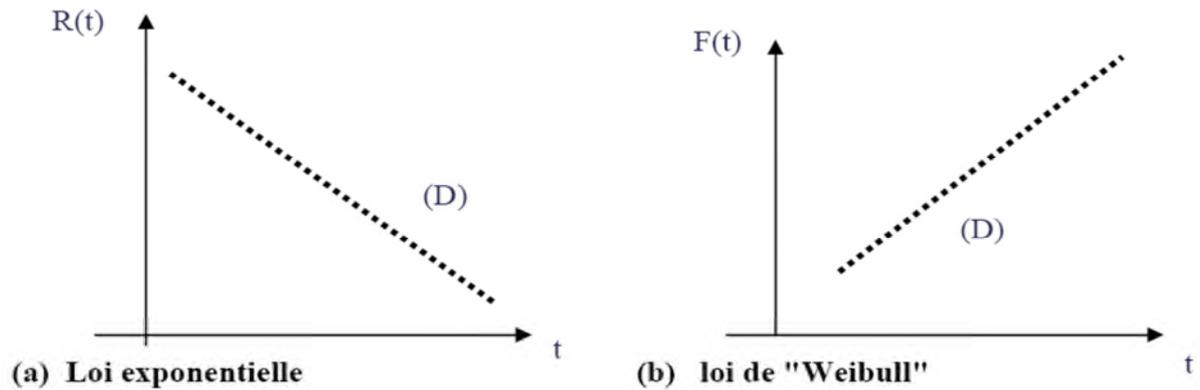


Figure 1.21 : Régression des nuages de point en une droite (D) [7]

Pour la loi exponentielle, on obtient le paramètre (λ) sur le papier semi-logarithmique, qui représente la pente de la droite.

Pour la loi de "Weibull", les trois paramètres (β , γ et η) sont obtenus sur le papier d'Allan Plait. La régression de ces nuages de point en une droite (D) permet d'affirmer si le test paramétrique est positif.

I.5.4.4.6 Méthode analytique pour déterminer les paramètres de "Weibull".

Pour obtenir la meilleure droite ajustant le nuage de points, on utilise la méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés : Elle consiste à chercher la droite pour minimiser la somme des carrés des distances horizontales des divers points à la droite et donne les paramètres de "Weibull" (β et η). On estime la valeur de ces paramètres par la méthode des moindres carrés en utilisant les expressions suivantes:

$$\beta = \frac{\sum_1 x_i y_i - \bar{y} \sum x_i}{\sum (x_i)^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}, \quad (1.40)$$

$$\eta = \exp(\bar{X} - \bar{Y}/\beta), \quad (1.41)$$

$$\gamma = 0 \quad (1.42)$$

avec $Y_i = \ln[\ln(1/(1-F(t_i)))]$; $X_i = \ln(t_i)$, $\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}$; $\bar{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n}$ et (t_i) représente le temps.

I.5.4.5 Choix Du Modèle

Nous avons choisi le modèle probabilité de WEIBULL car la loi à trois paramètres permettent d'ajuster correctement toutes sortes de résultats exprimant aux et opérationnel contrairement au modèle exponentiel.

La loi de WEIBULL couvre les cas où le taux de défaillance λ est variable et permet donc de s'ajuster aux périodes de jeunesse et à différentes formes de vieillissement. On retrouve les lois de distribution précédente quand un cas particulier de la loi de WEIBULL.

$3 < \beta < 4$ loi normale

$\gamma = 0 ; \beta = 1$ loi exponentielle.

Cette loi est très utilisée en fiabilité [10], en particulier dans le domaine mécanique. Son exploitation fournit :

- Une estimation de la "MTBF" de la population.
- Les équations de $R(t)$ et de $\lambda(t)$, ainsi que leurs variations sous forme graphique.
- Le paramètre de forme β qui peut orienter un diagnostic, sa valeur étant caractéristique de

certaines modes de défaillance.

I.6 Synthèse bibliographique

a-La corrosion par les sols des ouvrages enterrés a été entrepris par un certains nombres de chercheurs :

FOCT et GRAS (2003) [19] ont rassemblé des données issues d'expériences réalisées sur des aciers dans différentes conditions environnementales dans plusieurs laboratoires européens, afin de déterminer des tendances générales de comportement de ces matériaux, ainsi que des vitesses moyennes de corrosion. Les premiers essais présentés concernent l'influence des conditions oxydantes/réductrices sur la vitesse de corrosion moyenne du matériau. Les tests ont été réalisés sur des éprouvettes enfouies pendant 5 ans à une température de 90°C. Les résultats montrent que la vitesse de corrosion est à peu près constante en conditions oxydantes et qu'elle oscille entre 22 et 28 $\mu\text{m}/\text{an}$. En conditions réductrices, celle-ci est plus faible, décroît au cours de l'essai ; elle est d'environ 5 $\mu\text{m}/\text{an}$. Au cours d'autres séries d'expérimentations, l'influence de la composition de l'eau a été étudiée. Il en ressort que dans la bentonite compacte à des températures comprises entre 100 et 250°C, la vitesse de corrosion est comprise entre 6 et 11 $\mu\text{m}/\text{an}$ et la présence de chlorures à des concentrations d'environ 2 mol/L ne semble pas avoir d'influence sur la vitesse de corrosion. Des tests de corrosion ont été menés sur des éprouvettes en acier et en fonte : ceux-ci ne montrent pas de différences importantes sur la vitesse moyenne sur 5 ans que ce soit en conditions oxydantes ou réductrices. Enfin dans le cadre du stockage des déchets la température élevée de ceux-ci peut jouer un rôle dans la corrosion du surconteneur. En effet, une série de tests montrent que plus la température est élevée, plus la vitesse de corrosion

moyenne est grande. Pour résumer ces expérimentations, la teneur en carbone n'a pas une influence prépondérante sur les vitesses de corrosion moyennes, en revanche, plus la température augmente, et plus le milieu est oxydant, plus celles-ci sont élevées. Pour l'ensemble de ces expérimentations, les vitesses oscillent entre 5 et 28 $\mu\text{m}/\text{an}$.

Dans ce même contexte, PAPILLON et Al. (PAPILLON et Al, 2003) [20] ont étudié le comportement d'éprouvettes d'acier dans de l'argile compactée à 25 et 80°C pendant 6 mois. Ils mesurent des vitesses moyennes comprises entre 4 et 5 $\mu\text{m}/\text{an}$. De plus, ils observent sur les éprouvettes la formation de composés mixtes de carbonates de fer et de calcium, au niveau de l'interface métal/milieu. Ces composés peuvent être soit de la sidérite, et dans ce cas la couche est dense, soit de la calcite, poreuse, qui autorise la diffusion du fer à travers celle-ci, et la formation de produits de corrosion entre la calcite et l'argile. Cette étude illustre la mobilité des ions entre le matériau et le milieu.

De nombreux travaux ont été effectués afin d'estimer la corrosivité des sols. Différents pays ont développé des méthodes directement liées à la nature de leurs sols. On notera la « méthode hollandaise », utilisant le critère de STARKEY et WIGHT [21], destinée à des sols marécageux, tourbeux, gorgés d'eau (polders), propices à une corrosion localisée (anoxie, sulfates, eau,...). La « méthode anglaise » [22] considère uniquement la résistivité et le « potentiel Redox » du sol. La France [23], l'Allemagne [24] et l'Italie [25], se basent sur des normes qui définissent, en premier lieu, un indice de corrosivité absolue en affectant des coefficients aux diverses caractéristiques du sol (nature, résistivité, teneur en eau, pH). Un indice de corrosivité relative prend en compte par ailleurs différentes hétérogénéités observées sur le tracé du futur ouvrage.

Un ouvrage réalisé aux Etats-Unis par ROMANOFF [26] pour le compte de National Bureau of Standards fait la synthèse de près de 45 années de retour d'expérience et d'études de laboratoire, aux Etats-Unis, sur les vitesses de « Corrosion libre » de métaux dans les sols. Cet ouvrage, en dépit de son âge, constitue une base de données de référence et aussi une méthodologie d'évaluation de la corrosivité des sols.

Des approches plus récentes de type « pluridisciplinaire » ont été réalisées depuis une vingtaine d'années. Contrairement aux précédentes, ces études prennent en compte les phénomènes liés à la nature des revêtements et à la protection cathodique [27] et montrent la complexité des processus de corrosion. Leur mérite a été de montrer de façon précise que le risque de corrosion doit être analysé en considérant conjointement les paramètres liés au

revêtement (son mode de dégradation en service) mais aussi au sol.

Le sol va, en effet, exercer une double influence : sur le risque de dégradation du revêtement, mais aussi, en fonction du mode de dégradation du revêtement, sur la nature des corrosions qui peuvent s'y développer, et ce en fonction du type de défaut de revêtement et des conditions locales (spatiales et temporelles) de « Portée » de la protection cathodique.

Schématiquement, on peut considérer que les propriétés corrosives des sols sont, dans une large mesure, déterminées par trois facteurs principaux (valeur instantanée et évolution dans le temps de ces facteurs) :

- ❖ La teneur en eau du sol qui dépend essentiellement des conditions climatiques locales, et des conditions de drainage,
- ❖ Les teneurs en oxygène et en gaz carbonique qui sont liées aux propriétés de drainage du sol, mais aussi aux conditions hydrologiques,
- ❖ La composition chimique de l'eau du sol qui est fortement déterminée par les réactions chimiques eau/substrat minéral du sol qui se produisent lors de la percolation des eaux de précipitation à travers les couches supérieures du sol.

Une autre spécificité des sols est la présence de perturbations électriques [28], parmi lesquels on peut noter les courants dits « vagabonds », dus aux courants de protection cathodique d'ouvrages tiers ou des lignes ferroviaires. Ensuite, peuvent être cités les courants induits par les lignes hautes tensions [29], et les courants telluriques [30], capables de générer une corrosion locale au droit des défauts de revêtement.

Les aciers de canalisation du transport d'hydrocarbures ont été conçus pour une durée de vie de 70 années et plus, se détériorent lentement alors que d'autres ont déjà épuisés leur vie utile en un temps relativement court (après une année).

Indépendamment de la qualité de la corrosion, des revêtements, de la protection cathodique, les facteurs qui affectent la vie de canalisation incluent la nature du produit, la nature de l'environnement externe, les conditions de fonctionnement (cycles de pression...) et la qualité de la maintenance.

La variation du taux de corrosion en conditions dynamiques était importante. L'acier recuit présente le maximum de résistance à la corrosion. Li, YUNTAO [31] en étudiant l'effet des inclusions de Mn et Mns sur la corrosion (SSCC sulfide stress corrosion cracking) des aciers de la canalisation et soudures par effet d'hydrogène. K BELMOKR [32] sur une étude de la corrosion souterraine des structures de pipelines en sol agressif en présence des revêtements

primaires en polymères montrent la formation d'un film passif formé par les sulfates et les carbonates sur l'acier nu et qui est différent pour l'eau de mer et le sol.

A. BENMOUSSAT et Ali, [33] et [34] ont montrés que les aciers API sont sensibles à la corrosion par les sols à un pH presque neutre. L'étude a été menée sur un sol simulé choisi chargé particulièrement en ions carbonates et bicarbonates.

J. BUFFERNE adresse son livre [35] particulièrement aux Responsables de maintenance industrielle qui ne peuvent se contenter de mesurer la disponibilité d'un équipement, de confondre à partir de la courbe en baignoire la fiabilité d'un équipement avec la fiabilité des composants utilisés. Ils ont besoin d'estimer la fiabilité des différents composants. A l'exception des défaillances dues aux dégradations forcées une activité de maintenance existe uniquement par le fait que le matériel utilisé présente une certaine fiabilité.

Un analogue discret de la distribution de WEIBULL continue normale [36] a été proposé dans la littérature pour répondre aux besoins de montage en temps discret et la fiabilité des données de survie ensembles. Ses propriétés ont été étudiées et les méthodes d'estimation de ses paramètres ont également été étudiées par divers auteurs.

L'estimation ponctuelle centile de la distribution de WEIBULL à trois paramètres de l'estimation du maximum de vraisemblance prolongée. Ce document [37] décrit l'estimation prolongée d'un point percentile obtenu par la méthode du maximum de vraisemblance de la distribution de WEIBULL. L'extension que l'on exige d'évaluer la convergence de la méthode NEWTON-RAPHSON par la convergence de la probabilité de la place par la convergence des paramètres. Cette estimation est appelée «EMLE" (étendue estimation du maximum de vraisemblance). Ce concept a deux avantages: le premier est que l'on peut estimer centiles, même lorsque nous ne parvenons pas à trouver les paramètres convergents et la seconde est que les biais des centiles donnés par EMLE sont plus petits que ceux donnés par d'autres méthodes de forme fermée. Ces deux propriétés sont clairement visibles lorsque le paramètre de forme est grand. EMLE est utile lorsqu'inférieurs que les estimateurs pour cent percentiles sont nécessaires. La discussion dans le présent document ne concerne que les échantillons complets, c'est à dire de défaillance non censurés.

Les pressions ultimes des tubes présentant des défauts sont obtenues à partir de formulation basée sur l'analyse limitée des défauts, S. BELAID [38] a appliqué les critères B31G et B31G modifiée pour calculer les pressions limite de service pour chaque tube corrodé donc l'évaluation

des dégâts causé par la corrosion localisé et le sort du pipeline (rebuter, subir un revêtement, remplacer....).

ShuXin Li et ALL [39] Une méthodologie est présentée pour prévision de la durée de vie restante des structures de pipelines enterrés avec un modèle probabiliste basé mécaniquement par la prise d'effet de hasard en compte dans la corrosion des pipelines . Technique de simulation de Monte Carlo est utilisée pour calculer la durée de vie restante et sa fonction de distribution cumulative (CDF) . L'analyse de sensibilité est réalisée afin d'identifier les paramètres les plus importants qui affectent la rupture du pipeline . Les résultats montrent que la profondeur du défaut de corrosion et le taux de corrosion radiale sont les facteurs clés qui influent sur la probabilité de défaillance pipeline et de vie restante . La durée de vie restante de pipeline peut être prolongée en réduisant grandement la valeur moyenne de la profondeur des défauts de corrosion et le taux de corrosion radiale. CDF est plus approprié pour caractériser la probabilité de défaillance d'un pipeline par rapport à la fonction de densité de probabilité (PDF) et l'indice de fiabilité.

Ramdani Mohamed et All [40] La recherche de la durée de vie d'un gazoduc enterré pour le transport de gaz sous haute pression ayant subi un vieillissement naturel en faisant apparaître des piqûres de corrosion sous forme localisée est un problème majeur des exploitants pour la prise de décisions quant au remplacement ou à la réparation des parties endommagées du gazoduc. L'analyse de la fiabilité du tube consiste d'une part à intégrer un modèle mécanique de calcul. Ce dernier est basé sur la mécanique linéaire de la rupture. Il consiste à déterminer la valeur du FIC pour recalculer la contrainte appliquée et donc la nouvelle pression de service pour un tube avec un défaut localisé. Les incertitudes dans les paramètres de calcul sont considérées comme variables aléatoires donc impliquées dans un modèle probabiliste. Le calcul de la fiabilité est réalisé sous le logiciel de fiabilité PHIMECA SOFT. L'indice de fiabilité β est déterminé pour trois fonctions d'état limite. Ces fonctions sont caractérisées par KIC dans les trois stades de la courbe de transition, fragile, ductile et transitoire.

Felipe Alexander et All [41], Les modèles linéaires de corrosion variables aléatoires sont largement utilisés dans l'analyse de la fiabilité des pipelines. Toutefois, les modèles linéaires grossièrement négligent les caractéristiques du processus de corrosion bien connus. Ici, un modèle non-linéaire est proposé, où la vitesse de corrosion est représentée comme un processus d'onde carrée de Poisson. Le modèle qui en résulte représente l'hérent temps de variabilité de la croissance de la corrosion, génère de la croissance et fils continue à la croissance moyenne à moins que l'une puissance du temps. Différents modèles de corrosion sont ajustés à la

même série de données de corrosion réelles pour deux inspections. Le modèle de croissance de la corrosion processus aléatoire non linéaire proposé conduit à la meilleure solution pour les données, alors que le meilleur représentant problème physique.

I.7 Conclusion

Le transport par canalisation est effectué par des réseaux de pipelines en aciers API, le plus souvent enterrés. Les aciers sont exposés à des risques de corrosion par les sols lorsque le système de protection est défaillant sous des sollicitations mécaniques devenu complexe lorsque les interactions de l'environnement corrosif ou l'action microbiologique sont impliqués.

Les défaillances par corrosion ont affectés plusieurs réseaux de transport des produits pétroliers et gaz naturel et on a estimé à plus de 10 % les accidents de conduites de gaz naturel causés par la corrosion.

Les défaillances par corrosion sous contrainte (SCC) – stress corrosion cracking, est un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à rupture sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif. Ce sont les contraintes de tension qui sont dangereuses, les contraintes de compression exerçant au contraire une action protectrice. Les pertes en poids sont très faibles par analogie avec la corrosion par piqûre (Pitting corrosion).

Les défaillances par corrosion fatigue sont caractérisées par les sollicitations de contraintes cycliques (efforts périodiques alternés). La corrosion--fatigue augmente lorsque la fréquence des cycles diminue. Les fissures sont de type transgranulaire avec généralement peu d'embranchement secondaire, quelques petites fissures peuvent apparaître au voisinage de la fissure principale. Le fond des piqûres agit comme un facteur de concentration de contraintes ; les fissures de corrosion -- fatigue s'amorcent souvent à partir d'une piqûre. La teneur en oxygène du milieu, sa température, son acidité, sa composition, ont une grande influence sur la sensibilité d'un matériau à la corrosion -- fatigue.

Aussi dans ce chapitre on a traité les différentes lois de probabilité utilisées en fiabilité et en particulier la loi de "Weibull"(taux de défaillance décroissant, constant, croissant),cette loi est générale du fait des deux ou trois paramètres qui lui donnent une grande souplesse d'adaptation aux différents cas rencontrés.

Elle représente bien la fiabilité des ouvrages et des équipements dans les diverses période de fonctionnement.

Vu la complexité du modèle "Weibull", ce dernier a été développé à une équation simple dont les paramètres (η et β) ont été déterminés par la méthode des moindres carrés en utilisant un programme que nous avons développé à la base de code Matlab par conséquent le calcul de la durée de vie restante de notre pipeline.

CHAPITRE 2

Contexte Industriel

- Introduction
- Description de la ligne AST
- Caractéristiques Acier API X42
- Analyse du sol sur le tracé de ligne AST
- Expertise de la ligne AST
- Contrôle non destructif (CND)
- Détection par outil intelligent
- Conclusion

II.1.Introduction

Compte tenu de la localisation géographique éloignée des ressources en énergies fossiles pétrole et gaz naturel des centres de consommation, l'acheminement de ces ressources sur des distances transcontinentales s'opère par navigation maritime et par pipelines (Gazoducs/Oléoducs).

D'importants réseaux de pipelines ont été construits depuis les années 60 et se développent toujours. La société algérienne SONATRACH (SH) possède et exploite un réseau de canalisation évalué à plus de 18000 Kms à des diamètres allant de 8 à 48 pouces, destiné au transport sa production d'hydrocarbures ainsi que celle des associés.

Le transport des produits issus du raffinage du pétrole est opéré par camions et wagons citerne ou par des canalisations séparées ou par canalisation unique. Une des particularités du transport par canalisation unique est d'acheminer une multitude de produits par la même canalisation. Ce qui entraîne des avantages techniques et économiques bien qu'il résulte de ce type de transport des mélanges de produits pouvant être de nouveau séparés par distillation. Ce projet a été réalisé à la suite d'une étude comparative effectuée par l'engineering de NAFTAL, entre le transport des hydrocarbures à l'ouest par camions et wagons citernes et le transport par canalisation, il résulte que le moyen le plus fiable qui peut assurer une rentabilité sur une durée de vie de plus de vingt ans diminuant les charges (frais de transport, incidents routières....etc.) est d'adopter la philosophie du transfert du multi produit par canalisation. Ce transfert est basé sur le principe du pompage successif.

A cet effet **NAFTAL Branche GPL** dispose un projet de développement du transport par pipeline de **2700 Kms** dont 700 Kms opérationnels.

II.2.Description de la ligne AST[43]:

La ligne AST du réseau pipeline (ARZEW – SIDI BELABBES – TLEMEN) a pour but d'alimenter en GPL (Butane et Propane) les Centres de Stockage GPL Vrac de Tlemcen et Sidi BelAbbes à partir du complexe GPL SONATRACH GP1Z située à Bethioua- Arzew.

Les tubes de la canalisation sont enterrés dont la profondeur varie de 1 à 1.5m.

- Année de la mise en Service : 26/10/2005
- Année de la Réception Provisoire : 21/12/2005

Le pipeline AST approvisionne les Wilayas suivantes :

- Wilaya de Tlemcen
- Wilaya de Sidi Belabbes

Débit Contractuel est de 125 m³/h.

a) Constructions

- Canalisation de diamètres de 10 " – 8 " : ENAC / Filiale SONATRACH (1985/2004)
- Ouvrages concentres : Entreprise ENTREPOSE CONTRACTINC (France) – (2004 – 2005)

b) Caractéristique de la canalisation AST

➤ Matériaux de la ligne

Les matériaux de la ligne AST ont été fabriqués en acier selon les normes API, de grade 5L API 5 L X42 par l'usine algérienne de sidérurgie d'Annaba par des techniques d'amélioration de la microstructure par durcissement et refroidissement contrôlé. Les tubes sont roulés étirés.

➤ Tronçon Arzew – Sidi Bel Abbès

Nuance : **Acier X42**

Tube : **étiré**

Diamètre nominal : **Ø10 "**

Longueur de tube : **5M – 12,5M**

Longueur : **84.046 Km**

Débit : **125 m³/h**

Pression de Refoulement (Butane) : **45 Bars**

Ep = **8.74mm – 7.80mm**

➤ Tronçon Sidi Bel Abbès – Tlemcen



Figure 2.1 : Prise de vue aérienne du Tracé SBA-Tlemcen [43]

Nuance : **Acier X42**

Tube : **étiré**

Diamètre nominal : **Ø8 "**

Longueur de tube : **5M – 12,5 M**

Longueur de la ligne: **81.201 Km**

Débit : **125 m³/h**

Pression de Refoulement (Butane) : **41 Bars**

Ep = **7.04mm**

La Longueur Totale de la Canalisation est de **165.585Km** avec **7000 m³** de stock mort en
Produit Butane réparti en deux Tronçons :

- ✚ 3949.2356 m³ d'Arzew à SBA,
- ✚ 3050.7644 m³ et de SBA à Tlemcen.

➤ Ouvrages annexes

La Canalisation GPL AST se compose des Ouvrages Annexes suivants :

Terminal Booster Arzew

- ◆ Pomperie : 02 pompes marque Booster
- ◆ Un Poste de Comptage
- ◆ Tableau TGBT NAFTAL
- ◆ Système de détection Feu et Gaz (Salle de Contrôle)

Terminal Départ au sein du GP1Z à Arzew

- Pomperie d'Expédition : 02 pompes marque GUINARD
- Un Poste de Régulation de Débit et de Pression
- Une Gare de Racleur Départ
- Tableau TGBT NAFTAL
- Groupe électrogène de secours
- Sous-station Electrique
- Salle de Contrôle avec un Système de détection Feu et Gaz

Poste de Coupure GPL 10''8'' de Sidi Bel Abbes

Situe sur le site du centre enfûteur 221, zone industrielle de Sidi Bel Abbes. Cette installation est destinée à assurer le transfert du GPL arrivant du TD GP1 Z vers les capacités de stockage du centre GPL de Sidi Bel Abbes ainsi que son expédition vers le terminal arrivée de Tlemcen. Elle comprend :

1. Poste de réception

- Une gare de racleur arrivée
- Une ligne de transfert de GPL vers le stockage du centre SBA
- Un comptage à débitmètres massique
- Un poste de régulation débit/pression de GPL
- Une ligne avec vanne de régulation manuelle
- Deux vannes de régulation automatique à motorisation
- Une ligne de liaison aux installations existantes

2. Zone d'expédition vers Tlemcen

- Deux électropompe d'expédition marque GUINARD montées en parallèle d'un débit unitaire de $125\text{m}^3/\text{H}$,
- Une vanne de régulation de débit,
- Une gare de racleur départ,
- Une citerne de purge équipée, d'une pompe immergée pour assurer soit la réinjection vers stockage soit évacuation par camions citernes,
- Un réseau de purge,
- Une sous station électrique,
- Un bâtiment technique,
- Salle de contrôle et avec un Système de détection Feu et Gaz
- Local transformateur 30KV/5.5 KV/630 KV/30 KV/400 KV
Tronçon Sidi Bel Abbes-Tlemcen
- Diamètre: 8'
- Longueur : 81,201 Km
- Débit de dimensionnement : 125 m³/h
- Pression de refoulement pompes principales SBA : 48,10 bars pour butane et 41,70 bars pour propane,
- Pression d'arrivée Tlemcen : Butane : 14,20 bars/Propane:25,90
- Type et nuance d'acier : API 5L X42 sans soudure,
- Nombre vannes de sectionnement : 05

Terminal Arrivée au Centre GPL Vrac de Tlemcen

Les équipements principaux sont :

- Une Gare de Racleur arrivée,
- Un banc de filtration compose de deux rampes en parallèle (deux filtres à panier),

- Un système de comptage à débitmètre massique,
- Un banc de régulation de débit/pression,
- Un manifold d'aiguillage des produits,
- Une citerne de purge équipée d'une pompe immergée pour assurer soit la réinjection vers stockage soit vers évacuation par camions citernes,
- Un bâtiment technique.
- Un Poste de Régulation de Débit et de Pression
- Tableau TGBT NAFTAL
- Sous-station Electrique
- Salle de Contrôle avec un Système de détection Feu et Gaz

Postes de Sectionnements

Il existe 10 Postes de Sectionnement tout au long de la Canalisation ARZEW – SIDI BEL ABBES – TLEMCCEN

1. **PS1** : localité Chehairia w Oran
2. **PS2** : localité Boufatis w Oran
3. **PS3** : localité Zeghloul w Mascara
4. **PS4** : localité Mekadra w SBA
5. **PS5** : localité Sidi Hamadouche w SBA
6. **PS6** : localité sidi Lahcen w SBA
7. **PS7** : localité sidi Ali Boussidi w SBA
8. **PS8** : localité Gaafour w Tlemccen
9. **PS9** : localité El bordj w Tlemccen
10. **PS10** : localité Ghoullyemes w Tlemccen

Comprennent :

- Transformateurs Redresseurs
- Vane de Sectionnement (By-pass)
- Coffret de détection de Chute de Pression
- Equipements destinés à la fourniture d'Energie.

Système De Télécommunication

C'est un Système de Transmission par Radio équipé de Stations d'Emetteur /Récepteur permettant la Communication par « TalkyWalky » à travers 04 Relais situés entre Arzew et Tlemccen.



Figure 2.2 : Sphères de stockage GPL [43]

II.3. Caractéristiques Acier API X42 [6]

II.3.1 Composition chimique

Les essais de caractérisation des aciers API X42 ont été effectués précédemment dans un travail de recherche de magister mené au sein de l'équipe matériaux et corrosion du laboratoire de recherche LAEPO []. Nous reprenons l'essentiel de ces essais de caractérisation

Les aciers sont de nuance API 5 L X42 et les tubes sont de diamètre 8" et 10". La composition chimique a été effectuée par analyse spectrophotométrique sur machine type « SPECTRO Rp 212 » disponible au niveau du laboratoire de contrôle de la qualité à l'usine ALFON d'Oran (Algérienne des fonderies d'Oran). Les résultats sont reportés sur (le tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Composition chimique de l'acier X42 étudié [6]

Eléments		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	V	Fe
[%] en poids	1	0.17	0.60	0.22	0.027	0.01	0.02	0.04	0	-	0.02	-	-	98.89
	2	0.18	0.61	0.23	0.026	0.008	0.03	0.03	0.02		0.03			98.58
	3	0.17	0.62	0.23	0.025	0.009	0.03	0.04	0.02		0.04			98.80

Après les opérations de polissage, et d'attaque chimique avec le Nital à 5% (5 ml d'acide nitrique + 100 ml d'éthanol pur), l'observation microscopique a révélé une microstructure de type ferrito-perlitique à prédominance ferritique avec des amas de perlite (figure 2.3).

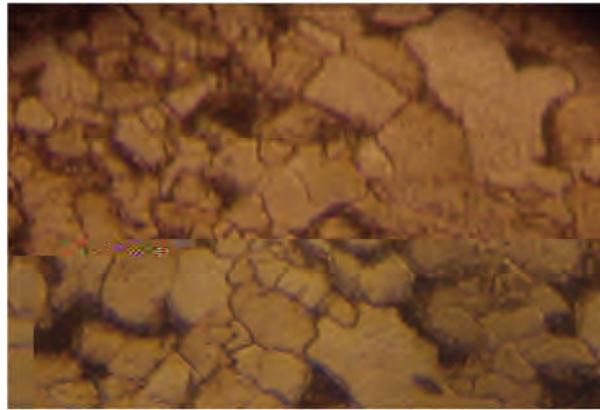


Figure 2.3 : Microstructure des aciers (x500)- : X42 [6]

Les microstructures observées au MEB ont révélés également ce type ferritoperlitique

II.3.2 Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des aciers d'étude ont été déterminées en effectuant les essais de traction et de dureté après usinage des éprouvettes de traction

II.3.2.1 Essai de traction :

Suivant Mlle A.BENDJABBOUR [6], l'essai a été effectué au laboratoire de sciences des matériaux de la faculté de technologie de l'université de Tlemcen, sur machine universelle type CONTROLAB 30 de force maximale de 600 KN avec des éprouvettes plates qui ont été usinées selon la norme NF EN 100002-1 (Figure 2.4).

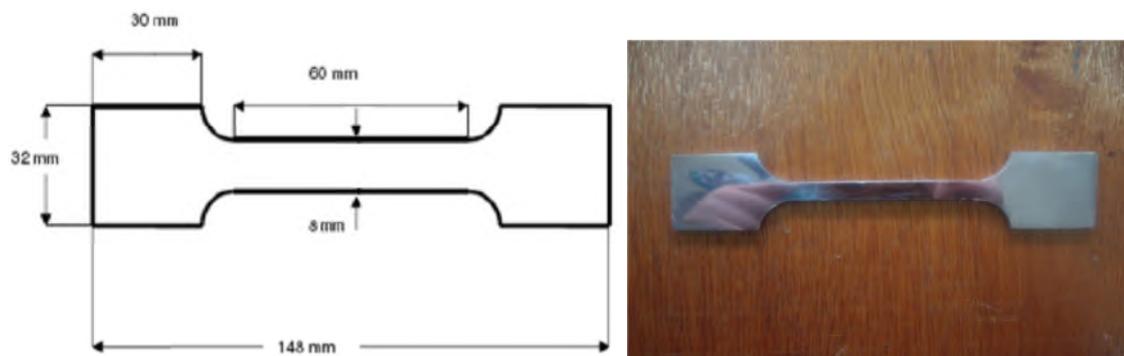


Figure 2.4: Schéma de l'éprouvette de traction (NF EN 100002-1) [6]

Les résultats sont donnés dans le tableau 2.2

Tableau 2-2: Caractéristiques mécanique de l'acier X42 [6]

Nombre d'essai	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	Fm(KN)	FeL(KN)	FeH(KN)	A%
1	463.728	264.769	11.129	6.354	6.465	-
2	489.746	395.249	11.754	8.632	8.742	-

L'essai a été effectué à une vitesse de 30 mm/s

Les caractéristiques mécaniques ont été calculées d'après les relations suivantes :

- **Contrainte de limite élastique R_e :** $R_e = F_e / S_0$ (2.1)

R_e : contrainte de limite élastique (N/mm^2);

F_e : charge de limite élastique (N);

S_0 : section initiale de l'éprouvette (mm^2).

- **Résistance à la rupture à l'extension :** $R_m = F_r / S_0$ (2.2)

R_m : résistance à la rupture (N/mm^2);

F_r : charge de rupture (N).

- **Allongement total de rupture :** $a_r = L_u - L_0$ (2.3)

a_r : allongement totale de rupture (mm);

L_u : longueur ultime entre repère avant rupture de l'éprouvette (mm);

L_0 : longueur initiale de l'éprouvette (mm).

- **L'allongement pour cent (A%) :** $A = 100 (L_u - L_0) / L_0$ (2.4)

- **Module d'élasticité (E) :** $E = R_e / a$ (2.5)

a : allongement de limite élastique (mm);

Pour les aciers d'étude :

$E = 200\ 000\ N/mm^2$.

- **Coefficient de striction (Z) :**

$$Z = 100. (S_0 - S_u) / S_0 \quad (2.6)$$

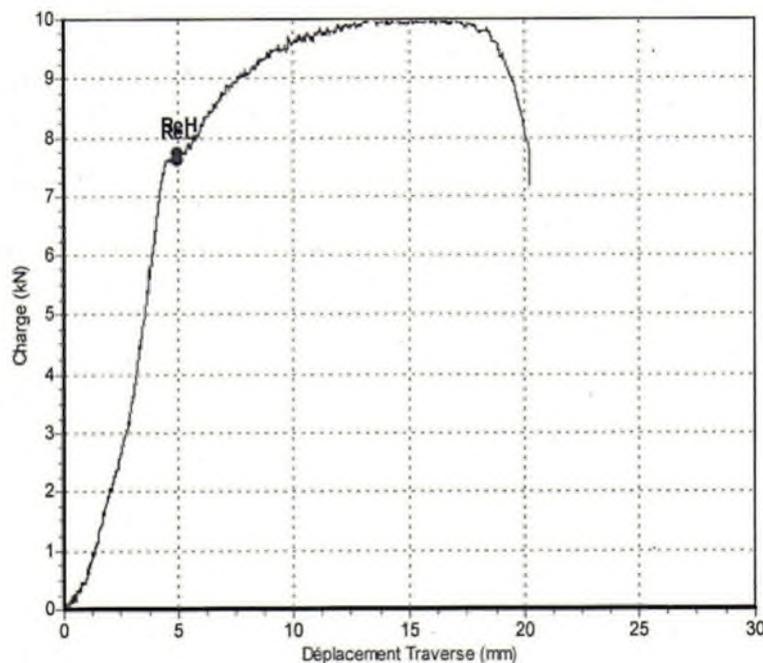


Figure 2.5 : Courbes effort – allongement acier X42 [6]

II.3.2.2 Essai de Dureté :

Les mesures de dureté ont montrés que l'acier a une dureté HRC 17 montrant sa résistance et son opposition à la déformation.

Les résultats des essais Charpy ont donnés des valeurs de l'énergie au choc de 210 à 215 Joules.

L'énergie absorbée par l'éprouvette (W) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le départ (W0) et l'arrivée (W1). On a donc:

$$W_0 = P.h_0 \quad (2.7)$$

$$W_1 = P.h_1 \quad (2.8)$$

$$W = P. (h_0 - h_1) \quad (2.9)$$

Pour connaître la résistance au choc Charpy (ou résilience), dans le cas d'une éprouvette entaillée, [23] on utilise l'équation :

$$a_{cu} = \frac{W}{b_u \cdot h} \quad (2.10)$$

Avec a_{cu} : la résistance au choc Charpy (ou résilience).

W : l'énergie absorbée par l'éprouvette en Joules. h : l'épaisseur de l'éprouvette en Millimètres. b_u : la largeur de l'éprouvette en Millimètres [44].

Pour une éprouvette entaillée, le terme b_u est remplacé par b_N qui représente la largeur restante, en millimètres, à la base de l'entaille de l'éprouvette.

II.4 Analyse du sol sur le tracé de ligne AST [43]

Les lignes de canalisation de transport du gaz GPL et des carburants issus de la raffinerie d'Arzew suivent le même tracé traversant les sols de compositions différentes suivantes, d'après l'entreprise nationale NAFTAL :

Sondage S1

0.00m-0.6m	Terre végétale encroûtée
0.50m-1.6m	Encroûtement grésocalcaire rose beige.
1.60m-6.50m	Marnes brunâtres légèrement sableuse vers le sommet devenant verdâtres vers la base.
6.5m-8.20m	Grés calcaire grisâtre.
8.20m-10.0m	Marnes verdâtres feuilletée.

Sondage S2

0.00-0.50m	Terre végétale (argile brunâtre sombre concrétionnée).
0.50m-2.00m	Encroûtement grésocalcaire rose beige.
2.00-4.50m	Argile brunâtre sableuse enrobant des fragments calcaires.
4.50m-10.0m	Marnes verdâtres renfermant des fragments calcaires devenant feuilletées vers la base et intercalées d'un banc de grés calcaire entre 5.80m et 7.10m

Tableau 2.3: Composition chimique de la solution de sol AST[6]

Eléments	Résultats en (mg/l)
Fe	0.25
Cu	0.013
Pb	0.016
Ag	0.003
Ni	0.024
Na	423
Ca	17.3
K	0.21
Mg	10.4

II.5 Expertise de la ligne AST

La canalisation « AST » nécessite plus de soins, d'entretien et de surveillance car il s'agit d'une canalisation de transport du gaz pétrolier liquéfier GPL (produit dangereux).

II.5.1 Système de protection anticorrosion

La ligne est protégée des agressions corrosives extérieures par une double protection passive par revêtement et active par protection cathodique dans le but de maintenir l'acier dans ses domaines de protection

II.5.1.1 Protection passive

La fonction essentielle d'un revêtement est d'isoler physiquement, le plus parfaitement possible, le métal du milieu ambiant prévenant ainsi tout mécanisme de corrosion, et exempt de toutes défaillances. Toute imperfection ou défaut dans le revêtement constitue une zone potentielle d'amorce de corrosion et de fissuration. Deux procédés sont utilisés pour assurer cette protection :

- Enrobage pour les conduites enterrées
- Peinture pour les conduites aériennes

L'intérêt de protéger les canalisations à l'aide des revêtements est double. En effet, les processus de corrosion font intervenir l'eau en tant qu'électrolyte, et divers oxydants susceptibles de capter les électrons libérés par l'oxydation du métal.

Le rôle du revêtement est donc de limiter le flux de ces produits en créant une barrière physique. Ces revêtements épais (*quelques millimètres*) ont par ailleurs une fonction de protection mécanique du tube lors du remblai des fouilles, bien que ce ne soit pas leur rôle principal. Cette protection n'est cependant pas totalement efficace car l'expérience a montré que la majorité des défauts de revêtement constatés sur les canalisations a été créé par des pierres tombées sur le tube ou ayant poinçonné le revêtement.

Les mécanismes de protection par des revêtements peuvent être très complexes et dépendent de la nature des matériaux, des systèmes de revêtement utilisés, ainsi que des conditions de service.

La **SONATRACH** a utilisé lors du premier service des canalisations les revêtements organiques, à base de **brai de houille** ou de **bitume de pétrole**. Les **polyéthylènes** extrudés (**PE**) bi et tri-couches et **polyuréthanes (PU)** appliqués à l'extérieur des gazoducs et l'époxyde appliqué à l'intérieur, ont constitué la génération suivante.

Revêtements hydrocarbonés:

Les revêtements hydrocarbonés ont été effectués sur l'acier dès leur premier service en 1976, (*abandonnés actuellement au profit de revêtements à base de polyéthylène*). Pour ces revêtements, une distinction entre la notion de matériaux constitutifs du revêtement et celle de revêtement doit être faite. Il s'agit de produits composites épais, de 2 à 5 mm, constitués d'une matrice organique hydrophobe, à base de bitume de pétrole ou de brai de houille, et de fibres de renfort inorganiques, de type fibre de verre.

Ces revêtements sont constitués d'une part d'émaux obtenus à partir des résidus lourds de la distillation de pétrole brut ou par cokéfaction de la houille, et d'autre part d'une matrice renforcée par des fibres de verre afin d'assurer la tenue mécanique du revêtement.

Le **bitume** est un mélange complexe issu de la distillation du pétrole, il est composé de produits classés en deux ou quatre familles selon les auteurs.

Les propriétés des bitumes ont été particulièrement étudiées par le monde pétrolier en raison des enjeux financiers liés à la possibilité de décomposer ces produits lourds en matières combustibles. Les constituants des **brais de houille** sont aussi très variés, et leurs caractérisations a fait l'objet de nombreuses études reprises dans les thèses de Couderc [45] et Delessard[46]. Jusqu'à présent ces deux types de matériaux étaient considérés comme identiques vis-à-vis des propriétés anticorrosion, et classés comme des revêtements de type C,

tout en étant par ailleurs de nature chimique totalement différente. Le brai, en tant que sous-produit de la houille, est issu de la décomposition de matières végétale, tandis que le bitume est plutôt d'origine animale. De plus, ces deux types de matériaux sont a priori considérés comme chimiquement incompatibles. Une norme permet en pratique lorsque l'on se trouve en présence des deux revêtements d'origines inconnues, de vérifier leur éventuelle compatibilité.

- Si le bitume est appliqué sur le brai, il s'amollit et disparaît par écoulement tandis que le bitume reste exposé et vieillit rapidement;
- Si le brai est appliqué sur le bitume, il peut durcir et craquer.

Ceci était d'une importance capitale lors des réparations des revêtements il y a quelques décennies, il était absolument nécessaire d'utiliser le même matériau. A l'heure actuelle, les réparations sont simplifiées grâce aux bandes polymère pourvues d'adhésif et appliquées à froid, quelle que soit la nature du revêtement.

II.5.1.2 Protection cathodique [43]

Elle est le complément indispensable de la protection par revêtement. La protection cathodique, revêt une importance primordiale pour leurs longues durées de vie d'exploitation. Elle offre l'avantage pratique de pouvoir être contrôlé aisément en de nombreux points de l'ouvrage protégé par de simples mesures.

Néanmoins cette protection ne peut être efficace que si :

- Les installations fonctionnent en permanence (Sans interruption)
- Le potentiel du métal de l'ouvrage à protéger est maintenu en tout point et dans le temps par rapport à l'électrolyte en dessous du seuil de protection
- Les défauts éventuels y compris ceux du revêtement sont éliminés du système.

Aussi, il est nécessaire de procéder à la vérification périodique du bon fonctionnement de toutes les installations de protection cathodique.

II.5.1.2.1 Critères de protection

Il existe plusieurs critères d'évaluation de la protection cathodique, le plus couramment utilisé est le critère de potentiel.

Des études théoriques, confirmées par la pratique, ont permis de définir pour chaque métal un potentiel d'immunité ou potentiel minimum de protection.

Le potentiel minimum de protection est de -850 mV par rapport à l'électrode de référence impolarisable au sulfate de cuivre $\text{Cu}/\text{CuSO}_4^-$

II.5.1.2.2 Moyens de protection cathodique

Ils sont de trois sortes :

- La protection par soutirage de courant
- La protection par anodes réactives
- La protection en présence de courant vagabonds (drainage).

II.5.1.2.2.1 Protection par soutirage de courant

L'abaissement du potentiel est obtenu en reliant l'ouvrage à protéger à la borne négative (-) d'une source électrique de courant continu, la borne positive (+) sera reliée à une masse métallique enterrée (déversoir) pour fermer le circuit.

Généralement on dispose d'une source électrique de courant alternatif du réseau de distribution basse tension qu'il faudra abaisser et transformer en courant continu à l'aide d'une « transfo-redresseur ».

Le poste de soutirage comprend généralement :

- Un branchement électrique basse tension
- Un transfo-redresseur
- Une anode déversoir (Rail)
- Une prise de terre du transfo-redresseur
- Les câbles de liaison électrique entre :
 - ✓ Le transfo-redresseur (Borne -) et la conduite
 - ✓ Le transfo-redresseur (Borne +) et l'anode déversoir
 - ✓ Le transfo-redresseur et la prise de terre

II.5.1.2.2.2 Protection par anode réactive

Le mode de protection consiste à créer une pile en connectant le métal à protéger à un métal plus électronégatif dans un milieu ambiant. L'anode sacrificielle est généralement une pièce en Zinc ou au magnésium. Afin d'assurer une dissolution régulière de l'anode et pour une répartition du courant, on constitue autour de celle-ci un milieu régulateur de corrosion appelé back-fill.

II.5.1.2.2.3 L'électrode au sulfate de cuivre

C'est un réservoir cylindrique en matière plastique obturé à sa base par un bouchon poreux et rempli d'une solution saturée de sulfate de cuivre dans laquelle plonge une tige en cuivre. Cette électrode sert de référence pour toute mesure de potentiel.

Pour la fiabilité de la mesure il faut prendre les précautions suivantes :

- La tige en cuivre soit propre et non oxydée
- La solution doit être saturée (Reste au fond des cristaux de sulfate de cuivre)
- Humidifier l'emplacement de l'électrode
- Eviter de placer l'électrode dans des endroits trop résistants

L'électrode soit placée au droit de l'axe de la conduite.

II.5.1.2.3 Protection en présence de courant vagabonds (Drainage)

Quand une canalisation métallique se situe à proximité d'installations pouvant émettre des courants vagabonds dans le sol (courants continus), il est nécessaire d'établir une liaison électrique polarisée entre la conduite et la source émettrice pour éviter les risques de corrosion. Cette liaison polarisée (drainage) s'effectue entre l'ouvrage à protéger et le pôle négatif de la source émettrice.

b) Surveillance et contrôle des dispositifs de protection cathodique

Les installations de la protection cathodique doivent fonctionner sans interruption. Etant soumises à des risques d'arrêt fortuits provenant soit de défauts, soit de l'appareil lui-même, soit des pannes de secteur, soit de ruptures de câbles de liaison, elles nécessitent une bonne surveillance.

b.1) Fréquence

Le contrôle des installations de protection cathodique est effectué à fréquence variable suivant la nature du système de protection.

b.2) Contrôle systématique

b.2.1) Objectif

En vue de s'assurer de l'efficacité de la protection cathodique tout le long de la canalisation, il est nécessaire d'effectuer régulièrement des mesures électriques de potentiel, de courant et de résistance aux différents points de mesures.

b.2.2) Lignes

b.2.2.1) Prise de potentiel

C'est un moyen qui nous permet d'accéder à la conduite pour relever le potentiel de celle-ci à ce point.

La mesure du potentiel se fera à l'aide d'une électrode de référence impolarisable au sulfate de cuivre Cu/CuSO_4 et d'un voltmètre à forte résistance interne.

En pratique lors des mesures, l'électrode de référence sera placée au niveau du sol au droit de la conduite après avoir humidifier l'endroit de pose de celle-ci.

Il est important de vérifier la connexion des câbles de mesure de l'appareil : le plus (+) de l'appareil doit être relié à l'électrode et le moins (-) doit être relié à la conduite.

L'entretien de la prise de potentielle se fera par :

- Vérification de l'isolement des câbles conducteurs par rapport aux corps de la prise de potentiel
- Le maintien propre de la borne de mesure de la prise de potentielle
- Le graissage des boulons de couvercle de la prise de potentiel
- Le maintien du numéro et du PK de la prise du potentiel lisible.

b.2.2.2) Raccord isolant

La vérification de l'efficacité du raccord isolant se fera par les mesures suivantes :

- Potentiel shunté
- Potentiel amont et aval déshunté
- Mesure de l'intensité du courant traversant le shunt.

b.2.2.3) Gaines

La vérification de l'isolement canalisation/gaine métallique se fera au niveau des prises de potentiel installées sur la canalisation, et la gaine par la mesure du potentiel conduite/sol, et du potentiel gaine/sol par rapport à l'électrode de référence au sulfate de cuivre Cu/CuSo4.

Les résultats de ces mesures doivent être de préférence reportés sur des graphes pour une meilleure évaluation de la protection cathodique.

Fréquence

Pour assurer une bonne protection cathodique le long de la canalisation, des mesures électriques de potentiel, d'intensité et de résistance sont nécessaires à faire, car ils sont la base du suivi de la protection.

b.3) Contrôle non systématique

Les opérations des contrôles non systématiques interviennent à la suite d'anomalies constatées pour compléter éventuellement à la vérification périodique.

Ce contrôle peut comprendre :

- La recherche des défauts d'isolement de la canalisation :
 - Défauts des joints isolants
 - Défauts de revêtement
 - Contact avec d'autres structures métalliques enterrées
 - Vérification de la résistance d'isolement
- La vérification de la résistance d'anode
- Les mesures d'influence mutuelle entre ouvrages métalliques voisins
- Les mesures d'influence électrique haute tension

- Les mesures concernant l'agressivité du sol, présence de courants vagabonds (mesures de résistivité, analyse chimique)

Les différents types de défauts doivent être traités cas par cas.

Dans un poste de soutirage alimenté en 220V – 380V, sur ou à proximité des pièces sous tension, ou lorsqu'il y a des risques de contacts directs de l'opérateur avec des parties nues sous tension, il est nécessaire de mettre hors tension le poste de soutirage par ouverture du disjoncteur ou retrait de l'alimentation du socle de la prise de courant et de vérifier l'absence de tension.

Dans un poste de drainage, il est nécessaire de séparer le poste de toute autre source de courant possible par l'ouverture de l'interrupteur prévu à cet effet et de vérifier l'absence de tension.

Il est recommandé à ce qu'aucun travail d'intervention ne soit effectué sur les ouvrages durant les mauvaises conditions atmosphériques (pluies, orages).

II.5.1.2.4 Quelques résultats de la protection cathodique sur la ligne AST [43]

1) Relever des paramètres du transformateur redresseur Mois de JANVIER 2012

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Poste de sectionnement (PS)				*	*	*	*			
Transformateur Redresseur (TR)		*	*	*	*					

Opération Préliminaire Transformateur Redresseur

Le Fonctionnement	TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6	Observations
Connexion mise à la terre	-	OK	OK	OK	OK	OK	
Connexion Câble positif	-	OK	OK	OK	OK	OK	
Connexion Câble négatif	-	OK	OK	OK	OK	OK	

Connexion Câble d'Alimentation	-	OK	OK	OK	OK	OK	
Connexion Câble ER	-	OK	OK	OK	OK	OK	
Commutateur (RHEOSTAT)	-	OK	OK	OK	OK	OK	

Tableau du contrôle des transformateurs redresseurs de la Protection cathodique
Relève de l'ensemble des postes transformateurs redresseurs

PK	PS/TR	Potentiel OFF E_{OFF} (mv)	Potentiel ON E_{ON} (mv)	Sortie courant I_s (A)	DDP à la sortie U_s (V)	RHEOS TAT (%)	R (Ω)
23+900	N°02/N°01	✓	✓	✓	✓	✓	✓
51+200	N°04/N°02	✓	✓	✓	✓	✓	✓
68+900	N°05/N°03	✓	✓	✓	✓	✓	✓
93+200	N°06/N°04	-1400	-1600	0.9	1.5	5	1.66
109+900	N°07/N°05	-1200	-1600	5	2.5	11	0.50
141+300	N°09/N°06	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Observation :

→ Le TR N°06 (PS N°09) SIDI ABDELLI est en panne, l'ampèremètre indique la valeur nulle ($I=0A$)

2) Relever des paramètres du transformateur redresseur Mois de MAI 2012

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Poste de sectionnement (PS)		*		*	*	*	*			
Transformateur Redresseur (TR)	*	*	*	*	*					

Opération Préliminaire Transformateur Redresseur

Le Fonctionnement	TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6	Observations
Connexion mise à la terre	-	OK	OK	OK	OK	-	
Connexion Câble positif	-	OK	OK	OK	OK	-	
Connexion Câble négatif	-	OK	OK	OK	OK	-	
Connexion Câble d'Alimentation	-	OK	OK	OK	OK	-	
Connexion Câble ER	-	OK	OK	OK	OK	-	
Commutateur (RHEOSTAT)	-	OK	OK	OK	OK	-	

Tableau du contrôle des transformateurs redresseurs de la Protection cathodique

Relève de l'ensemble des postes transformateurs redresseurs

PK	PS/TR	Potentiel OFF E_{OFF} (mv)	Potentiel ON E_{ON} (mv)	Sortie courant I_s (A)	DDP à la sortie U_s (V)	RHEOST AT (%)	R (Ω)
23+900	N°02/N°01	✓	✓	✓	✓	✓	✓
51+200	N°04/N°02	-1200	-1900	5	2	15	0.4
68+900	N°05/N°03	-1200	-1900	5	6	12.5	1.2
93+200	N°06/N°04	-1600	-1900	2	1.5	8	0.75
109+900	N°07/N°05	-1200	-1900	8	2	8	0.25
141+300	N°09/N°06	✓	✓	✓	✓	✓	✓

PK : Point kilométrique (PK 23+900 c'est-à-dire le point kilométrique 23.9 km de la ligne AST)

E_{OFF} : Potentiel de la polarisation

E_{ON} : Potentiel de la canalisation

I : Courant injecté dans la canalisation

II.5.2 Détection des fuites

Vu que la ligne a été récemment réceptionnée, il a été enregistré une panne lors des travaux d'installation qui consiste à la fuite à haute pression du GPL.

La détection des fuites le long de la canalisation en condition dynamique est effectuée par la comparaison directe entre la quantité expédiée par le terminal de départ à Arzew et la quantité reçue par le poste de coupure et de reprise de Sidi Bel Abbès ou le terminal arrivée Tlemcen, ainsi que par la comparaison des valeurs de pressions transmises aux salles de contrôle des stations. Si une différence significative (supérieure à l'erreur du comptage) est détectée ou une chute de pression importante est enregistré sur le tableau du contrôle au niveau les terminaux PC SBA et arrivé Tlemcen donc une fuite est survenue sur la ligne.

En condition statique, le contrôle de la canalisation est effectué par des transmetteur des pressions installés l'intérieur de chaque ouvrage. Si la déférence des pressions entre tronçon amont et aval descend au dessous de la normale, le tableau électronique actionne la vanne électrique ESDV (vanne électrique d'arrêt d'urgence) de se fermer jusqu'à l'intervention des technicien. Ce système de contrôle est complété par une surveillance par des opérateurs utilisant les indicateurs locaux « PI » installés sur chaque site et poste de sectionnement.

L'intervention au niveau de la fuite nécessite en préalable l'identification du tronçon affecté et la rapidité d'actions avec les moyens humains et matériels adéquats, tout en respectant les consignes de sécurité.

II.6 Contrôle CND

II.6.1 contrôle visuelle

II.6.1.1 Objectifs spécifiques :

- Connaître le principe, les bases théoriques du contrôle visuel et son instrumentation
- Evoquer les méthodes de traitement du signal (filtrage, localisation, caractérisation des mécanismes d'endommagement...)
- Connaître les applications industrielles et de laboratoire de la technologie (contrôle des appareils à pression, détection de corrosion, détection de fuites, examen de structures composites...)

II.6.1.2 Principe

L'examen visuel est le procédé de contrôle le plus ancien, le plus simple et le plus général. L'examen visuel est aussi utilisé dans l'étape finale de plusieurs autres procédés de contrôle

non destructifs. L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéité locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhitoires pour des produits plats du type tôles, tissus, verre, etc. L'examen purement visuel présente toutefois des limites à différents niveaux. Ceci justifie d'ailleurs, l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique, dont les principaux sont décrits plus loin.



Figure 2.6 : Illustration Equipement d'aide au contrôle visuel [46]

Dans toutes les situations d'examen d'un objet, les conditions d'éclairage sont essentielles pour la fiabilité du contrôle optique. Il s'agit d'abord de se placer dans des conditions énergétiques, de luminosité et de longueur d'onde permettant à l'œil de travailler avec la meilleure acuité. Un éclairage de plus de 300 lux en lumière vert - jaune à 0,55 mm est optimal. (Le LUX est l'unité de mesure pour l'éclairage. Un éclairage de 1 lux correspond à l'éclairage d'une surface de 1m² par flux lumineux).

Il faut aussi adapter le type et l'orientation de l'éclairage à la nature des défauts en vue d'améliorer le contraste. L'éclairage diffus, fourni par exemple par un ensemble de sources lumineuses placées derrière un écran dépoli, est utilisé dans la recherche de défauts variés, sans orientation définie. Pour détecter facilement les défauts du type rayures orientées sensiblement dans la même direction, on préfère l'utilisation d'un éclairage directif associé à une observation de la surface sous un angle voisin de celui de la réflexion spéculaire (figure ci dessous). Les défauts présentant un certain relief sont en général bien mis en évidence grâce à un éclairage rasant.



Figure 2.7 : Illustration Equipement d'aide au contrôle visuel [46]

Il faut toutefois rappeler que les outils naturels de cette technique (l'œil et le cerveau) sont très sensibles à différents facteurs difficiles à chiffrer et à répertorier comme ceux d'ordre psychique ou physiologiques. La qualité d'observation de l'œil se dégrade avec l'âge, elle est très sensible à l'état d'esprit et à l'expérience de l'observateur, elle reste limitée en termes de dimension du défaut et rend problématique le contrôle des objets en mouvement.

L'utilisation de moyens d'aide optique à la vision tels qu'une loupe binoculaire, un microscope, un endoscope, un microscope, la télévision..., donne au contrôle visuel une nouvelle dimension. Ces techniques, bénéficient actuellement des moyens numériques d'acquisition et de traitement d'images, qui leur donnent beaucoup plus de rapidité, d'efficacité et de fiabilité. Ces techniques exploitent pleinement les moyens modernes de l'informatique et de l'intelligence artificielle.

II.6.1.3 Application

Le champ d'application concerné par cette rapide évolution est celui du contrôle industriel en ligne, qu'il s'agisse du contrôle des produits fabriqués en continu tels que les bandes de tôle, de papier, de verre, de plastique ou du contrôle de pièces fabriquées en grande série, pour lesquelles on s'intéresse non seulement à l'absence de défaut de surface mais aussi à celle de défauts d'aspect ou d'irrégularités dimensionnelles (contrôle de tuiles, de boîtes, de pièces moulées, forgées, usinées).

Indépendamment du contrôle en fabrication, le contrôle optique visuel, direct, par endoscope ou relayé par un équipement de télévision est de pratique courante dans les opérations de maintenance telles qu'on les effectue dans les domaines de l'aéronautique, du génie nucléaire ou chimique, et dans le génie civil. Le contrôle optique intervient enfin comme étape ultime des procédés de contrôle décrits par ailleurs tels que le ressuage ou la magnétoscopie dont le

rôle n'est d'ailleurs autre que d'améliorer la lisibilité optique des petits défauts. Il est utile aussi de rappeler que les principales techniques de contrôle non destructif délivrent en fait des images qu'il faudra lire et éventuellement traiter : c'est le cas pour la radiographie ou la thermographie, mais la cartographie des défauts devient petit à petit un élément important des contrôles ultrasonores ou par courants de Foucault.

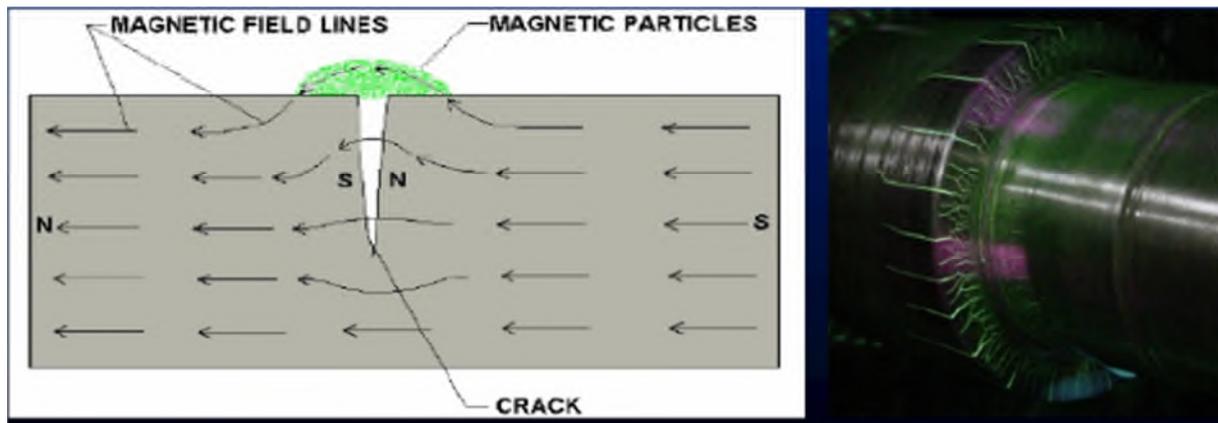
II.6.2 Contrôle par flux magnétique

II.6.2.1 Objectifs spécifiques:

- Connaître le principe, les bases théoriques du Magnétoscopie et son instrumentation
- Utiliser les méthodes de traitement du signal (filtrage, localisation, caractérisation des mécanismes d'endommagement...)
- Connaître les applications industrielles et de laboratoire de la technologie (contrôle des appareils à pression, détection de corrosion, détection de fuites, examen de structures composites...)

II.6.2.2 Principe

La théorie des circuits magnétiques indique que la présence d'un entrefer correspond à un fort accroissement local de la réluctance du circuit et donc de la différence de potentiel magnétique (d.p.m.), constituant ainsi un obstacle au flux magnétique dont les lignes de force doivent alors s'épanouir latéralement selon un flux de fuite comme l'indique la figure ci -contre. Cet effet de dispersion des lignes de flux s'exerce de même pour un entrefer minime, dans la mesure où le rapport des réluctances entre l'entrefer et le circuit est inversement proportionnel à la perméabilité relative de celui - ci, soit un rapport de 600 à 1000 pour un circuit ferromagnétique en acier excité en deçà de la saturation. Cet effet de dispersion d'un flux magnétique hors d'une pièce ferromagnétique, au droit d'une fissure débouchant ou sous - cutanée (ou toute autre hétérogénéité non ferromagnétique se comportant comme un entrefer), est à la base d'une gamme de procédés magnétiques de détection des défauts de surface dans les aciers dont le plus connu et le plus employé est la magnétoscopie. Ces procédés magnétiques diffèrent entre eux principalement par le mode de mise en évidence du flux de fuite magnétique correspondant à la dispersion de flux décrite ci - dessus.



En magnétoscopie, on observe visuellement une accumulation de poudre de fer ou de magnétite colorée provoquée par le flux de fuite. En Magnétographie, on recueille la tracemagnétique du flux de fuite sur un film, une bande ou une pâte d'empreinte magnétisable; les autres procédés sont regroupés sous le vocable détecteur à flux de fuite (magnetic leakage flux testing); il s'agit généralement d'appareils de contrôle automatique de barres et de tubes d'acier mettant en œuvre des détecteurs ponctuels de flux électromagnétiques.

La première chose à noter est que le champ magnétique à considérer est celui qui s'exerce à proximité et en surface de la pièce; il devra être perpendiculaire à la direction présumée des fissures recherchées, sinon l'effet d'entrefer sera minimisé, et même annulé s'il s'agit de directions parallèles. Le contrôle de l'orientation du flux magnétique et de son intensité s'effectue par la mesure du champ magnétique tangentiel, à l'aide d'un appareil à sonde de Hall que l'on déplace sur la surface de la pièce.

Pour les pièces de forme complexe, on doit vérifier qu'en tout point le champ magnétique atteint la fourchette de valeurs que l'on s'est fixée pour l'essai. Pour le contrôle magnétoscopique, les valeurs de champ tangentiel recommandées par les nombreuses normes et spécifications sont en fait très étalées, variant de moins de 800 à 12000 A/m (10 à 150 œrsteds) en fonction de la nature de la pièce et de la finesse des défauts recherchés. À titre d'exemple de choix, on peut indiquer qu'un champ d'au moins 1000 à 1500 A/m sera suffisant pour un contrôle de défauts notables sur des barres en acier au carbone, alors qu'un champ d'au moins 10000 A/m sera requis pour le contrôle de pièces de sécurité forgées pour l'aéronautique.

La détection visuelle des champs de fuite magnétique au droit des défauts peut s'effectuer en observant des accumulations de limaille de fer dues aux concentrations de flux sur la surface de la pièce à contrôler. En pratique, on utilise des révélateurs magnétiques spécialement

adaptés, constitués d'une poudre ferromagnétique de granulométrie bien définie, et associés souvent à des traceurs colorants et généralement fluorescents sous lumière noire.

Les produits, qui doivent être répartis uniformément sur la surface de la pièce pendant la magnétisation, se présentent soit sous forme de poudre sèche, soit beaucoup plus fréquemment sous forme d'une encre magnétique. Le support liquide le plus utilisé est le pétrole; cependant, son emploi implique certains risques (incendie, allergie, odeur, stockage) et son rejet à l'égout est interdit, c'est pourquoi on utilise parfois des encres à l'eau dont le pouvoir mouillant est accru par l'ajout d'agents tensioactifs adéquats ; certains types d'encres à l'eau comportent en outre des agents anti-moussants et des inhibiteurs de corrosion.

La sensibilité de détection est liée en partie à la granulométrie des particules de fer ou d'oxyde, qui doivent être de toute façon très homogènes. Pour une recherche de très fins défauts, on choisira des poudres de moins de 1 mm, alors qu'on minimisera le bruit de fond lors du contrôle d'une pièce brute en choisissant une poudre de 50 à 100 mm. Les liqueurs magnétiques évoluent dans le temps, s'épuisent et se polluent lors de l'utilisation, aussi est-il nécessaire de les contrôler régulièrement; la concentration des particules est le paramètre le plus important à contrôler; elle se situe selon les types de révélateurs entre 0,5 et 10 g/l et s'évalue soit par décantation d'un volume donné pendant un temps suffisant (plusieurs dizaines de minutes), soit, plus rapidement, par comparaison avec un révélateur de référence sur une balance magnétique.

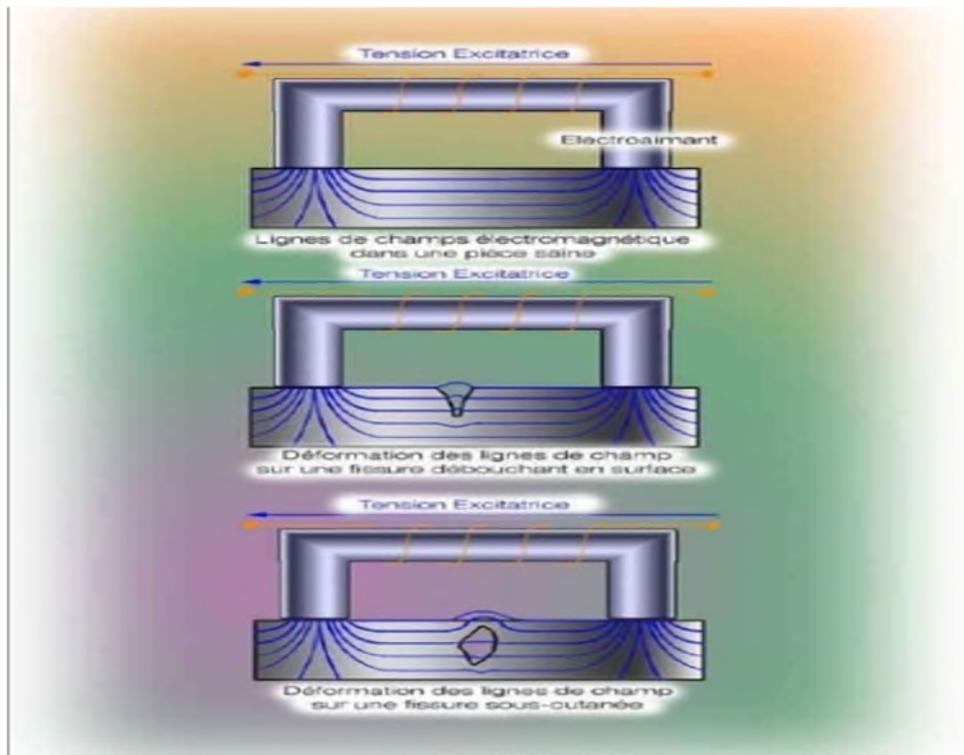


Figure 2.8 : Principe de la magnétoscopie [46]

II.6.2.3 Mise en œuvre

L'examen d'une pièce se déroule pratiquement en un seul temps, correspondant simultanément à la magnétisation, à l'apport du révélateur et à la lecture visuelle.

L'opération doit être répétée éventuellement en modifiant l'orientation du champ magnétisant, afin d'être sûr de détecter tous les défauts quelle que soit leur orientation.

L'opération de contrôle doit être précédée d'une préparation de la pièce destinée à la mettre dans les conditions optimales d'examen : nettoyage, dégraissage, éventuellement démagnétisation préalable. Le contrôle sera lui-même suivi d'opérations de marquage, de repérage, éventuellement d'une démagnétisation effectuée dans les conditions décrites plus loin.

II.6.2.4 Application et limites

Bien conduit, l'examen magnétoscopique se révèle d'une sensibilité sans égale pour la détection des défauts de surface les plus ténus sur les pièces en acier et autres alliages ferromagnétiques. Le procédé, grâce à ses nombreux moyens de mise en œuvre et de réglage, s'adapte bien au contrôle de nombreux types de pièces manufacturées. La recherche par magnétoscopie des défauts sous-cutanés est possible mais nettement plus délicate, ce qui fait qu'on aura tendance à préférer ici le contrôle par ultrasons, bien qu'il soit possible de mettre en évidence par magnétoscopie des hétérogénéités non visibles par tout autre procédé ; c'est le cas par exemple de la recherche d'amas inclusionnaires dans des tôles minces, ce

contrôle ne pouvant malheureusement être effectué que sur des échantillons de faibles dimensions.

Une des faiblesses de la magnétoscopie est en effet sa relativement faible productivité liée à la durée des manutentions et de l'examen visuel des surfaces : une automatisation partielle ou totale est réalisable mais, en définitive, ce sont les procédés à mesure de flux de fuite qui ont permis d'envisager un contrôle à grand débit des produits sidérurgiques longs de type barres, tubes ou fils. Ces procédés sont très performants, puisqu'ils permettent de détecter des criques et lignes de profondeur supérieure à 0,3 mm sur des barres brutes et de l'ordre de 0,1 mm ou parfois moins sur des produits tréfilés ou calibrés. C'est ainsi que ces appareils à flux de fuite figurent au catalogue des principaux constructeurs d'appareillages à courant de Foucault avec lesquels ils se partagent le marché du contrôle des produits longs.

II.6.3 Contrôle par ultrason

II.6.3.1 Objectifs Spécifiques

- Connaître le principe, les bases théoriques d'ultrasons et son instrumentation
- Utiliser les méthodes de traitement du signal (filtrage, localisation, caractérisation des mécanismes d'endommagement...)
- Connaître les applications industrielles et de laboratoire de la technologie (contrôle des appareils à pression, détection de corrosion, détection de fuites, examen de structures composites...)

II.6.3.2 Principe

Le contrôle par ultrasons est une méthode d'examen relativement récente. Les premières applications industrielles ont été réalisées, à titre expérimental la veille de la seconde guerre mondiale, soit vers 1935. En raison de la lente évolution des matériels de contrôle tributaires des progrès de l'électronique, le développement du contrôle par ultrasons n'apparut qu'à partir de 1955 environ. Depuis, cette méthode de contrôle constitue un puissant outil d'investigation. Elle présente à l'heure actuelle un vaste champ d'application qui s'étend aux matériaux métalliques, plastiques ou composites et aux milieux à structure hétérogène tels les bétons. Cette méthode d'examen s'applique alors : aux produits moulés, aux produits forgés, aux

produits laminés (tôles, rails), aux produits étirés (tubes, ronds,...), aux assemblages soudés, brasés ou collés.. Le contrôle par ultrasons permet de détecter des manques ou des discontinuités de la matière dans des produits à l'état d'ébauche ou fini quel que soit le mode d'élaboration de ceux-ci.

Toutefois, la propriété que possèdent les ultrasons est de se propager sur des distances de plusieurs décimètres, voire de plusieurs mètres. De ce fait, il est possible de détecter des défauts de faible importance dans des pièces dont l'épaisseur n'en permettrait pas le contrôle radiologique. En ce sens, le contrôle par ultrasons permet de mesurer les épaisseurs de parois dont l'une des faces est inaccessible. En continuation de la gamme sonore, les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15 kHz à plus de 100MHz.

II.6.3.3 Principe physique

Un instrument fonctionnant en mode pulsation écho consiste en un écran de visualisation, un émetteur et un amplificateur, avec en général une alimentation indépendante. Le fonctionnement sera expliqué d'une façon schématique (schémas blocs),

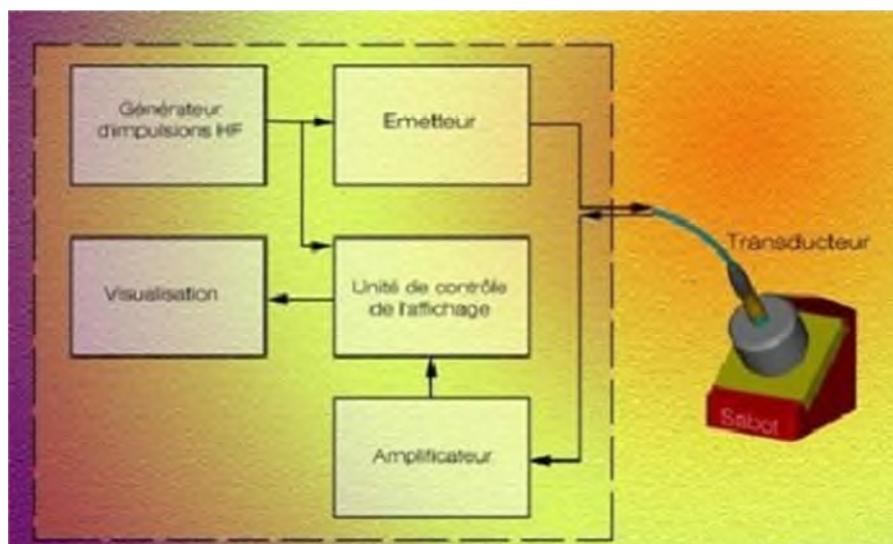


Figure 2.9 : Schéma générique d'un instrument à ultrasons [46]

Sans trop détailler l'électronique des circuits. Celle ci figure sur les données techniques fournies par le fabricant de l'appareil en général. Les appareils fonctionnant en mode pulsation – écho associés à des capteurs piézoélectriques sont les types de capteur le plus répandu en pratique de l'ultrason. La pulsation électrique de l'émetteur est véhiculée au capteur à travers un câble. Suite à quoi le transducteur fournit une onde mécanique qui se propagera dans le corps sous épreuve. A la rencontre d'un changement de milieu, l'onde se réfléchit produisant un écho. Celui – ci remonte au transducteur qui le traduit en impulsion électrique. L'impulsion est en suite amplifiée et visualisée.

II.6.3.4 Contrôle par ultrasons

Le contrôle par ultrasons est une méthode de contrôle non destructif permettant la détection de défaut à l'intérieur d'un matériau. Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission et la réflexion d'onde de type ultrasons à l'intérieur d'un matériau. Une onde ultrasons est émise par un palpeur placé sur la surface du matériau à contrôler et se propage dans le matériau. Il existe des méthodes par contact (le palpeur est en contact avec la pièce) ou par immersion (la pièce et le palpeur sont immergés dans de l'eau). Dans le cas de la méthode par contact, il est nécessaire d'ajouter un couplant (eau ou gel) entre le palpeur et la pièce pour assurer la transmission des ondes. Lorsque ces ultrasons rencontrent une interface délimitant deux milieux ayant des impédances acoustiques différentes, il y a réflexion. Les ultrasons réfléchis sont captés par un palpeur (qui peut être le même que l'émetteur). Il y a création d'un « écho ». Dans le cas d'une pièce comportant deux surfaces, la détection de défaut se fait en comparant le temps mis pour faire un aller retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut. D'un point de vue pratique, on utilise un écran d'oscilloscope. Les échos sont représentés par des pics sur l'écran.

Exemple du contrôle par ultrasons :

Exemple du contrôle d'une tôle

- L'écran de l'oscilloscope montre un pic d'entrée à gauche et un pic de sortie à droite. La distance entre les deux pics correspond à l'épaisseur de la tôle
- .- Le palpeur émet au dessus d'un défaut, il y apparition d'un pic correspondant au défaut. La position relative du pic créé par le défaut permet de connaître sa profondeur.

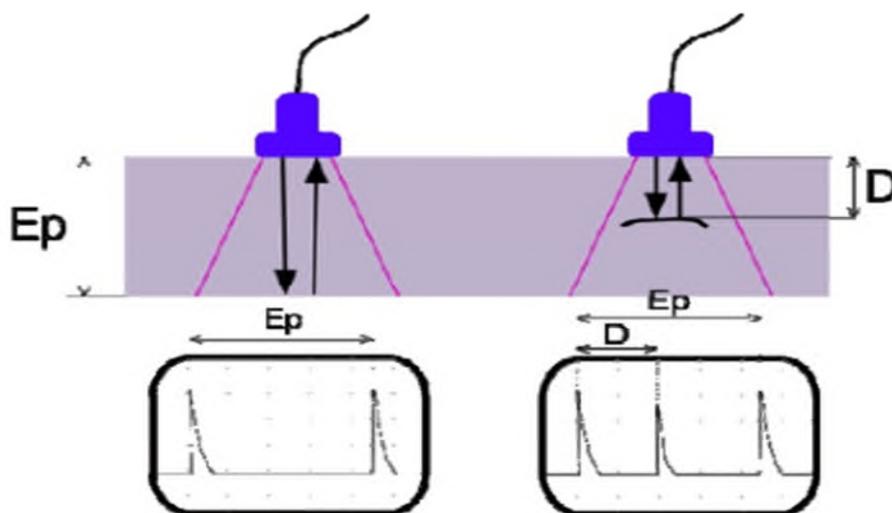


Figure 2.10 : Exemple du contrôle par ultrasons [46]

Principe physique du contrôle par ultrasons : Types d'ondes ultrasonores :

Plusieurs types d'ondes ultrasonores sont susceptibles de se propager dans les milieux solides.

Ces ondes se différencient les unes des autres par :

- La forme et la direction des trajectoires qu'elles impriment aux particules du matériau dans lequel elles se propagent,
- La vitesse de propagation ou célérité,
- La distance à laquelle elles sont susceptibles de se propager dans le matériau.

On distingue quatre types d'ondes ultrasonores : les ondes longitudinales ou de compression, les ondes transversales ou de cisaillement, les ondes de surfaces ou de RAYLEIGH et les ondes LAMB ou de plaque.

II.7.Détection par outil intelligent [43]

II.7.1 Objet

Le raclage par outil intelligent permet de connaître avec exactitude l'aspect géométrique intérieur de la canalisation et le degré de corrosion interne et externe, en plus d'un excellent nettoyage de cette dernière, et enfin, la localisation détaillée des longueurs et points kilométriques le long du parcours ainsi que les ouvrages annexes.

Les opérations prévues par l'outil intelligent sont au nombre de cinq (05), à savoir :

- Racleur Calibreur ;
- Racleur à brosse ;
- Racleur Aimant ;
- Outil mannequin ;
- Outil intelligent

La première opération appelée « Calibrage », nous renseigne de manière définitive sur l'état intérieur de la conduite (diamètre intérieur effectif, ovalisations).

Cette opération sera effectuée une seule fois.

Les autres opérations de nettoyage pourront être répétées en fonction des besoins et des résultats obtenus jusqu'à ce que la quantité des impuretés, contenu dans le produit récupéré dans la gare de racleur Arrivée, n'excède pas les **2.5Kg/100Km**.

Un racleur instrumenté se compose généralement de 4 sections fonctionnellement distinctes : une unité de traction qui assure l'entraînement du racleur par le fluide transporté, une alimentation électrique embarquée, un système de mesure et un système d'acquisition et d'enregistrement des mesures.

Ces différents systèmes sont regroupés dans des éléments reliés entre eux par des cardans assurant la flexibilité de l'ensemble (figure 2.11). Cette flexibilité est nécessaire pour que les racleurs puissent évoluer dans les coudes des canalisations à inspecter. Plus le diamètre de la canalisation est faible, plus il est nécessaire d'étirer les racleurs en longueur et de multiplier le nombre d'éléments afin d'embarquer tous les modules. Ceci conduit à des racleurs pouvant atteindre 6 mètres de longueur.

Les racleurs sont équipés d'une ou plusieurs roues codeuses qui permettent d'enregistrer la distance parcourue dans la canalisation afin de positionner ultérieurement les signaux relevés. Ils sont aussi souvent équipés d'un pendule qui permet de connaître l'orientation de l'outil à tout instant.

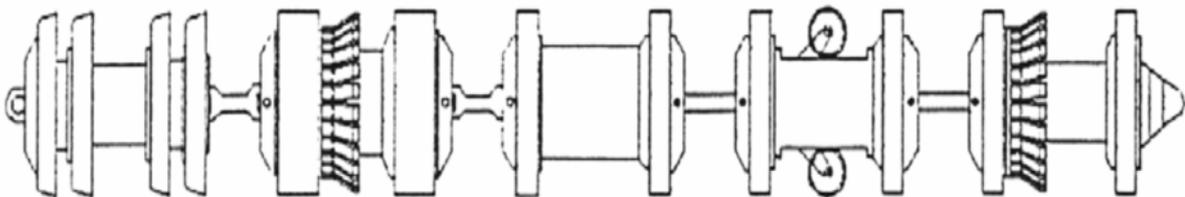


Figure 2.11 :Schéma type d'un racleur instrumenté

II.7.2 Détection par outil intelligent Cas de la ligne AST

Procédure de racleur par outil intelligent sur la ligne AST [43]

★ Description de l'opération de raclage et recommandations

Avant chaque opération, les tests préliminaires avant le démarrage devront être effectués pour la préparation des deux terminaux départ et arrivée, spécialement les circuits des gares de racleurs Départ et Arrivée, ainsi que la vérification des vannes de Dix (10) Postes de Sectionnement le long de la ligne.

★ Description de l'opération raclage

L'opération de raclage concernera les gares GRD 2001 du Terminal Départ Arzew, GRA 3001 et GRD 3001 du Poste de coupure Sidi Bel Abbas, GRA 4001 du Terminal Arrivée de Tlemcen munies de leurs vannes de lancement et de réception du racleur.

Pour la gare de racleur Départ, les vannes suivantes sont concernées :

- ESDV 2005 - Vanne de gare Ø10'' ,
- ESDV 2004 - Vanne de sortie Terminal Ø6'' ,
- HV 2006 - Vanne d'expédition racleur Ø6'' ,

Pour la gare de racleur d'arrivée de Sidi Bel Abess, les vannes suivantes sont concernées :

- ESDV 3001 - Vanne de d'entrée gare Ø10'' ,
- ESDV 3009 - Vanne d'entrée Terminal Ø8'' ,
- HV 3021 - Vanne BY PASS Entrée Terminal Ø6'' ,

Pour la gare de racleur départ Sidi Bel Abess, les vannes suivantes sont concernées :

- ESDV 3010 - Vanne de d'entrée gare Ø8'' ,
- ESDV 3002 - Vanne d'entrée Terminal Ø6'' ,
- HV 3052 - Vanne BY PASS Entrée Terminal Ø6'' ,

Pour la gare de racleur Arrivée, les vannes suivantes sont concernées :

- ESDV 4001 - Vanne de d'entrée gare Ø8'' ,
- ESDV 4002 - Vanne d'entrée Terminal Ø6'' ,
- Hv 4011 - Vanne BY PASS Entrée Terminal Ø6'' ,

La sortie du racleur du Terminal Départ sera signalée par un détecteur XSI 2001 installé à la sortie du terminal Départ.

La réception du racleur au Poste de Coupure de Sidi Bel Abess sera confirmée par un détecteur XSI 3002 installé sur gare de racleur GRA 3001, après la détection confirmée par XIS 4001 placé à 500m en amont du poste de coupure.

La sortie du racleur Poste de Coupure sera confirmée par un détecteur XSI 3003 installé à la sortie

La réception du racleur au Terminal Arrivée sera confirmée par un détecteur XSI 4002 installé sur la gare du racleur GRA 4001, après la détection confirmée par LE XIS 4001 placé à 500m en amont du terminal.

Une fois le racleur installé à l'intérieur de la gare de racleur départ, ce dernier sera projeté par la pression du gaz qui avoisine les 45 bars avec un débit de 125 m³/h (70T/H).

La vitesse du racleur sera près de 0.7 m/s et parcourra une distance d'environ 84km du Terminal Départ d'Arzew vers le Poste de Coupure de Sidi Bel Abbas en un temps d'environ 36 H.

Pour le parcours du Poste de Coupure vers le Terminal Arrivée de Tlemcen, d'environ 81km, sa vitesse avoisine 1.07m/s, le temps nécessaire à cette opération sera de 21 H.

La réception du produit se fera au Terminal Arrivée avec une pression minimale de 5 bars.

Observation :

La détection des défaillances par ultrasons par passage de l'outil intelligent est en cours de réalisation sur la ligne AST, vu que les résultats n'ont pas été remis pour étude, nous avons considérés dans cette étude les résultats d'inspection par outil intelligent de la ligne GZ1 reliant HassiR'mel à Arzew afin qu'on puisse appliquer notre modèle mathématique.

II.7.3 Détection par outil intelligent (ligne GZ1) [47]

La canalisation de la ligne **GZ1** a été victime de phénomène de corrosion, la gravité réside dans la vitesse dont elle a évolué (*perte de métal très avancé*) car elle avait dépassé les estimations.

En septembre 1996 le tronçon de gazoduc **GZ1**, reliant la station de compression **SC2** Oued M'Seka (*W.Laghouat*) à **SC3** Medarreg (*W.Tiaret*), avait fait l'objet d'une inspection de contrôle de pertes en métal, Cette inspection, confiée à **PII Group Limited (Canada) Ltd [47]**, a été faite au moyen d'un outil d'inspection interne **MagneScan HR**, permettant un sondage ultrasonique de l'épaisseur des parois (**Figure 2.12**).





Figure 2.12 :L'outil intelligent MagneScan HR [47].

II.7.3 .1 Données d'entrée :

Cette évaluation est basée sur les informations suivantes :

Caractéristiques techniques de la canalisation : API 5L X-60

Diamètre : 40 pouces

Epaisseur nominale prédominante du tube : 11,13mm

Résistance minimale spécifiée à l'allongement (RMSA) : 41.3 bars

Résistance limite à la traction (RLT) : 51.7 bars

Pression opérationnelle maximale autorisée (POMA) : 31.8 bars (77% de RMSA)

Pression maximale de service (PMS) : 22.71 bars (55% de RMSA)

Hypothèse en matière de classe : 1

Il faut souligner le fait qu'à la POMA de 31.8 bars, la contrainte opérationnelle a été identifiée comme représentant 77% de la RMSA dans une canalisation de classe X-60 à tube de 12,7mm d'épaisseur [14].

En ce qui concerne les canalisations qui opèrent en conformité avec la norme ANSI/ASME B31G, le niveau de contrainte maximale autorisé est normalement limité à 72% de RMSA, le fonctionnement de la canalisation peut aller jusqu'à 80% de l'épaisseur du tube avant de le remplacer.

II.7.3 .2 Résultats des mesures de la sonde :

Les Figure donne les mesures d'une expertise et l'évolution des profondeurs de pics de corrosion sur le tronçon HASSI R'MEL – TIMZRHET. De pipe GZ1 qui relie HassiR'Mel – Arzew sur une distance de 6 Km.

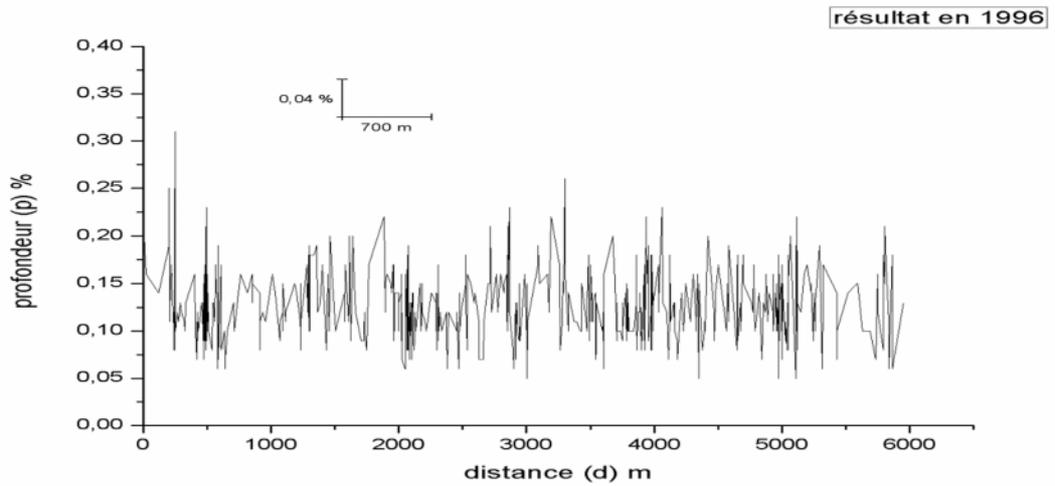


Figure 2.13:Distribution des pics de corrosion entre le point 0m et 6000m [47].

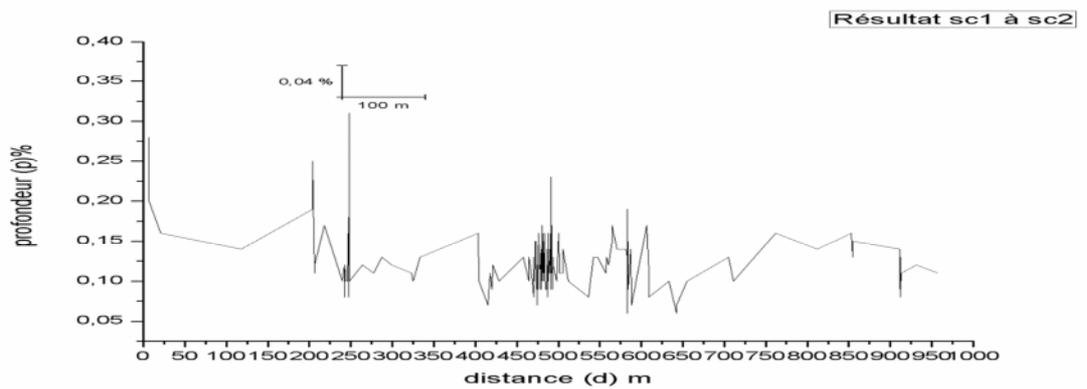


Figure 2.14:Distribution des pics de corrosion entre le point 0m et 1000m [47].

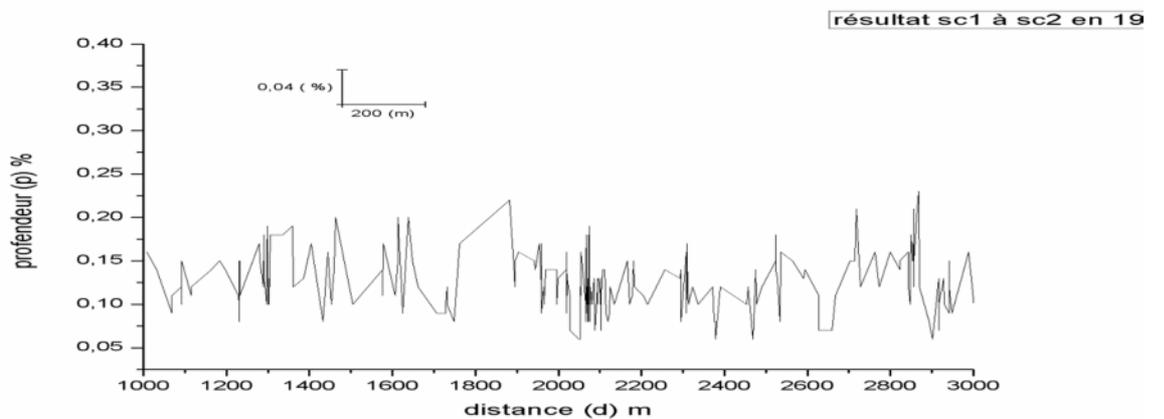


Figure 2.15:Distribution des pics de corrosion entre le point 1000m et 3000m [47].

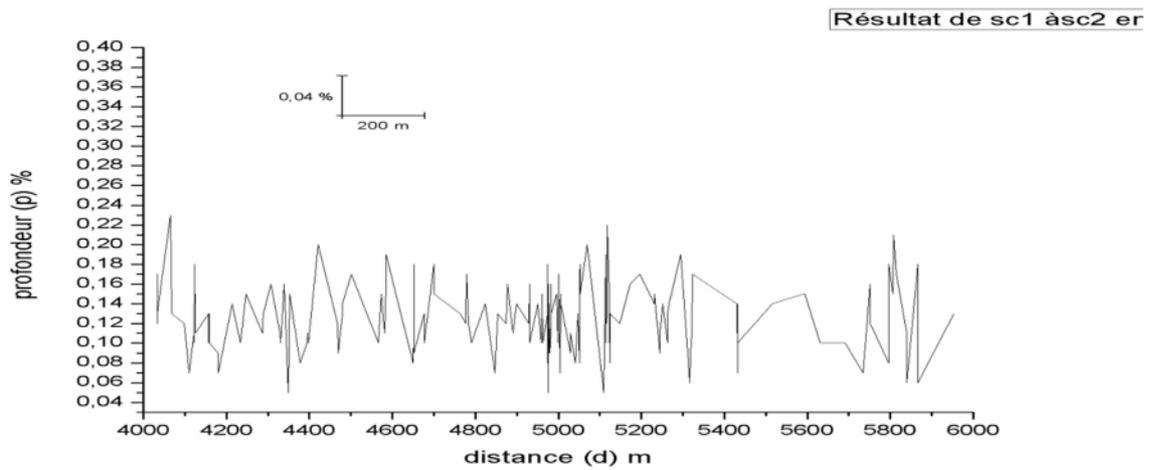


Figure 2.16: Distribution des pics de corrosion entre le point 4000m et 6000m [47].

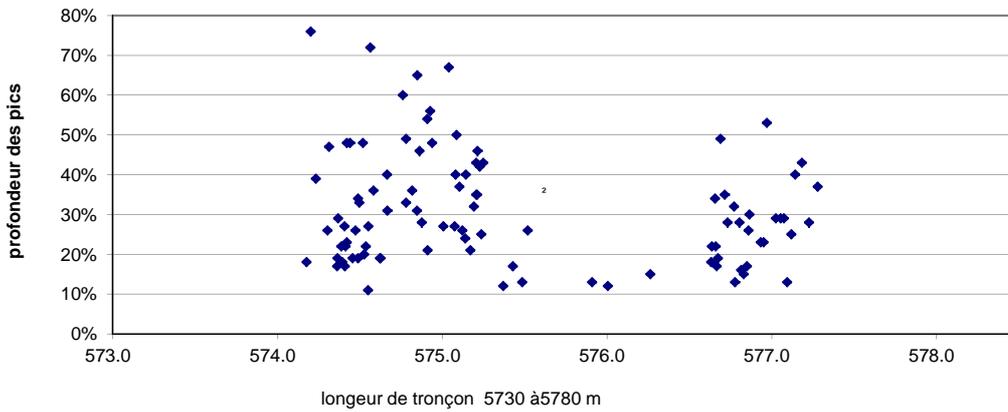


Figure 2.17 : Distribution des profondeurs de corrosion [47]

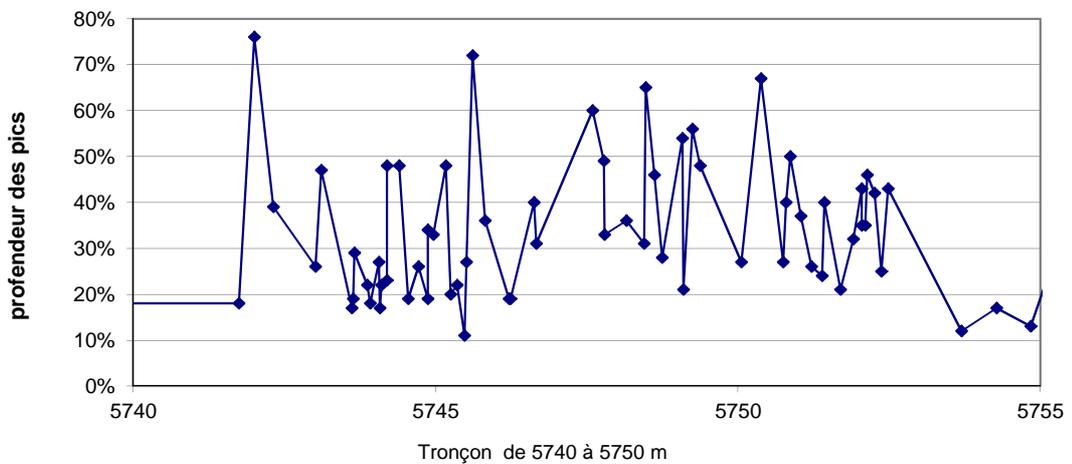


Figure2.18 : Localisation des profondeurs de corrosion [47]

Après analyse des résultats on voit sur toute la longueur de la ligne de pipe de 6 Km, nous constatons que les profondeurs des pics est entre 10% et 30% de l'épaisseur de pipe :

De 0 m à 250 m est de 28 % de l'épaisseur de pipe

De 250 m à 490m, d'une longueur de pipe 240 m les pics ne dépassent pas 17.5%

De 490 m à 500m la profondeur de pic est 22%

De 500m à 600m est de 20.5% de profondeur de corrosion de pipe

De 600m à 1400m est de 31.5% de profondeur de pic

De 1400m à 2000m la profondeur de corrosion est 22%

De 2000m à 2500m est de 18% c'est la profondeur de pic

De 2500m à 3400m est de 33%

De 3400m à 3700m est de 21.30%

De 3700m à 4000m est de 16.30%

De 4000m à 4200m le pic est environ de 22% de l'épaisseur de pipe

De 4200m à 4500m est de 17%

De 4500m à 5100m est de 24%

De 5100m à 5700m est de 15.5%

De 5700m à 5740m est de 18.60%

De 5740m à 5755m est de 75%

De 5755m à 5765m est de 20%

De 5765m à 5775m est de 38%

Le reste de tronçon entre 5775m à 6000m, la profondeur de pic est environ de 25%

Nous observons qu'il existe deux zones infectées par la corrosion qui dépasse les 70%, se trouvant au cinquième kilomètre du point de lancement des mesures, les causes probables de ce nid de corrosion est du soit à la présence d'un sol agressif ou le passage d'une rivière.

II.8 Conclusion

Les résultats de caractérisation des aciers API X42 ont montrés que ces aciers continuent à résister à toute forme de défaillances. Cependant ces aciers sont sensibles à la corrosion lorsque le système de protection fait défaut.

Nous examinerons dans le chapitre suivant, une simulation numérique sur la durée de vie restante en utilisant le modèle de Weibull qui couvre les cas où le taux de défaillance λ est variable couvrant les différentes formes de vieillissement.

CHAPITRE 3***Simulation numérique***

- Acquisition des données
- Linéarisation l'expression de Weibull
- Calcul les paramètres de Weibull
- Conclusion

III.1 Acquisition des données [19]

Départ / Arrivée	Code	Diamètre / pouce	Epaisseur / mm	Longueur Km	Date de réalisation	Produit transporté
Hassi R'mel - Arzew	GZ1	40''	12.7	507	1976	Gaz

Généralement, les gaziers et pétroliers tolèrent un défaut de 80% de l'épaisseur [14]. Ceci est dû à l'intégration des incertitudes dans les paramètres de calcul.

Nous adaptons le taux de défaillance admissible peut aller jusqu'à 80% de l'épaisseur du tube (Critère B31G) [41]

Suite aux résultats de la sonde, nous avons remarqué 19 zones de différentes épaisseurs de corrosion implique la taille de l'échantillon est 19.

Nous allons calculer les vitesses de corrosion de ces zones en supposant que le mouvement de la corrosion c'est **un mouvement rectiligne uniforme** dans chaque zone pendant la durée d'exploitation du pipeline afin de calculer chaque TBF correspond à une épaisseur de corrosion admissible $E_{cd} \approx 80\% E_p \approx 10.16mm$).

E_p : Epaisseur de parois du tube

E_c : Epaisseur de corrosion

V_c : Vitesse de corrosion

T_r : Temps d'expertise du pipeline dans notre cas ($T_r = 20$ ans)

TBF : Temps de bon fonctionnement

Mouvement rectiligne uniforme : $E_c = V_c * T_r$ (3.1)

$$\rightarrow V_c = \frac{E_c}{T_r}$$

$$\rightarrow V_c = \frac{E_c}{20}$$

$$TBF = \frac{E_{cd}}{V_c} \quad (3.2)$$

$$\rightarrow TBF = \frac{10.16}{V_c}$$

Zone 1 [0 m ; 250m] épaisseur de corrosion est 28 % de l'épaisseur de pipe

$$E_{c1} = \frac{28 * 12.7}{100} = 3.556mm$$

Vitesse de corrosion : $V_{c1} = 0.1778 mm/ans$

TBF \approx 57 ans

Zone 2 [250m ; 490m] épaisseur de corrosion est 17.5 % de l'épaisseur de pipe

$$Ec2 = \frac{17.5 \cdot 12.7}{100} = 2.2225 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $Vc2 \approx 0.111125 \text{ mm/ans}$

TBF ≈ 91 ans

Zone 3 [490 m ; 500 m] épaisseur de corrosion est 22 % de l'épaisseur de pipe

$$Ec3 = \frac{22 \cdot 12.7}{100} = 2.794 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $Vc3 \approx 0.1397 \text{ mm/ans}$

TBF ≈ 72 ans

Zone 4 [500 m ; 600 m] épaisseur de corrosion est 20.5 % de l'épaisseur de pipe

$$Ec4 = \frac{20.5 \cdot 12.7}{100} = 2.6035 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $Vc4 \approx 0.1301 \text{ mm/ans}$

TBF ≈ 78 ans

Zone 5 [600 m ; 1400 m] épaisseur de corrosion est 31.5% de l'épaisseur de pipe

$$Ec5 = \frac{31.5 \cdot 12.7}{100} = 4.0005 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $Vc5 \approx 0.200025 \text{ mm/ans}$

TBF ≈ 51 ans

Zone 6 [1400 m ; 2000 m] épaisseur de corrosion est 22 % de l'épaisseur de pipe

$$Ec6 = \frac{22 \cdot 12.7}{100} = 2.794 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $Vc6 \approx 0.1397 \text{ mm/ans}$

TBF ≈ 72 ans

Zone 7 [2000 m ; 2500 m] épaisseur de corrosion est 18 % de l'épaisseur de pipe

$$Ec7 = \frac{18 \cdot 12.7}{100} = 2.286 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $Vc7 \approx 0.1143 \text{ mm/ans}$

TBF ≈ 89 ans

Zone 8 [2500 m ; 3400 m] épaisseur de corrosion est 33 % de l'épaisseur de pipe

$$Ec8 = \frac{33 \cdot 12.7}{100} = 4.191 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $Vc8 \approx 0.20955 \text{ mm/ans}$

TBF ≈ 48 ans

Zone 9 [3400 m ; 3700 m] épaisseur de corrosion est 21.30 % de l'épaisseur de pipe

$$Ec9 = \frac{21.30 \cdot 12.7}{100} = 2.7051 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $Vc9 \approx 0.1352 \text{ mm/ans}$

TBF ≈ 75 ans

Zone 10 [3700 m ; 4000 m] épaisseur de corrosion est 16.5 % de l'épaisseur de pipe

$$Ec10 = \frac{16.5 \cdot 12.7}{100} = 2.0955 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $V_{c10} \approx 0.1047 \text{ mm/ans}$

TBF $\approx 97 \text{ ans}$

Zone 11 [4000 m ; 4200 m] épaisseur de corrosion est 22% de l'épaisseur de pipe

$$E_{c11} = \frac{22 \cdot 12.7}{100} = 2.794 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $V_{c11} \approx 0.1397 \text{ mm/ans}$

TBF $\approx 72 \text{ ans}$

Zone 12 [4200 m ; 4500 m] épaisseur de corrosion est 17 % de l'épaisseur de pipe

$$E_{c12} = \frac{17 \cdot 12.7}{100} = 2.159 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $V_{c12} \approx 0.1079 \text{ mm/ans}$

TBF $\approx 94 \text{ ans}$

Zone 13 [4500 m ; 5100m] épaisseur de corrosion est 24 % de l'épaisseur de pipe

$$E_{c13} = \frac{24 \cdot 12.7}{100} = 3.048 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $V_{c13} \approx 0.1524 \text{ mm/ans}$

TBF $\approx 67 \text{ ans}$

Zone 14 [5100 m ; 5700 m] épaisseur de corrosion est 15.5% de l'épaisseur de pipe

$$E_{c14} = \frac{15.5 \cdot 12.7}{100} = 1.9685 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $V_{c14} \approx 0.0984 \text{ mm/ans}$

TBF $\approx 103 \text{ ans}$

Zone 15 [5700 m ; 5740m] épaisseur de corrosion est 18.60 % de l'épaisseur de pipe

$$E_{c15} = \frac{18.60 \cdot 12.7}{100} = 2.362 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $V_{c15} \approx 0.1181 \text{ mm/ans}$

TBF $\approx 86 \text{ ans}$

Zone 16 [5740 m ; 5755m] épaisseur de corrosion est 75 % de l'épaisseur de pipe

$$E_{c16} = \frac{75 \cdot 12.7}{100} = 9.525 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $V_{c16} \approx 0.4762 \text{ mm/ans}$

TBF $\approx 21 \text{ ans}$

Zone 17 [5755 m ; 5765m] épaisseur de corrosion est 20 % de l'épaisseur de pipe

$$E_{c17} = \frac{20 \cdot 12.7}{100} = 2.54 \text{ mm}$$

Vitesse de corrosion : $V_{c17} \approx 0.127 \text{ mm/ans}$

TBF $\approx 80 \text{ ans}$

Zone 18 [5765 m ; 5775m] épaisseur de corrosion est 38 % de l'épaisseur de pipe

$$Ec18 = \frac{38 \cdot 12.7}{100} = 4.826 \text{ mm}$$

$$\text{Vitesse de corrosion : } Vc18 \approx 0.2413 \text{ mm/ans}$$

$$\text{TBF} \approx 42 \text{ ans}$$

Zone 19 [5775 m ; 6000m] épaisseur de corrosion est 25 % de l'épaisseur de pipe

$$Ec19 = \frac{25 \cdot 12.7}{100} = 3.175 \text{ mm}$$

$$\text{Vitesse de corrosion : } Vc19 \approx 0.1587 \text{ mm/ans}$$

$$\text{TBF} \approx 64 \text{ ans}$$

Ordonnons les valeurs de TBF enregistrées et intégrons directement au tableau l'approximation de F(t) par les rangs médians ($N = 19 < 20$)

$$F(i) = \frac{i-0.3}{N+0.4}$$

Tableau 3.1 : résultats de temps de bonne fonction TBF par ordre i

Ordre i	TBF(i) (Nre d'années avant remplacement ou réparation)
1	21ans
2	42ans
3	48ans
4	51ans
5	57ans
6	64ans
7	67ans
8	72ans
9	72ans
10	72ans
11	75ans
12	78ans
13	80ans
14	86ans
15	89ans
16	91ans
17	94ans

18	97ans
19	103ans

III.2 Linéarisation l'expression de Weibull

Nous partons de l'expression de la fonction de répartition $F(t)$ d'une loi de WEIBULL.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \rightarrow 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Les coefficients β et η n'apparaissent pas sous forme linéaire nous allons linéariser le modèle, nous pouvons prendre le log népérien des deux membres car $R(t) \leq 1$.

$$\frac{1}{R(t)} = \frac{1}{1-F(t)} \geq 1$$

$$\ln\left[\frac{1}{1-F(t)}\right] \geq 0$$

L'équation devient:

$$\ln\left[\frac{1}{1-F(t)}\right] = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta$$

$$\ln\left[\ln\left[\frac{1}{1-F(t)}\right]\right] = \beta \ln(t-\gamma) - \beta \ln \eta$$

Prenons :

$$Y^* = \ln\left[\ln\left[\frac{1}{1-F(t)}\right]\right]$$

$$C_1 = \beta \ln \eta \quad F_1(t) = 1$$

$$C_2 = \beta \quad F_2(t) = \ln(t)$$

$$\text{On obtient : } Y = C_1 F_1(t) + C_2 F_2(t)$$

Qui est bien une forme linéaire les coefficients inconnus C_1 et C_2 .

Comme la corrosion commence au début d'exploitation de pipeline, nous prenons $\gamma = 0$

Nous pouvons donc utiliser la méthode des moindres carrés. Module linéaire pour évaluer les paramètres (β, η)

III.3 Calcul les paramètres de Weibull

Nous avons développé un programme en MATLAB qui à partir des données d'exploitation du pipeline de définir les différentes fonctions de fiabilité selon le modèle de Weibull (fonction de fiabilité et de défaillance, le taux de défaillance durée de vie nominale) et la MTBF qui est la caractéristique importante de la fiabilité.


```

MATLAB 7.8 (R2008a)
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Directory: C:\Users\Aceo-BS\Desktop
Shortcuts How to Add What's New

F =
Columns 1 through 12
0.036082 0.087629 0.13918 0.19072 0.24227 0.29381 0.34536 0.39691 0.44845 0.5 0.55155 0.60309
Columns 13 through 19
0.65464 0.70619 0.75773 0.80928 0.86082 0.91237 0.96392

Y3 =
Columns 1 through 12
-3.3036 -2.3691 -1.898 -1.553 -1.2822 -1.0559 -0.8588 -0.68184 -0.51914 -0.36651 -0.22071 -0.078986
Columns 13 through 19
0.061251 0.20278 0.34904 0.50497 0.67906 0.8898 1.2006

T1 =
Columns 1 through 12
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
3.0445 3.7377 3.8712 3.9318 4.0431 4.1589 4.2047 4.2767 4.2767 4.3175 4.3567
Columns 13 through 19
1 1 1 1 1 1 1
4.382 4.4543 4.4886 4.5109 4.5433 4.5747 4.6347

T2 =
1 3.0445
1 3.7377
1 3.8712
1 3.9318
1 4.0431
1 4.1589
1 4.2047
1 4.2767
1 4.2767
1 4.2767
1 4.3175
1 4.3567
1 4.382
1 4.4543
1 4.4886
1 4.5109
1 4.5433
1 4.5747
1 4.6347

1 4.1589
1 4.2047
1 4.2767
1 4.2767
1 4.2767
1 4.3175
1 4.3567
1 4.382
1 4.4543
1 4.4886
1 4.5109
1 4.5433
1 4.5747
1 4.6347

T3 =
19 80.085
80.085 340.09

C1 =
7.0692 -1.6647
-1.6647 0.39494

C2 =
-13.208 1
3.0048 -9.1038e-015

B =
3.0048

M =
81.106

L10 =
38.309

>>
Start
    
```

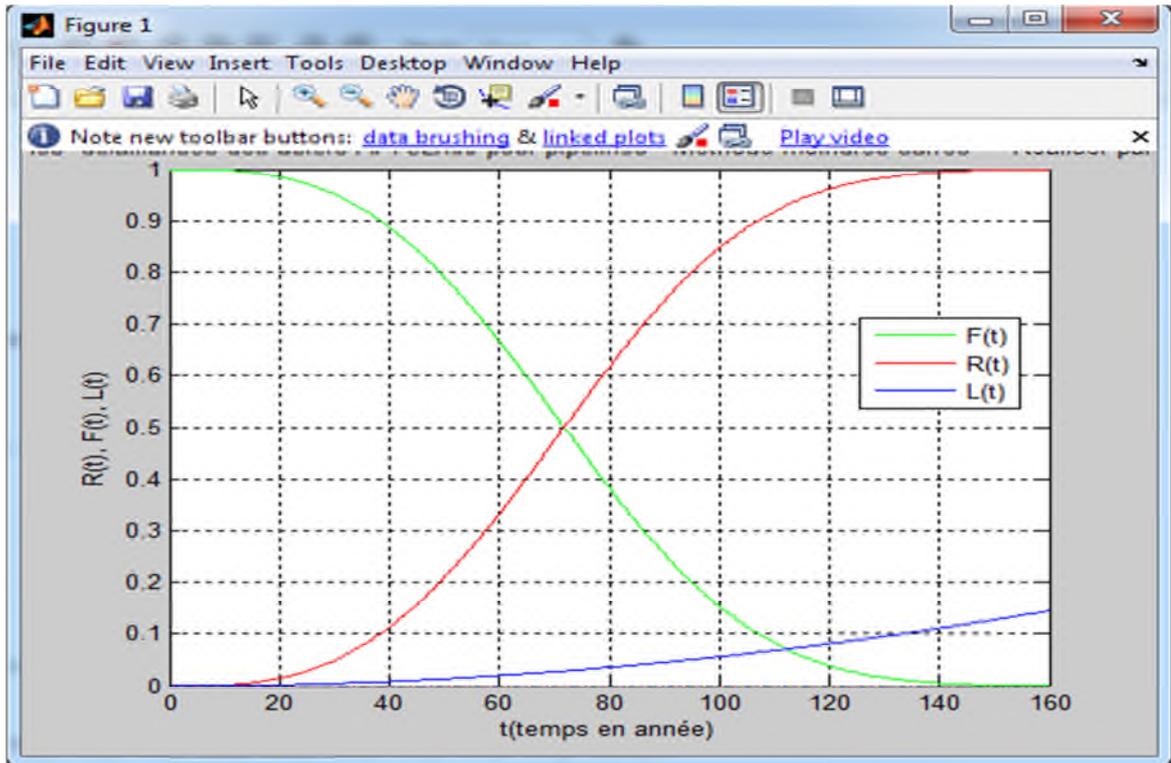


Figure 3.1 : Courbes de fiabilité, taux de défaillance et densité de probabilité

Calcul MTBF; $R(\text{MTBF})$; $F(\text{MTBF})$

$$\text{MTBF} = A \eta + \gamma$$

$$\gamma = 0$$

$$\eta = 81.106 \text{ ans}$$

Et $\beta = 3.0048$ par le (tableau 1.3) nous avons $A = 0.8930$

$$\text{MTBF} = (0.8930 * 81,106) + 0 = 71,4276$$

$$R(\text{MTBF}) = e^{-\left(\frac{\text{MTBF}-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = 0.5072 \cong 51\%$$

$$F(\text{MTBF}) = 1 - R(\text{MTBF}) = 0.49 \cong 49\%$$

III.4 Conclusion

Le traitement de données de corrosion obtenu par sonde ultrasonique a montré, qu'après une durée d'exploitation (dans notre cas 20 ans d'exploitation), les profondeurs de corrosion sont différentes allant de 10 % à 31 % des parois des tubes.

L'étude de fiabilité menée sur le pipeline ; nous a permis de déterminer les paramètres de fiabilité (γ , β , η , λ) et de faire un choix de la politique de la maintenance à appliquer. Les fonctions de fiabilité $R(t)$ le taux de défaillances $\lambda(t)$, la durée de vie nominale et MTBF ont été déterminés selon le modèle de Weibull en développant un code de calcul en MATLAB.

CHAPITRE 4***Résultats et discussions***

- Introduction
- Caractéristiques des matériaux d'étude
- Caractéristiques des solutions de sol
- la Loi de WEIBULL
- Les résultats de la sonde et paramètres de Weibull
- Critère B31G développé par API
- Estimation de la durée de vie restante

IV.1 Introduction

L'étude dans le cadre de ce projet porte sur l'ouvrage de canalisation AST (Arzew – Tlemcen et Sidi Bel Abbas) exploité par la société NAFTAL pour le transport GPL ayant pour but d'alimenter en Butane et Propane les Centres de Stockage GPL Vrac de Tlemcen et Sidi Bel Abbas à partir du complexe GPL SONATRACH GP1Z située à Bethioua- Arzew, sur une distance de 165 Kms et de diamètre 10'' et 8''. L'avantage du transfert par canalisation du produit butane vers les centres enfûteur Tlemcen et Sidi Bel Abbas est qu'il se fait régulièrement, tout en évitant tous risques d'acheminement par camions (accidents, fuites de gaz,...etc), et dans un temps bien réduit.

La méthodologie d'étude consiste à exploiter les données de défaillances obtenues par outil intelligent et d'évaluer la durée de vie par modèle de weibull en développant un programme en logiciel Matlab. Il est à noter que la ligne AST a été récemment réceptionnée pour l'exploitation et que le programme d'inspection de cette ligne par outil intelligent étant en cours, on a pas pu avoir les résultats. Afin d'appliquer le modèle de weibull, nous avons utilisé les résultats d'une partie de la ligne GZ1 reliant le gisement de gaz naturel à Hassir'mell à la raffinerie d'arzew qui est en exploitation depuis environ une quarantaine d'années et qui présente aujourd'hui beaucoup de défaillances par corrosion.

La perte de métal exprime de manière directe le degré de corrosion et permet d'estimer la durée de vie restante. Elle peut se faire de deux façons :

- soit par pesée des échantillons, mais il y a des difficultés à le débarrasser parfaitement des produits et des résidus de corrosion, ainsi que de savoir le poids de l'échantillon à l'origine,
- soit d'une façon moins précise, mais facilement réalisable, par le calcul du volume manquant par rapport à la géométrie d'origine de l'échantillon (le calcul est basé sur la profondeur moyenne des piqures).

Une estimation approximative peut se faire à partir de l'âge du réseau, en corrélation avec les caractéristiques des sols.

La fiabilité des pipelines repose sur l'intégrité de la structure et les défaillances dont les plus répandus sont les pics de corrosion.

Le traitement de données des pics de corrosion obtenus par sonde ultrasonique a montré, qu'après une durée d'exploitation, les profondeurs sont différentes allant de 10 mm à 31 mm.

L'étude de fiabilité menée sur le pipeline ; nous a permis de déterminer les paramètres de

fiabilité ($\gamma, \beta, \eta, \lambda$) et de faire un choix de la politique de la maintenance à appliquer. Les fonctions de fiabilité $R(t)$ le taux de défaillances $\lambda(t)$, la durée de vie nominale et MTBF ont été déterminés selon le modèle de Weibull en développant un code de calcul en MATLAB.

IV.2 Caractéristiques des matériaux d'étude [6]

Le matériau d'étude est l'acier micro allié de norme API, X42 destiné pour la fabrication des tubes hélicoïdaux présentant une microstructure de type ferrito- perlitique. Il a été élaboré par des procédés métallurgiques.

IV.2.1. Caractéristiques chimiques [6]

La composition chimique du matériau d'étude (tableaux 2.1 et 2.2) a été faite par analyse spectrophotométrique montrant un acier micro allié avec une faible teneur en carbone et la présence d'élément d'addition le manganèse (Mn). La faible teneur en carbone et en éléments d'alliage permet de donner à l'acier une bonne soudabilité. Le manganèse est un élément gammagène ayant l'avantage d'augmenter le domaine métastable et le temps d'incubation perlitique. Il permet aussi d'affiner la taille du grain ferritique lors du refroidissement. L'acier renferme également d'autres éléments mais de faible teneur vanadium (0,05 %), titane (< 0,11 %) et niobium (0,03-0,08 % en masse). Selon une définition, la somme de contenu (Nb+V+Ti) ne dépasse pas 0,22 % en masse. Cette relation est vérifiée. Ces éléments forment des précipités avec le carbone et l'azote (carbonitrides) et ont pour rôle de retarder la croissance des grains austénitiques et de faire obstacle au mouvement des dislocations donnant à l'acier un durcissement par précipitation (σ_p). Les éléments d'alliage gammagènes (Mn, Ni, Cu) abaissent la température de transition α de l'acier, favorisant ainsi la germinative des grains fins de ferrite. Le vanadium et le titane précipitent à plus basse température et participent au durcissement final de la ferrite. Le silicium agit principalement par effet de solution solide, il a également un rôle de désoxydant. L'aluminium et le silicium sont des éléments alphagènes, ils sont présents en faibles teneurs. Les éléments d'addition tels que le Ni, Si, permettent d'augmenter la résistance de l'acier par un durcissement de la solution solide (σ_s). La très faible teneur en impuretés (S et P) est caractéristique d'une faible teneur inclusionnaire et d'une bonne résistance à la corrosion.

L'acier X42 d'après sa composition chimique renferme des teneurs plus élevées en carbone d'ordre de 0.17%, une faible concentration en Mn (0.60%), et une teneur élevée en soufre (0.027% en masse). Cette composition est aussi conforme à la norme API, mais la résistance à la corrosion est moindre, vu les proportions élevées en soufre.

IV.2.2 Caractéristiques mécaniques [6]

Les caractéristiques mécaniques de l'acier des tubes déterminés par les différents essais mécaniques de traction, résilience, dureté effectués au laboratoire de sciences des matériaux de la faculté de technologie à Tlemcen ont montrés que l'acier continue à résister et les valeurs sont conformes à la norme API. La contrainte de limite élastique R_e est de l'ordre de 321 N/mm^2 , la résistance à la rupture à l'extension, R_m est de l'ordre $416,79 \text{ N/mm}^2$ et la dureté est de l'ordre de 13 HRC pour l'acier X42.

IV.2.3 Microstructure [6]

Les examens de microstructure observés au microscope optique et au microscope électronique à balayage (MEB) ont montrés que l'acier présente une microstructure de type ferrito-perlitique à prédominance ferritique avec des amas de perlite. Des inclusions ont été observées au MEB montrant la présence probable de sulfures de manganèse pouvant donner une fragilisation à l'acier lorsque les teneurs sont élevées.

On peut dire en conclusion, que la caractérisation des aciers d'étude a montré que les compositions chimiques sont conformes à la norme API mais présentent des teneurs assez élevées en soufre qui en présence du manganèse peut aboutir à la formation des sulfures de manganèse (MnS) qui sont des inclusions chimiques non souhaités dans la microstructure des aciers pouvant engendrer l'amorçage d'une piqure et sa propagation. Les inclusions de sulfure de manganèse (MnS) sont connus pour être souvent des emplacements de précurseur pour la corrosion par piqûration en raison de leur taille (principalement en-dessous de $5 \mu\text{m}$). Il est plutôt difficile de déterminer avec précision la composition et l'état d'oxydation des différents éléments dans ces inclusions. Cependant, leur réactivité est connue pour dépendre de leur composition. La taille et la géométrie d'une inclusion de MnS semblent être appropriées à la propagation ou au repassivation d'un embryon de piqure.

IV.3 Caractéristiques des solutions de sol

Afin d'effectuer les essais de corrosion deux solutions ont été choisies :

- ✓ solution de sol dans le tracé AST
- ✓ solution de sol simulée

IV.3.1 Solution de sol AST [6]

La composition chimique après les opérations de traitement par concassage et filtration a été effectuée sur spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme. La composition chimique (Tableau 2.3) a montrée des teneurs élevées en sodium et en chlore ainsi que les teneurs en

magnésium et en soufre. Ceci explique que la solution de sol AST est chargée en ions corrosifs pouvant donner des situations d'amorçage et de propagation des piqures.

IV.4 Rappel sur la Loi de WEIBULL :

ou loi à trois paramètres (η, β, γ) permettant d'ajuster correctement toutes sortes de résultats expérimentaux et opérationnels.

IV.4.1 Domaine d'utilisation :

Le mode probabiliste de WEIBULL est très souple, car la loi a trois paramètres « d'ajuster » correctement toutes sortes de résultats expérimentaux et opérationnels. Contrairement au modèle exponentiel. La loi de WEIBULL couvre les cas où le taux de défaillance λ est variable et permet donc de s'ajuster aux périodes « de jeunesse » et aux différentes formes de vieillissement.

Son utilisation implique des résultats d'essais sur échantillons ou la saisie des résultats en fonctionnement (TBF = intervalle entre deux dates de pannes). Ces résultats permettent d'estimer la fonction de répartition $F(t)$ correspondant à chaque instant t .

D'autre part, la connaissance du paramètre de forme β est un outil de diagnostic du mode de défaillance dans le cas où l'équipement étudié est une « boîte noire ».

Graphes de $f(t)$ et $\lambda(t)$:

Ces graphes de la figure 1.1 montrent le polymorphisme de la loi de WEIBULL sous l'influence de son paramètre de forme β .

IV.4.2 Expressions Mathématiques : [7]

Soit la variable aléatoire continue t , distribuée suivant une loi de weibull.

a) Densité de probabilité $f(t)$.

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t)$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)} \quad \text{avec } t \geq \gamma \quad (1.24)$$

γ : est appelé paramètre de position $-\infty < \gamma < +\infty$ (en unités de temps), il définit un changement d'origine dans l'échelle de temps.

β : est appelé paramètre de forme $\beta > 0$ (sans dimension), souvent il est égal, inférieur ou supérieur à 1. La loi de "Weibull" correspond à un taux de défaillance instantané, constant, décroissant ou croissant.

η : est appelé paramètre d'échelle $\eta > 0$, parfois nommé « caractéristique de vie » c'est un simple paramètre de temps.

Par exemple ($\gamma > 0$) ; il y a une survie totale (pas de défaillance entre 0 et γ).

Remarque :

Le paramètre β est sans dimension le paramètre de position et le paramètre d'échelle η (Sont en unité de temps).

Signification : γ Indique la date de but des défaillances (figure 1.2):

Si $\gamma > 0$ Il y a survie totale entre $t = 0$ et $t = \gamma$

Si $\gamma = 0$ Les défaillances débutant à l'origine des temps.

Si $\gamma < 0$ Les défaillances ont débutant avant l'origine des temps.

b) fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (1.25)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (1.26)$$

La fiabilité correspondante est donc $R(t) = 1 - F(t)$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (1.27)$$

Remarque : Pour $\gamma = 0$ et $\beta = 1$ on retrouve la distribution exponentielle cas particulier de la loi de WEIBULL.

Dans ce cas, $\lambda = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MTBF}$

c) Taux instantané de défaillance $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (1.28)$$

Avec : $t \geq \gamma$

$\beta > 0$

$\eta > 0$

Exploitation :

- Si $\beta < 1$ alors $\lambda(t)$ décroît : période de jeunesse (rodage, déverminage).
- Si $\beta = 1$ alors $\lambda(t)$ constant : indépendante du processus et du temps.
- Si $\beta > 1$ alors $\lambda(t)$ croît : phase d'obsolescence que l'on peut analyser plus finement pour orienter un diagnostique.
 - $1.5 < \beta < 2.5$: phénomène de fatigue
 - $3 < \beta < 4$: phénomène d'usure, de corrosion (débuté au temps $t = \gamma$)
 - $\beta = 3.5$: $f(t)$ est symétrique, la distribution est « normale »

d) Espérance mathématique du temps (MTBF)

La durée moyenne entre deux défaillances correspond à l'espérance mathématique de la variable aléatoire T.

L'espérance mathématique $E(t) = MTBF$ a pour expression

$$E(t) = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (1.29)$$

Γ : fonction

Dans le quel Γ est le symbole d'une fonction eulérienne de second espèce d'ou expression :

$$MTBF = A.\eta + \gamma \quad (1.30)$$

e) Durée de vie t associée à un seuil de fiabilité R(t)

Nous avons vu que l'on peut associer à tout instant t une probabilité R(t). Réciproquement, il est souvent intéressant, à partir d'un niveau de fiabilité R(t), de trouver l'instant t correspondant. En particulier, nous noterons la durée de vie « nominale » associée au seuil $R(L_{10}) = 0.9$ (**notation généralisée à partir des durées de vie nominale des roulements**).

Développement :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Prenons le log népérien des deux membres :

$$\text{Ln } R(t) = -\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta \quad (1.31)$$

$$\text{Ln} \frac{1}{R(t)} = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta \quad (1.32)$$

$$\left[\text{Ln} \frac{1}{R(t)}\right]^{1/\beta} = \frac{t-\gamma}{\eta} \quad (1.33)$$

D'où

$$t = \gamma + \eta \left[\text{Ln} \frac{1}{R(t)}\right]^{1/\beta} \quad (1.34)$$

Et en particulier au seuil $R(t) = 0.9$:

$$L_{10} = \gamma + \eta \left[\text{Ln} \frac{1}{0.9}\right]^{1/\beta} \quad (1.35)$$

$$L_{10} = \gamma + \eta [0.105]^{1/\beta} \quad (1.36)$$

Cette durée de vie est estimée des lors que l'on a déterminé les trois paramètres de la loi de WEIBULL.

A chaque pente du faisceau des droites (D') possibles correspond une valeur β .

Justification : (D') est la droite d'équation $Y = \beta X$ avec $X = \text{Ln } t$.

Pour $t = 1$, $\text{Ln } t = 0$ donc $X = Y = 0$.

Pour $\text{Ln } t = -1$ (sur l'échelle a), $Y = \beta \text{Ln } t = -\beta$.

Comme l'axe b portant β est orienté vers le bas, $Y = -b$ donc $b = \beta$.

IV.4.3 Recherche de la MTBF

Usage du tableau [1.3]

$$\text{Loi de Weibull : } MTBF = A.\eta + \gamma$$

Algorithme de l'étude de la loi de WEIBULL :

1. Saisie des données, recensement des TBF :

Les données étude de fiabilité proviendront le plus souvent des historiques de défaillance, parfois de résultats d'essais.

2. Nous les classerons, ordre : attribué à chaque TBF: $1 \leq i \leq N$ Le nombre de TBF

enregistré est N taille de l'échantillon.

3. Suivant la taille N de l'échantillon :

*si $N > 50$, nous regroupons les TBF par classes, dans ce cas, la fréquence cumulée notée :

$$F(i) = \frac{i}{N} \quad (1.37)$$

Est très voisine de la fonction de répartition F(t) de la loi de WEIBULL.

*si $20 \leq N \leq 50$: nous donnerons un rang i à chaque défaillance (nous dirons : la i^{ème} défaillance).

Nous utilisons la formule d'approximation des rangs moyens :

$$F(i) = \frac{i}{N+1} \quad (1.38)$$

*Si $N < 20$ nous utiliserons la formule d'approximation des rangs médians :

$$F(i) = \frac{i-0.3}{N+0.4} \quad (1.39)$$

Détermination des paramètres de WEIBULL : β, γ, η

La détermination des trois paramètres de se faire par l'utilisation du papier de WEIBULL, c'est une méthode graphique.

a) Structure de tableau de valeurs

Les (n) valeurs de données de bon fonctionnement « TBF » obtenues en exploitation et enregistrées dans les données historiques des équipements. Ces valeurs (n) seront classées par valeurs selon un ordre (i) allant de (i=1 à i=n).

F(i) est la probabilité consultative de défaillance sur (o, t) suivant la taille(n) de l'échantillon.

Si $n > 50$; $F(i) = i/n$

Si $20 < n < 50$; $F(i) = i/n+1$ formule des rangs moyens

Si $n < 20$; $F(i) = \frac{i-0.3}{N+0.4}$ formule des rangs médians.

IV.4.4 Méthode analytique pour déterminer les paramètres de "Weibull".

Pour obtenir la meilleure droite ajustant le nuage de points, on utilise la méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés : Elle consiste à chercher la droite pour minimiser la somme des carrés des distances horizontales des divers points à la droite et donne les paramètres de "Weibull" (β et η). On estime la valeur de ces paramètres par la méthode des moindres carrés en utilisant les expressions suivantes:

$$\beta = \frac{\sum_1 x_i y_i - \bar{y} \sum_1 x_i}{\sum (x_i)^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \quad (1.40)$$

$$\eta = \exp(\bar{X} - \bar{Y}/\beta) \quad (1.41)$$

$$\gamma = 0 \quad (1.42)$$

avec $Y_i = \ln[\ln(1/(1-F(t_i)))]$; $X_i = \ln(t_i)$, $\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}$; $\bar{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n}$ et (t_i) représente le temps.

IV.6 Critère B31G développé par API [41]

IV.6.1 Introduction

L'évaluation du taux de corrosion dans les canalisations après mise sous pression comme le cas des pipelines est une estimation des piqûres en profondeur et en surface axiale et circonférentielle employant des concepts de la mécanique d'endommagement. Ils sont appliqués dans les limites de leur validation pour estimer la pression de service des pipes corrodés.

Le modèle B31G a été développé dans l'institut commémoratif Battelle, supervisé par AGA (American Gas Association) dans le but de limiter la forme étendue de l'imperfection par les défauts de corrosion sous forme localisée ou généralisée dans les canalisations en acier par des études théoriques et des analyses expérimentales. L'objectif principal de ces études était de déterminer la forme quantitative et la relation entre la valeur de la pression de la rupture (obtenue des essais hydrauliques) et le nombre et la taille de défauts (Cosham et Hopkins, 2002).

Depuis la publication de l'ASME/ de norme ANSI B31G-1997, davantage améliorations dans les techniques moins conservatrices sont apparus avec des données additionnels. Le nouveau critère B31G modifié a utilisé le facteur de flambement ou facteur de Folias moins conservateur. Et qui peut être fait en traçant des points le long du plus profond chemin du secteur corrodé.

La nouvelle version de B31G, connu comme méthode efficace du secteur, évalue chaque profondeur du secteur corrodé, et chaque secteur séparément et dans l'ensemble.

IV.6.2 Méthodes d'évaluation des défauts localisés

L'évaluation de la résistance résiduelle du pipeline corrodé sera basée sur l'évaluation des défauts localisés qui se présentent sous forme de pics de corrosion à des profondeurs et longueurs variées. Cette évaluation a pour but la réhabilitation du pipeline corrodé en vue d'une nouvelle mise en service avec la même PMS (pression moyenne de service). On évalue les défauts à des niveaux croissants de la complexité d'analyse. La méthode à

employer dépendra de l'objectif de l'évaluation, du type de défaut, des conditions d'exploitation et de la qualité disponible des données. Cosham et Hopkins (2002) avaient considéré « du manuel d'évaluation de défaut de canalisation (PDAM) ». L'évaluation des défauts à des niveaux de complexité d'analyse. Elle peut être appliquée pour les défauts de corrosion. La figure A.1 récapitule les niveaux d'évaluation de la détérioration des pipes. Dans ce schéma, on présente les différentes étapes reliées entre elle pour l'utilisation du critère B31G.

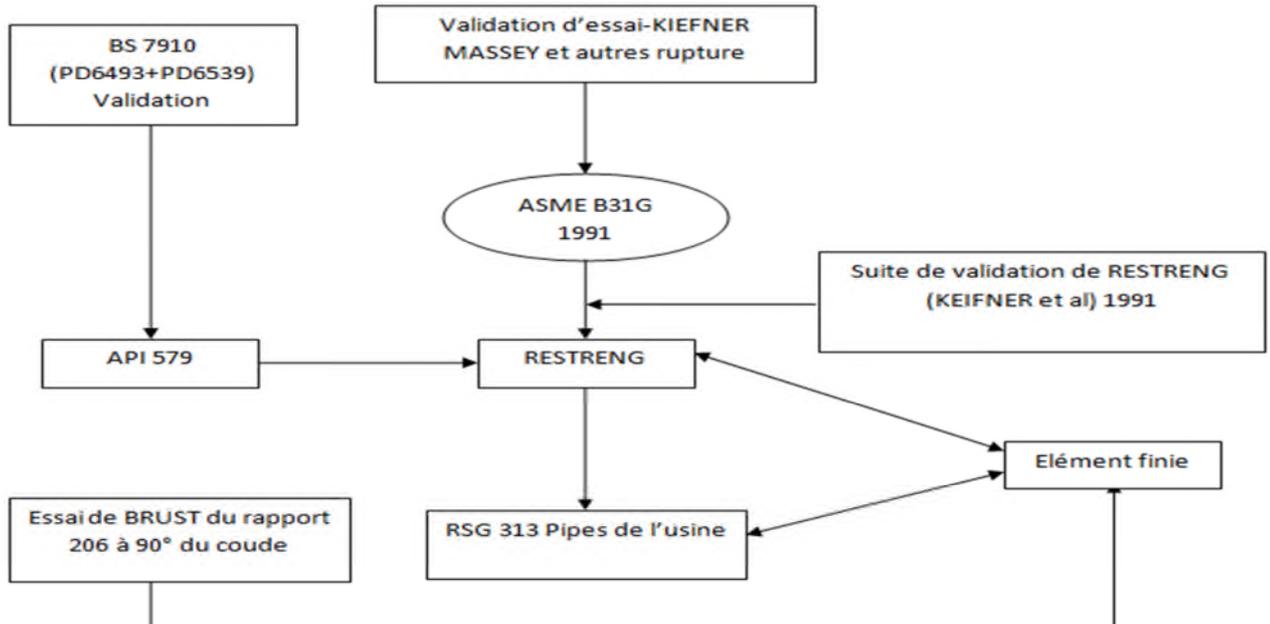


Figure 4.1. Outils utilisés pour l'évaluation de complexité de détérioration des pipes (nouvelle version de RSG313) [41]

- **Etape 1 :** Normes internes des compagnies ou des règles pratiques pour approuver ou désapprouver les défauts de corrosion avec l'information sur le type du défaut et ses dimensions.
- **Etape 2 :** Dans ce niveau d'analyse, on emploie les méthodes d'application facile et cela dans beaucoup de situations qui peuvent présenter les conservateurs excessivement résultats. Nous pouvons citer des méthodes telles ASMZ B31G, RESTRENG 0.85dl, RPL, DNV RP-F101 (pour des défauts d'isolement) et BS-7910. Pour appliquer ces méthodes, il est nécessaire de savoir la longueur et la plus grande profondeur du défaut. D'ailleurs. Il est nécessaire de savoir les caractéristiques de l'acier, diamètre et l'épaisseur du pipeline.
- **Etape 3 :** Dans ce niveau d'analyse, il est nécessaire de savoir le profil de la corrosion du défaut. Les méthodes principales qui peuvent être appliquées dans ce niveau sont « le secteur efficace », DNV RP-F101 (pour des défauts de la

géométrie complexe). Les programmes commerciaux restreints existent et qui laissent l'application facile de ces méthodes dont la plus grande difficulté est l'accomplissement du défaut de corrosion.

- **Étape 4 :** Dans cette étape, une analyse non linéaire par les éléments finis ou par les essais expérimentaux sont la vraie balance pour le problème. L'utilisation de la méthode des éléments finis, exige beaucoup d'heure dans le processus et la détermination du modèle ou la solution du problème, nécessite un personnel qualifié. Reproduire les défauts dans la vraie balance et réaliser les essais destructifs sont également une alternative viable, néanmoins un temps suffisant, un personnel qualifié et à un équipement proportionné seront demandés.
- **Étape 5 :** Dans cette étape, l'analyse exige davantage de données par rapport aux méthodes. Il est nécessaire d'avoir les statistiques de distribution de la géométrie (défaut et conduit), des propriétés du matériau et entre autres pour mesurer les incertitudes dans l'évaluation de ces défauts. Une fois conjuguée avec l'analyse du risque, pour subventionner la prise de la décision en acceptant ou pas un défaut. Généralement, l'évaluation des défauts est fil jusqu'à l'étape 3.

Au cas où le défaut serait désapprouvé jusqu'à ce point, il est nécessaire d'utiliser des méthodes avancées de l'évaluation du défaut (étape 4 ou étape 5), réduction de la pression d'opération, dans le dernier cas, la nécessité de la réparation du conduit est considérée.

IV.6.3 Critère B31 G

❖ Présentation

Le code ASME B31G, permet de déterminer la relation entre la taille du défaut et la pression interne d'un pipeline. C'est un code qui destiné à évaluer la résistance à la rupture résiduelle d'un pipeline corrodé. Il constitue un additif au code ASME B31 utilisé pour les tubes sous pression, ce code a été développé dans les années 60 au **Batelle Memorial Institutes** (USA) et donne des méthodes semi empiriques pour vérifier la tenue en service de canalisations corrodés.

Basé sur un nombre relativement important d'essais en vraie grandeur sur des sections de tuyaux corrodés, il a été constaté que les aciers utilisés pour les tuyaux ont en général une ténacité suffisante pour permettre la rupture ductile et donc la ténacité n'est pas le paramètre essentiel mais la profondeur des pics de corrosion, la rupture amorcée sur

des défauts de corrosion émousés est contrôlée par leur taille et la contrainte d'écoulement du matériau R_c .

Les paramètres d'entrée comportent le diamètre extérieur du tuyau (D_{ext}), l'épaisseur (t), la limite d'élasticité minimale requise (R_e), la pression de service maximale $MAOP$, l'extension maximale longitudinale de corrosion ($2C$) et la profondeur du défaut (d).

Selon le code ASME B31G, l'équation de la rupture de tube corrodé est établie à partir des données expérimentales et exprimés à partir des deux conditions :

1. La contrainte circonférentielle globale maximum ne peut pas excéder la limite d'élasticité du matériau.
2. Un défaut de corrosion court est assimilé à sa projection selon une forme parabolique, et un défaut de corrosion long est projeté selon une forme rectangulaire.

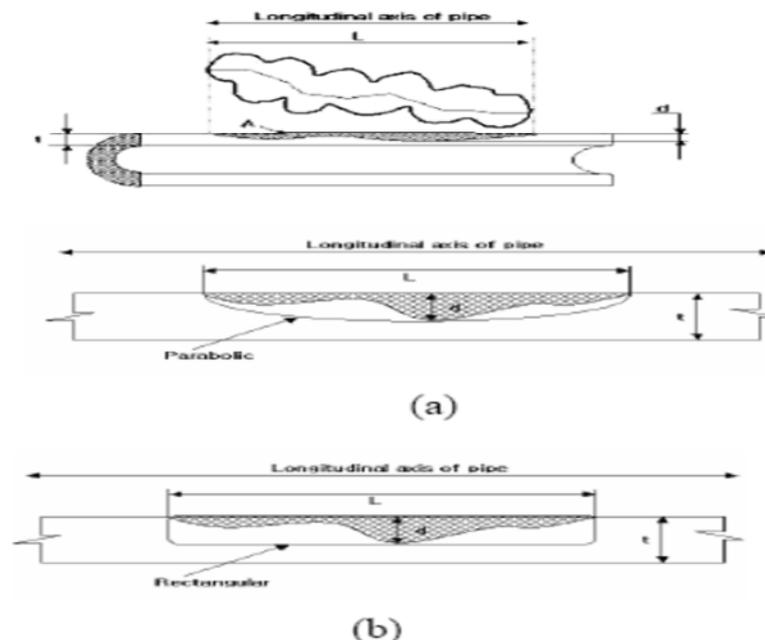


Figure 4.2 : Défaut de corrosion sur un pipe a – rectangulaire b – parabolique [41]
Les secteurs classés par catégorie où la corrosion attaque la canalisation sont

1. Approximativement 80-85% de la corrosion se produit aux appuis du pipeline sur les courses longitudinales.
2. Entre 15-20% de corrosion sifflante se produit aux coudes. Corrosion aux raccordements de branche (par exemple, pièces en T) est rare.

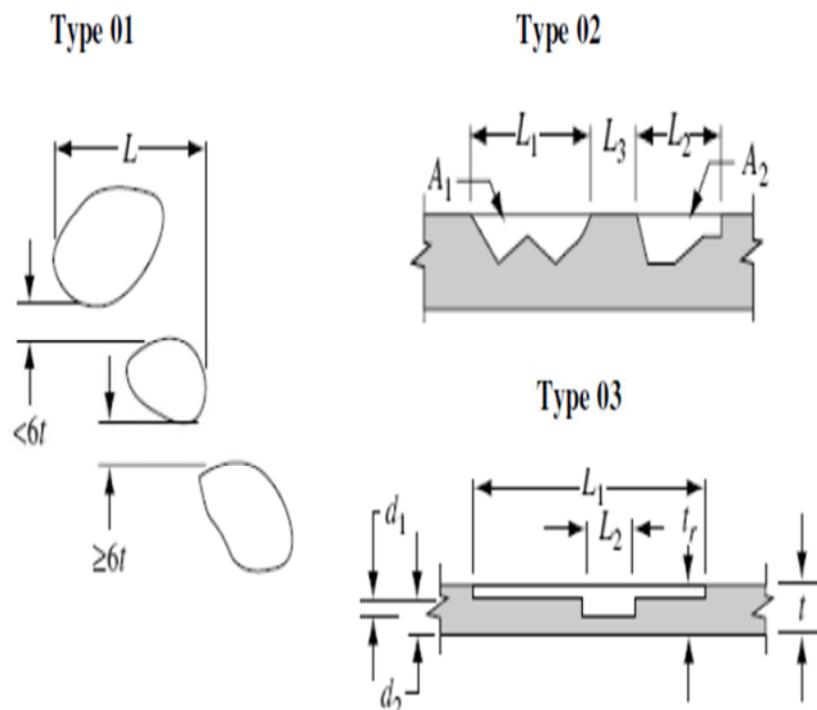
Ce critère est une méthode améliorée pour évaluer la résistance restante du pipeline corrodé. Il faut mentionner que l'utilisation du code ASME B31G est limitée à des défauts de corrosion avec un facteur de concentration de contrainte faible, dans le but d'éviter les

réparations et les remplacements inutiles.

❖ Interactions

Les interactions des zones étroitement liée avec la corrosion dans le cas où l'interaction régionale peut avoir un effet combiné sur la résistance du pipeline, si les zones corrodées sont assez proches entre elle, le schéma 1.3 montre trois types d'interaction.

Interaction du type 1 : Des zones sont séparées dans la direction circulaire mais se recouvrent dans la direction longitudinale. Quand la séparation circulaire entre les frontières extérieures des différents pics est moins de six fois l'épaisseur de paroi du pipeline (t), les pics devraient être considérés comme pour agir ensemble.



Si circulaire est $>6t$, traite chaque réseau séparément
manières :

Peuvent être analysées 3

1. Formulaires standard
2. Région de mine dans un secteur réduit d'épaisseur
3. Méthode analytique

Figure 4.3 : Types d'interactions de perte en métal [41]

Interaction du type 2 : La répartition des piqures non continues de corrosions successives dans la direction axiale est séparée par des pèdoncules d'acier non corrodé. $\sum L_i$ définissent l'assemblage des piqures.

Interaction du type 3 : La répartition des piqures multiples non continues sont étendue en profondeur.

❖ Paramètres des pics de corrosion[41]

Dans la région corrodée du pipeline, on doit considérer seulement la

longueur (l) de la zone et sa profondeur maximum (d) pour évaluer son effet sur l'intégrité du pipeline. Si les régions corrodées où plus sont dans la fin de la proximité, alors leurs effets combinés doivent être considérés.

Les essais d'éclatement prouvent que l'origine de la rupture se trouve dans la zone la plus mince, qu'on pourrait logiquement assumer. Ainsi, combinant les profils en considérant le composé de tous profils dans une région de perte en métal est exigé. Il y a des limites des régions corrodées son largement séparé n'ont pas besoin d'être combinées pour l'évaluation comme le montre le schéma 4.4 les paramètres utilisés dans ces critères nous aident à mieux comprendre les problèmes réels de la détermination des zones corrodées.

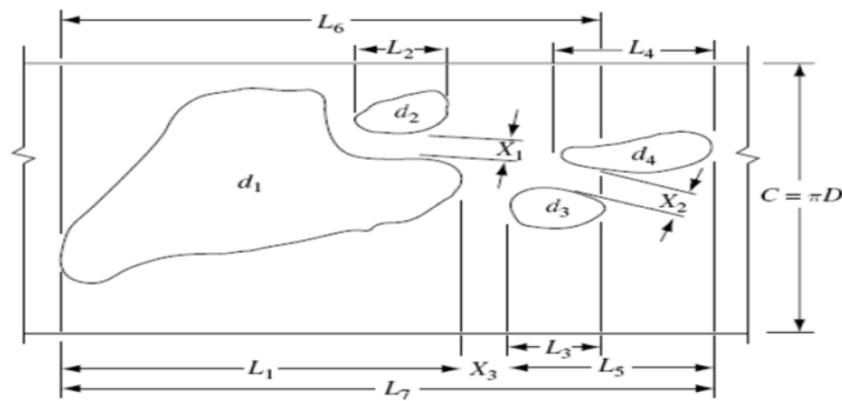


Figure 4.4 : Plusieurs profils de perte en métal [41]

Le tableau suivant nous donne les différentes conditions pour l'évaluation des pics de corrosion, et l'application du critère dans les normes :

Tableau 4.1 : critère d'évaluation des pics de corrosion [41]

La longueur de la taille du pic	Les interfaces Séparées	Conditions	Profondeur maximum	Conditions
L1	Séparer	Si $X_3 > 1$	.d1 .d2	Si $d_1 > d_2$ Si $d_2 > d_1$ et $X_1 > 6t$
L2	Séparer	Si $X_1 > 6t$	.d2	
L3	Séparer	Si $X_3 > 1$ in et $X_2 > 6t$	.d3	
L4	Séparer	Si $X_3 > 1$ in et $X_2 > 6t$	.d4	
L5	Agir l'un sur l'autre	Si $X_3 > 1$ in et $X_2 < 6t$	.d3 .d4	Si $d_3 > d_4$ Si $d_4 > d_3$
L6	Agir l'un sur l'autre	Si $X_3 < 1$ in et $X_2 > 6t$	.d1 .d2 .d3	Si $d_1 > d_2, d_3$ Si $d_2 > d_1, d_3$ Si $d_3 > d_1, d_2$
L7	Agir l'un sur l'autre	Si $X_3 < 1$ in et $X_2 < 6t$	.d1 .d2 .d3	Si $d_1 > d_2, d_3, d_4$ Si $d_2 > d_1, d_3, d_4$ Si $d_3 > d_1, d_2, d_4$ Si $d_4 > d_1, d_2, d_3$

X en inch : distance dans l'épaisseur de paroi entre les secteurs de perte en métal (régions corrodées)

❖ **Expressions mathématiques**[41]

i. **Critère B31G**:[41]

Pour appliquer ce critère il nous faut une condition, que la profondeur maximale du pic (a) ne doit pas dépasser les 80% de l'épaisseur nominal. $a \leq 0.8.t$

Le niveau d'effort d'échec (S_F) représente la pression prévue d'éclat du pipeline. La pression S_F d'échec ne devait jamais être moins que la valeur du SMYS.

L'équation extérieure de la corrosion du pipeline est :

$$S_F = S' \left[\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \left(\frac{A}{A_0}\right)^M} \right]$$

S_F : niveau de tension lors de la rupture

S' : Tension d'écoulement (propriété lié à la limite d'élasticité des matériaux)

A_0 : L. t

A : Surface corrodé longitudinale

L : Extension axiale de la détérioration

T : Epaisseur de la paroi du pipeline

a : La profondeur de pic de corrosion

M : Facteur de FOLIAS de D, L, t

L'équation (1) est utilisé pour calculer le niveau de tension qui à conduit à une fissure du pipeline contenant un défaut longitudinal, comme elle est utilisé pour prévoir la résistance d'un pipeline corrodé.

Le facteur de FALIAS M se calcule en fonction de la taille du défaut, la forme géométrique de la corrosion.

$$M = \left[1 + 0.8 \frac{L^2}{D.t} \right]^{1/2}$$

L : Extension axiale de la détérioration

Les paramètres d'entrée incluent le diamètre extérieur du pipeline (D_{ext}) et l'épaisseur de paroi (t), la force indiquée de rendement minimum (SMYS), la pression de fonctionnement maximale permise (MAOP), l'ampleur longitudinale de la corrosion (2c) et la profondeur de défaut (a).

On a la tension d'écoulement qui se présente :

$$S' = 1,1 \sigma_e$$

: Limite d'élasticité minimale spécifique du matériau

Et si la surface est donnée par : $A = \frac{2}{3} L \cdot a$

L'équation (1.1) devient : $S_F = 1,1 \sigma_e \left[\frac{1 - \frac{2a}{3t}}{1 - \frac{2a}{3t} M^{-1}} \right]$

Selon ce code, une équation d'échec pour les canalisations corrodées est proposée au moyen des données d'une expérience de l'éclatement et exprimée en considérant les deux conditions ci-dessous :

- D'abord, l'effort maximum de cercle ne peut pas excéder la forme de rendement du matériel.
- En second lieu, des défauts courts de corrosion sont projetés avec une forme parabolique, et de longs défauts de corrosion sont projetés avec une forme rectangulaire (figure A.5).

Pour un défaut parabolique, le critère B31G est appliqué comme suite :

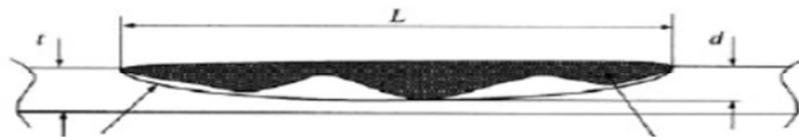


Figure 4.5 : Défaut de corrosion selon forme parabolique [41]

Cette détérioration du métal est basée sur deux conditions :

$$\text{Si } \sqrt{0.8 \left(\frac{2c}{D_{ext}} \right)^2 \left(\frac{D_{ext}}{t} \right)} \leq 4$$

On a le facteur de flambement (FOLIAS) est :

$$M = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{2c}{D_{ext}} \right)^2 \left(\frac{D_{ext}}{t} \right)}$$

Et la pression ultime P_{ult} est :

$$P_{ult} = \frac{2(1.1Re)}{D_{ext}} \cdot t \left[\frac{1 - 0.66(a/t)}{1 - 0.66(a/t)M^{-1}} \right]$$

Pour le défaut de corrosion de forme rectangulaire on a la formule suivante :

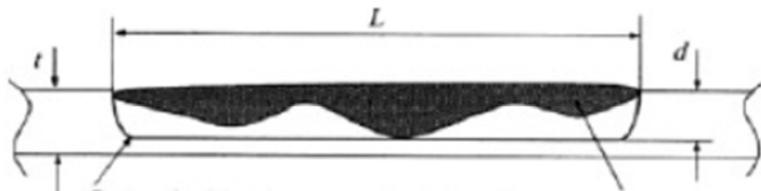


Figure 4.6 : Défaut de corrosion projeté selon une forme rectangulaire [41]

$$\text{Si } \sqrt{0.8 \left(\frac{2c}{D_{ext}} \right)^2 \left(\frac{D_{ext}}{t} \right)} > 4$$

$$\text{Donc on a : } M=3.3+0.32\left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)^2\left(\frac{D_{ext}}{t}\right)$$

La pression ultime de service MAOP est donnée par :

$$P_{ult}=\frac{2(\sigma_{ult}).t}{D_{ext}-t}\left[\frac{1-(a/t)}{1-(a/t).M^{-1}}\right]$$

ii. Critère B31G Modifié

Dans le critère B31G modifié la limite d'écoulement est considérée comme égale :

$$R_m=1.1 Re + 69 \quad (\text{MPa})$$

Re : la limite d'élasticité

Aussi dans ce critère on a deux cas à considérer :

- Cas 1 : $\left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)^2\left(\frac{D_{ext}}{t}\right) \leq 50$ (défaut parabolique)

$$P_{ult}=\frac{2(1.1Re+69).t}{D_{ext}}\left[\frac{1-0.85(a/t)}{1-0.85(a/t).M^{-1}}\right]$$

Le facteur de Flambement (FOLIAS) égale à :

$$M=\sqrt{1+0.6275\left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)^2\left(\frac{D_{ext}}{t}\right)-0.003375\left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)\left(\frac{D_{ext}}{t}\right)^2}$$

- Cas 2 : $\left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)^2\left(\frac{D_{ext}}{t}\right) > 50$ (défaut rectangulaire)

$$P_{ult}=\frac{2(R_c).t}{D_{ext}-t}\left[\frac{1-(a/t)}{1-(a/t).M^{-1}}\right]$$

Le facteur de flambement FOLIAS égale à :

$$M=3.3+0.32\left(\frac{2c}{D_{ext}}\right)^2\left(\frac{D_{ext}}{t}\right)$$

iii. Le code DNV RP-F101[41]

Le code DNV RP-F101 est le code le plus complet sur l'acceptabilité des défauts de corrosion dans les tuyaux.

Il permet de traiter tous les types de chargement pression interne mais un chargement combiné, ce code propose deux méthodes pour trouver la pression ultime :

- La première méthode est désignée sous le nom de facteur de sécurité 'partiel', la
- Seconde comme le dimensionnement selon la contrainte admissible.

La pression ultime donnée par la méthode DNV RP-F101 est donné par :

$$P_{ult}=\frac{2(R_m).t}{D_{ext}-t}\left[\frac{1-(a/t)}{1-(a/t).Q^{-1}}\right]$$

Q : est le facteur de corrosion, et il égale à :

$$Q = \sqrt{1 + 0.31 \left[\frac{1}{\sqrt{Dext.t}} \right]}$$

Selon le code DNV RP-F101, la pression ultime ne doit pas dépasser la pression maximum de service MAOP, dans le cas contraire le pipeline doit être réparé ou remplacé.

❖ **Effets de la complexité des défauts**[41]

Un défaut complexe est un défaut qui résulte de la combinaison de colonies des défauts et un défaut simple (d'isolement) dans lequel les profils de la profondeur sont connus.

Les défauts adjacents de la corrosion peuvent agir l'un sur l'autre entre elle-même causant une pression d'imperfection moins que celle causée par un défaut d'isolement.

Un défaut est considéré comme d'isolement si :

- ✓ Sa profondeur sera mineure que 20% de l'épaisseur du pipeline e ;
- ✓ L'espacement circulaire entre les défauts adjacents, ϕ , pour excéder l'angle :

$$\phi > 360 \cdot \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}$$

- ✓ L'espacement axiale (longitudinal) entre les défauts adjacents, S , devra dépasser la valeur : $S > 2 \cdot \sqrt{D \cdot t}$ entre deux défauts adjacents, des conditions seront satisfaites pour travailler avec ce critère :

$$(1) \left[\frac{1 - \frac{d_1}{t}}{1 - \frac{d_1}{t \cdot M_{11}}} \right] > \left\{ \frac{1 - \left(\frac{1}{t}\right) \left[\frac{d_1 \cdot L_1 + d_2 \cdot L_2}{L_1 + L_2 + S} \right]}{1 - \left(\frac{1}{t \cdot M_{12}}\right) \left[\frac{d_1 \cdot L_1 + d_2 \cdot L_2}{L_1 + L_2 + S} \right]} \right\}$$

$$(2) \left[\frac{1 - \frac{d_2}{t}}{1 - \frac{d_2}{t \cdot M_{22}}} \right] > \left\{ \frac{1 - \left(\frac{1}{t}\right) \left[\frac{d_1 \cdot L_1 + d_2 \cdot L_2}{L_1 + L_2 + S} \right]}{1 - \left(\frac{1}{t \cdot M_{12}}\right) \left[\frac{d_1 \cdot L_1 + d_2 \cdot L_2}{L_1 + L_2 + S} \right]} \right\}$$

Et les facteurs de FOLIAS sont :

$$M_1 = \sqrt{1 + 0.31 \cdot \left(\frac{L_1}{\sqrt{D \cdot t}} \right)^2}, \quad M_2 = \sqrt{1 + 0.31 \cdot \left(\frac{L_2}{\sqrt{D \cdot t}} \right)^2}, \quad M_{12} = \sqrt{1 + 0.31 \cdot \left(\frac{L_1 + L_2 + S}{\sqrt{D \cdot t}} \right)^2}$$

Alors la pression de rupture est donnée par :

$$P_{rup} = (\sigma_u) \cdot \left(\frac{2t}{D-t} \right) \cdot \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{\left(1 - \frac{d}{t}\right) \cdot M} \right]$$

$$M = \sqrt{1 + 0.31 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{D \cdot t}} \right)^2}$$

σ_u : est la limite à la rupture du matériau

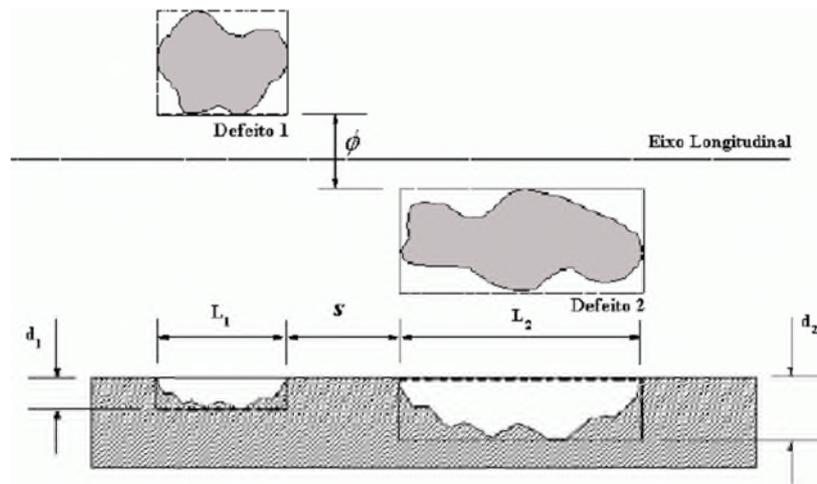


Figure 4.7 : dimensionnement des défauts des pics de corrosion [41]

Pour suivre, le procédé de la norme BS 7910 pour l'évaluation de la résistance résiduelle des tubes en présence des défauts multiples est décrit. Ce procédé considère seulement l'expédition de la pression de chambre.

Etape 1 : Pour des régions où il a généralisé la perte de matériel (moins que 10% de l'épaisseur du mur du conduit), l'épaisseur locale du mur et la profondeur du défaut doivent être employées, comme illustré sur le schéma 1.8.

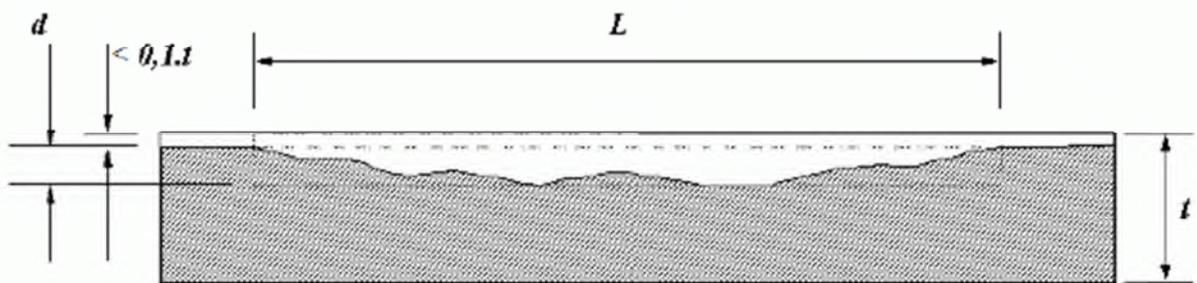


Figure 4.8 : Ajustement de l'épaisseur et la profondeur du défaut avec la corrosion généralisée [41]

Etape 2 : La région corrodée du conduit doit être divisée dans les sections avec la longueur minimum de $5\sqrt{D \cdot t}$, avec un recouvrement minimum de $2.5\sqrt{D \cdot t}$. Après cela, étapes 3 doivent être répétée pour chaque longueur séparée de forme pour évaluer toutes interactions possibles.

Etape 3 : Pour construire une série avec des lignes longitudinales espacées de la projection circonférentielle de l'angle donné pour :

$$\phi = 360 \cdot \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}$$

Etape 4 : Pour considérer une ligne de projection de chaque fois. Si les défauts seront à l'intérieur de $\pm \phi$, ils doivent être projetés dans la ligne de la projection courante, comme illustré sur le schéma A.9.

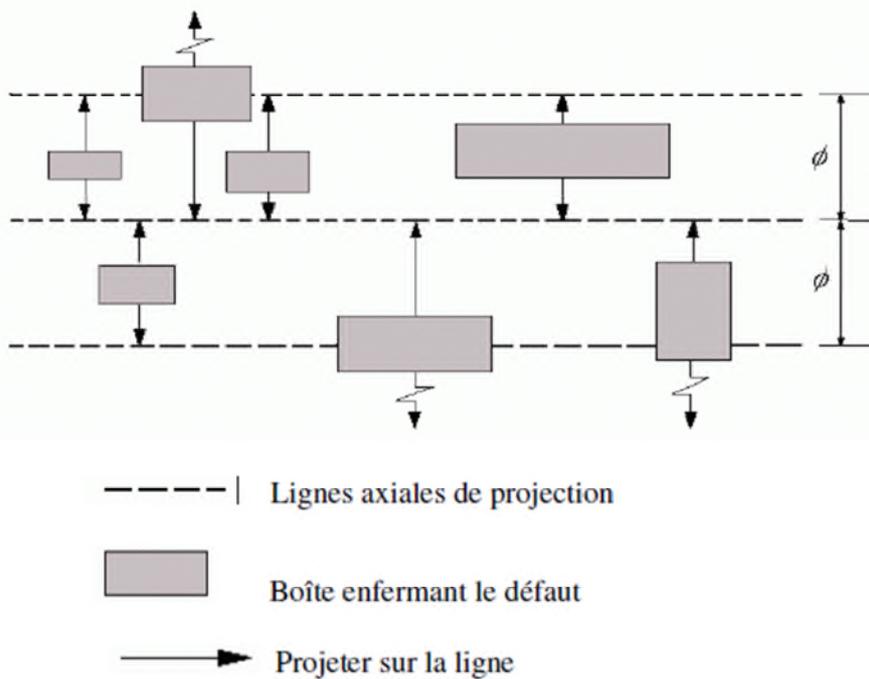


Figure 4.9 : Projections des inters agentes déserte dans la direction circulaire [41]

Etape 5 : Si elle aura le recouvrement des défauts, ils doivent être combinés pour former « composé » un défaut composé. Cela est fait convenir la longueur des défauts et vu la plus grande profondeur entre la même chose ceux, comme illustré sur le schéma A.10.

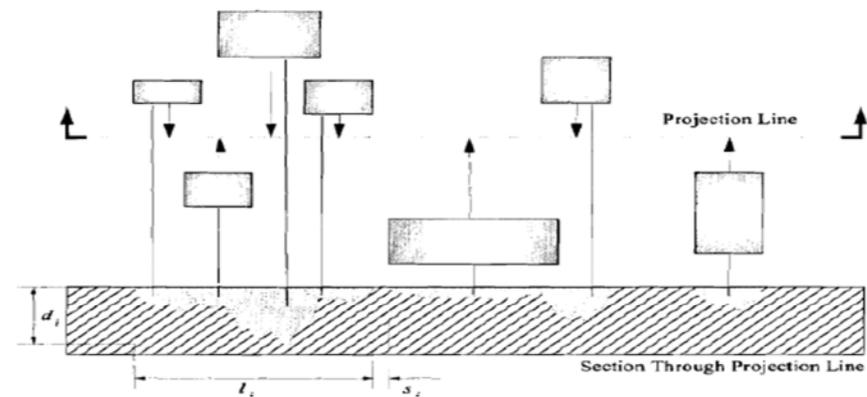


Figure 4.10 : Projections des défauts dans la ligne de projection [41]

Etape 6 : Pour calculer les pressions de la rupture (P_1, P_2, \dots, P_n) pour chaque défaut (ou défaut composé), traitant chacun, comme un défaut d'isolement (pour voir le schéma A.9), en utilisant les équations suivantes :

$$P_{rup(i)} = (\sigma_u) \cdot \left(\frac{2t}{D-t} \right) \cdot \left[\frac{1 - \frac{d_i}{t}}{\left(1 - \frac{d_i}{t}\right) \cdot M_i^{-1}} \right]$$

Et le facteur de FOLIAS ce présente comme suite :

$$M_i = \sqrt{1 + 0.31 \cdot \left(\frac{L_i}{\sqrt{D \cdot t}} \right)^2}$$

Etape 7 : Pour calculer toute la longueur de combinaisons des défauts (voir le schéma A.10). Pour les défauts « n » jusqu'à « m », toute la longueur (L_{nm}) est indiquée par :

$$L_{nm} = L_m + \sum_{i=n}^{i=m-1} (L_i + S_i)$$

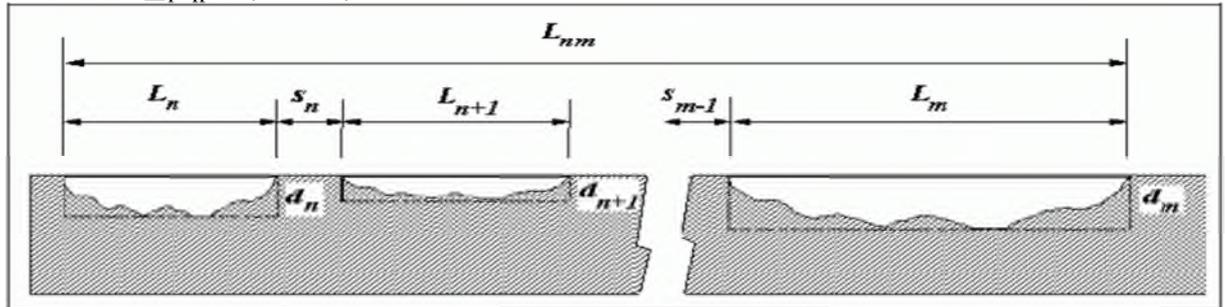


Figure 4.11 : Combinaisons des défauts inter agents [41]

Etape 8 : Calculer la profondeur accomplie du défaut convenu (formé pour des inters agentes déserte « n » jusqu'à « m ») donné par :

$$d_{nm} = \frac{\sum_{i=n}^{i=m} (d_i \cdot L_i)}{L_{nm}}$$

Des groupes possibles de défauts sont considérés comme dans les évaluations trouver le groupe ce des résultats dans le mineur estimative de la pression illustrée de la rupture.

$$P_{nm} = (\sigma_u) \cdot \left(\frac{2t}{D-t} \right) \cdot \left[\frac{1 - \frac{d_{nm}}{t}}{\left(1 - \frac{d_{nm}}{t}\right) \cdot M_{nm}^{-1}} \right], \quad M_{nm} = \sqrt{1 + 0.31 \cdot \left(\frac{L_{nm}}{\sqrt{D \cdot t}} \right)^2}$$

IV.7 Estimation de la durée de vie restante

Les résultats de la sonde et paramètres de Weibull:

Nous adaptons le taux de défaillance admissible peut aller jusqu'à 80% de l'épaisseur du tube (Critère B31G) [41]

Suite aux résultats de la sonde, nous avons remarqué 19 zones de différentes épaisseurs de corrosion implique la taille de l'échantillon est 19.

Nous allons calculer les vitesses de corrosion de ces zones en supposant que les vitesses de chaque zone sont linéaires et uniformes pendant la durée d'exploitation du pipeline afin de calculer chaque TBF correspond à une épaisseur de corrosion admissible $E_{cd} \approx 80\% E \approx 10.16mm$).

Longueur Echantillon en mètre	Epaisseur corrosion en mm	Vitesse de corrosion En mm/ans	TBF en ans (correspondant à épaisseur corrosion à 80%)
[0 ; 250]	3.556	0,1778	57,1428 ≈ 57
[250 ; 490]	2.2225	0.111125	91.4285 ≈ 91
[490 ; 500]	2.794	0.1397	72.7227 ≈ 72
[500 ; 600]	2.6035	0.1301	78.093 ≈ 78
[600 ; 1400]	4.0005	0.200025	50.7936 ≈ 51
[1400 ; 2000]	2,794	0,1397	72,7272 ≈ 72

[2000; 2500]	2,286	0,1143	88,8888≈89
[2500; 3400]	4.191	0.20955	48.48≈ 48
[3400; 3700]	2.7051	0.1352	75.1479≈ 75
[3700; 4000]	2.0955	0.1047	97.0391≈ 97
[4000; 4200]	2.794	0.1397	72.7272 ≈ 72
[4200; 4500]	2,159	0,1079	94,1612≈94
[4500; 5100]	3.048	0.1524	66.66 ≈67
[5100; 5700]	1.9685	0.0984	103.25≈ 103
[5700; 5740]	2.362	0.1181	86
[5740; 5755]	9,525	0,4762	21,3355≈21
[5755; 5765]	2,54	0,127	80
[5765; 5775]	4,826	0,2413	42,1052≈42
[5775; 6000]	3,175	0,1587	64,02≈

Classement résultats de temps de bonne fonction (TBF) par ordre i (voir Tableau 3.1)

$$(N = 19 < 20) \rightarrow F(i) = \frac{i-0.3}{N+0.4} \quad (\text{rangs médians})$$

Le calcul numérique des paramètres par le programme Matlab (chapitre 3, paragraphe 3.3) donne :

$$\gamma=0 ; \beta=3.0048 ; \eta=81.106 \text{ ans ;}$$

$$\text{MTBF (durée de vie moyenne)} = A\eta + \gamma = 71,4276 ;$$

$$\mathbf{R(MTBF)= 51\% ; F(MTBF)=49\%}$$

Ce qui donne une bonne corrélation des résultats.

A partir des résultats numériques on trouve la valeur ($3 < \beta < 4$), c'est le cas du phénomène de corrosion (début au temps $t = \gamma$ dans notre cas $\gamma = 0$).

Comme le montre les courbes figure (3.1), le taux de défaillance $\lambda(t)$ présenté par $L(t)$ dans le figure croît faiblement au départ mais plus fortement à la fin, les défaillances sont dues à l'âge et au corrosion, $\lambda(t)$ croit avec le temps du fait de la dégradation du pipeline.

On peut conclure que l'entretien préventif (un bon revêtement, protection cathodique,...) a un intérêt pour la maintenance de pipeline.

Conclusion générale et perspective

Conclusion générale et perspective

On conclut après cette recherche dans le cadre de la préparation de ce mémoire de magister que l'évaluation de la fiabilité des ouvrages enterrés est indispensable pour leur optimisation. Il n'y a pas de méthode unique ou normalisée pour calculer la fiabilité des pipelines qui se caractérisent dans la majorité des cas par un taux de défaillance variable suivant la vitesse de corrosion. Le choix de la méthode à appliquer dans ce type d'ouvrage se fait en fonction des données recueillies par les racleurs.

Dans notre travail, nous avons étudié les principales lois utilisées en fiabilité ainsi que les différentes méthodes de détermination des paramètres de fiabilité qui caractérisent le degré de défaillance et permettent de bien suivre l'état de pipeline et de choisir le type de la maintenance à appliquer.

Après une étude bibliographique, nous avons constaté que le calcul de la fiabilité mécanique dépend de cinq facteurs essentiels :

1. la notion du taux de défaillance constant n'existe pas ; car en mécanique le taux de défaillance est une fonction non linéaire du temps dans chaque phase de la vie de l'équipement.
2. Le recueil des données de fiabilité est difficile : Il dépend essentiellement de l'organisation et la gestion de la maintenance ; afin de bien exploiter les données historiques de pipeline.
3. La corrosion est d'origine particulière de défaillance des pipelines ;
4. La méthode d'analyse des défaillances ;
5. Le choix de la méthode pour l'évaluation de la fiabilité dépendra de la maintenance durant l'exploitation de l'ouvrage.

On constate que les pipelines sont plus sensibles à l'environnement corrosif qui influe directement sur le coût de la maintenance et sur le ravitaillement par les carburants.

Comme conclusion sur ce type d'ouvrage, on a déduit que cette étude de magister nous a permis à les structure chargée du pipeline une surveillance et une maintenance plus efficaces (réduction le temps et les couts de maintenance) ,.

Nous avons présentés par un calcul de fiabilité par traitement informatique en utilisant le logiciel *Matlab*, suivant une approche probabiliste basée sur des données des racleurs d'expertise en supposant que le mouvement de corrosion rectiligne et uniforme pendant la durée de mise en exploitation. Cette méthode est plus avantageuse (plus facile et rapide pour suivi la maintenance des structures entrées).

En terme de perspective, nous envisageons la détermination des paramètres de fiabilité et la période optimale de maintenance préventive par simulation numérique afin de pouvoir traiter beaucoup plus de données dans un délai très court et de mettre en place une maintenance prévisionnelle gérée par modélisation et simulation numérique par les modèles déterministes.

Dans cette optique il est possible de traiter les thèmes suivants :

- Une étude peut concerner les plans de maintenance et d'inspection permettre poser une base de données concernant les dégradations généralement par corrosion localiser, ces bases de données servent les calculs de risques, les modélisations de fiabilité.
- Comme la fatigue est un mode de rupture important pour les pipelines étude de modèle de fatigue peut être réalisée pour caractériser la résistance des pipes et déterminer la durée de vie en fatigue.

Références Bibliographique

- [1] **A. Tebbal**, 2006 « réseau de transport par canalisation TRC et démarche de maintenance mise en œuvre »
- [2] **C. Salah**, 2007 « Corrosion et protection » école d'ingénieur de Boumerdes.
- [3] **Site internet Wikipédia**: http://fr.wikipedia.org/wiki/Transport_par_canalisation
- [4] **S. Ben soltane**, 2009, « étude électrochimique d'acier gazoduc API 5L X60 dans le milieu environnant et leur protection par polyphosphate », Thèse de Magister, Faculté de Génie Mécanique Département des Mines et Métallurgie, Université d'Oran(Algérie),
- [5] **François Rivalin**. Développement d'acier pour gazoduc a haute limite d'élasticité et ténacité élevée : mécanique et mécanisme de la rupture ductile a grande vitesse. Thèse de doctoral Ecole nationale supérieure des mines de paris, 1988.
- [6] **Bendjebbour A**, « Étude sur l'endommagement par corrosion localisée des aciers API sollicités en milieu de sol algérien » Mémoire Magister 2009-2010.
- [7] **François Monchy** «Maintenance, méthode et Organisation »édition "UsineNouvelle", Paris, 2004
- [8] **Gartner A.W, Graf .M .K et Hillenbrand .H .G**. 1992 « a producer's view of large diameter line pipe in the next decade in: the international conference on pipeline reliability». PP III-1.1-III-1-15 Calgary.
- [9] **Constant. A, Henry .G .et Gharbonnier. J.C**, 1992. « Les principes de base de traitement thermique, thermomécanique et thermochimique des aciers ». Edition PYC.
- [10] **François Rivalin**, 1998. « Développement d'acier pour gazoduc a haute limite d'élasticité et ténacité élevée » : Mécanique et mécanisme de la rupture ductile a grande vitesse. Thèse de doctoral Ecole nationale supérieure des mines de Paris.
- [11] **I.Lakhtime**, 1978. Métallographie et traitement thermiques des métaux. Deuxième édition revue et complétée. EDITION MIR. MOSCOU.
- [12] **J.M Gray .and Poutremoli .M**, 1987. Metallurgical options for API grade X70 And X80 linepipe. In International Conference: pipe technology .Rome.PP 171 -191.
- [13] **Chunming Wang, Xingfang W, Jie lie , Ning an xu**, 2006. Transmission electron microscopy of martensite ,austenite ,islands in pipeline steel X70. Materials science and Engineering A 438-440 , 267-276.
- [14] **M.Ramdani**, 2007, « Etude mécano fiabiliste sur le comportement en corrosion Localisée des aciers API -5L- X60 pour pipeline : Modèle basé sur la ténacité », Thèse de Magister, Faculté des sciences de l'ingénieur,. Université Tlemcen, Algérie.

- [15] M.boumeddane « Impact De La Fiabilité Sur Les Equipements Industriels (Etude De Cas Au Niveau Denitex) » Mémoire Magister université de Tlemcen 2011-2012
- [16] **dabosie1 Pourbaix M.**, 1963, « Atlas des équilibres électrochimiques » Gauthier-Villars, Paris
- [17] **Honeycombe. R.W.K**, 1981. «Steels Microstructures and Properties». Edward Arnold.
- [18] **Szklarska-Smialowska S.**, Corrosion 89 paper no 140, New Orléans(17-27 Avril 1989) et Proceedings of the 7th European Symposium on Corrosion Inhibitors (7 SEIC) Ann. Univ. Ferrara, N.S., Sez. V, Suppl. N.9, (1990) 979
- [19] **Foct F. et Gras J.-M.** 2003, « Semi-empirical model for carbon steel corrosion in long term geological nuclear waste disposal, Actes du colloque Prediction of long term corrosion behaviour in Nuclear Wastes System, Cadarache, France, EFC series 36, pp 91-102.
- [20] **Papillon F., Jullien M. et Bataillon C**, 2003, « Carbon steel in compacted clay : Two long term tests for corrosion prediction, Actes du colloque Prediction of long term corrosion behaviour in Nuclear Wastes System, Cadarache, France, EFC series 36, pp 439-454.
- [22] **Chivot J.**,1998, Sélection de données thermodynamiques concernant le système Fe-H₂O, CEA/FAR SCECF, RT-SCECF 481.
- [23] **Chivot J.** (1999a), Sélection de données thermodynamiques concernant le système Fe-CO₂-H₂O et Ca-CO₂-H₂O - diagramme E-pH du système Fe-CO₂-H₂O en fonction de la température, CEA/SCECF, RT-SCECF 506.
- [24] **Chivot J.** (1999b), « Les diagrammes E-pH révisés du système fer-H₂O en fonction de la température, CEA/SCECF, RT-SCECF 496.
- [25] **Foct F. et Gras J.-M.** 2003, « Semi-empirical model for carbon steel corrosion in long term geological nuclear waste disposal, Actes du colloque Prediction of long term corrosion behaviour in Nuclear Wastes System, Cadarache, France, EFC series 36, pp 91-102.
- [26] ROMANOFF
- [27] **R.L. Starkey, K.M. Wight**, « Anaerobic corrosion of iron in soil, Amer. Gas Assoc. Tech. Rept. Distrib. Comm., New York, 1945, p.108.
- [28] **C. Booth, A. Cooper, P. Cooper**, 1967, « Criteria of soil aggressiveness towards buried metals. II. Assessment of various soils, British Corrosion Journal, Vol.2, p. 109-115
- [29] **AFNOR** ,1990, « Corrosion par les sols - Evaluation de la corrosivité - Canalisations enterrées en matériaux ferreux non ou peu alliés, A 05-250, Paris : AFNOR, p.15.
- [30] **DIN**, 1985, « Corrosion of metals; probability of corrosion of metallic materials when subject to corrosion from the outside, buried and underwater pipelines and structural components , DIN 50-929-3, Berlin: DIN,.

- [31] **Li, Seojn Yeob, Jeon, J-Yong, Yong Tai.** - « Statistical approach to underground corrosion of carbon steel pipeline, corrosion Science and Technology, 2002, p. 461-467.
- [32] **Li, S. Yeob, Kim, Y. Geun, J.J. Yong, Kho** - « Corrosion of carbon steel induced by sulfatereducing bacteria in anaerobic soil, Corrosion Science and Technology 2002, p. 391-401.
- [33] **AMARNATH et All,** 2003, «Effect of thermal and mechanical treatments on corrosion of API X-52 grade pipeline steel in flozing 3.5% NaCl solution, Indian Journal of Chemichal Technology, p. 611-614.
- [34] **Li, Yuntao, Du, Zeyu, Teo, Yongyin, Li, Jianjun** , 2004,« Effect of Mn and MnS on corrosion properties of domestic pipeline steel and welds School of Materials Science and Enggineering, Tianjin University, Tianjin, China Welding, p. 123-127.
- [32] **K,Belmokr, N. Azzouz, F. Kermiche, M.Wery, J.Pagetti** ,1998, « Corrosion Study of steel protection by a primer, by electrochemical impedance spectroscopy (EIS) in 3% NaCl medium and in a soil simulating solution, Materials and corrosion, p. 108-113.
- [33] **A Benmoussat, M. Hadjel and M.Traisnel, Corrosion Behavior of API 5L X –65 pipeline steel exposed to near neutral pH simulating solution, Materials and corrosion, WILEY Inter science, vol. 57 N°10 (2006) p 771 – 777.**
- [34] **A. Benmoussat and M. Traisnel, Corrosion Study of API 5L X60 Gas Pipelines Steels in NS4 Simulated Soil, integrity of pipelines transporting hydrocarbons, NATO science for peace and security, DOI 10. 1007/978–94–007–0588-3_12, Springer sciences (2011), pp 167-181,**
- [35] **J.BUFFERNE**
- [36] **Amarnath, Upadhyay, S.N, Namboodhiri, T.K.G,** 2003, « Effect of thermal and mechanical treatments on corrosion of API X-52 grade pipeline steel in flozing 3.5% NaCl solution, Indian Journal of Chemichal Technology, p. 611-614.
- [37] **Li, Yuntao, Du, Zeyu, Teo, Yongyin, Li, Jianjun** , 2004,« Effect of Mn and MnS on corrosion properties of domestic pipeline steel and welds School of Materials Science and Enggineering, Tianjin University, Tianjin, China Welding, p. 123-127.
- [38] **BELAID Salim** « Analyse de la fiabilité de l’acier API 5L X60 Pour pipelines corrodés Modèle basé sur le critère B31G » Mémoire Magister 2007-2008
- [39] **Shu Xin Li , Shu - Yu Rong Hai Long Zeng , Jian - Hua Li , Rui Liang** ,«Prévision de la durée de vie restante des structures de pipelines enterrés) Revue des Sciences de pétrole et de génie , Volume 65 , Issues 3-4 , Avril 2009,P 162-166.

- [40] **Ramdani Mohamed, Amirat Abdelaziz, Benmoussat Abdrrahim**, «Etude mécano fiabiliste sur le comportement en corrosion Localisée des aciers API -5L- X60 pour le gazoduc GZ1: Modèle basé sur la ténacité) MMR31article amirat SITEM 2009 Tlemcen Algerie
- [41] **Felipe Alexander Vargas Bazán, André Beck Teófilo**, «Modèles de croissance à la corrosion de processus stochastique pour la fiabilité des pipelines) Corrosion Science, volume 74, Septembre 2013, Pages 50-58
- [42] **M. Pourbaix** - « Leçons en corrosion électrochimique, Bruxelles : CEBELCOR, 1975, 2° ed. p. 99-101.
- [43] **Historique canalisation AST District GPL Tlemcen**
- [44] **T.R. Jack, G. Van Boven, M. Wilmott, et Al.** ,1994, « Cathodic protection potential penetration under disbonded pipeline coating, Material Performance, vol. 33, n°8, p. 17-21.
- [45] **J.C. Casanova**, 1994, « Caractérisation de la dégradation en milieu marin d'un revêtement epoxyvinylique d'anticorrosion déposé sur un substrat acier, Thèse de Doctorat U.F.R. des Sciences et Techniques, Dijon : Université de Bourgogne, p. 200.
- [46] **CIMI-CDT (cellule de diffusion Technologique) “ les contrôles non destructifs”**
- [47] **Sedrini Abdelkader**, « Etude sur le comportement en endommagements des aciers API L5 X65 du model weibull », ingénieur mécanique, université Tlemcen, 2007

Annexes

- Déclaration du stage (District PGL Tlemcen)



BRANCHE GPL
DISTRICT GPL TLEMCCEN
UNITE CANALISATION

TLEMCCEN, le 16/06/2013

Déclaration

Je soussigne Monsieur KEBIR Abdelkrim chef service inspection et maintenance canalisation au sein de NPTAL GPL Tlemccen, déclare que Monsieur Houari Ali étudiant magister à l'université de Tlemccen département Génie mécanique a subi un stage de perfectionnement et différents entretiens relatifs à la maintenance et protection des pipe-lines et plus précisément la canalisation reliant Arzew- Sidi Bel Abbes- Tlemccen d'une période d'un mois du 01/01/2013 au 31/01/2013.

Le déclarant :

Mr. A. KEBIR
Chef Service Inspection
Unité Canalisation Arzew