



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique

Université A-MIRA de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

Mémoire du fin cycle

En vue de l'obtention d'un diplôme Master en Génie Mécanique
Option
Construction Mécanique

Thème

Maintenance préventive conditionnelle
pour les systèmes soumis à des
dégradations par corrosion

Cas du pipeline GG1 Sonatrach

Présenté par :

HADDAD Saddam

HANOUTI Yanis

Soutenu le 29/06/2019 devant le jury composé de :

Président Mr. BELAMRI A/L.

Examineurs Mme. ADJOUADI N.

Rapporteur Mr. LAGGOUNE R.

Co-Encadreur Mr CHERFAOUI B.

Promotion 2018-2019

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout-puissant qui nous a donné la force et le savoir afin d'accomplir ce travail.

Un grand merci pour nos familles, surtout nos parents qui nous ont épaulées, soutenus et suivis tout au long de ce projet.

A nos chers amis qui ont toujours été présents et fidèles.

A notre encadreur Mr LAGGOUNEN R pour son encouragement et son suivi attentif pour la réalisation de ce travail.

A notre Co-encadreur Mr CHERFAOUI B pour l'honneur qui nous a fait en acceptant de diriger ce travail, et ses judicieux conseils.

A l'ensemble du personnel de la Direction de SONATRACH notamment Mr SAIGH S pour le temps qu'ils nous ont

Consacré durant la collectée des données.

Nous tenons aussi à remercier également les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail Mr BELAMRI A/L. et Mme ADJOUADI N.

Enfin, pour toute personne qui a contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire.

Veillez bien trouver ici l'expression de nos sincères remerciements.

Je dédie ce travail :

*À celle qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté
fait toujours les grands hommes ;*

À ma mère.

À celui qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation ;

À mon père.

*À mes sœurs, en témoignage de mon amour et de ma profonde
admiration ;*

que dieu vous protège et vous prête bonne santé et longue vie.

À mon grand-père; que dieu vous protège.

*À la mémoire de mes grands mères ; que dieu vous accorde sa
miséricorde.*

*Et a tous mes amis qui me connaissent de près ou de loin Que dieu
vous bénisse.*

Yanis

Je dédie ce travail :

*À celle qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la
volonté fait toujours les grands hommes ;*

À ma mère.

*À celui qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne
éducation ;*

À mon père.

*À mes frères et sœurs, en témoignage de mon amour et de ma
profonde admiration ;*

que dieu vous protège et vous prête bonne santé et longue vie.

*Et à tous mes amis qui me connaissent de près ou de loin Que
dieu vous bénisse.*

Saddam

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

I. Généralités sur la maintenance	3
I.1. Introduction	3
I.2 Objectifs de la maintenance	3
I.3 Les niveaux de maintenance	4
I.4 Les Activités De La Maintenance (norme NF)	5
I.5 Les types de maintenance	5
I.5.1 La maintenance corrective	6
I.5.2 La maintenance préventive	7
I.6. Les temps de la maintenance.....	8
I.7. Concepts de base de la maintenance	9
I.7.1. La fiabilité.....	9
I.7.2. La disponibilité	10
I.7.3. La Maintenabilité.....	10
I.7.4. Taux de défaillance.....	10
I.8. Lois usuelles de fiabilité.....	12
I.8.1. La loi exponentielle :	12
I.8.2. Loi de weibull :.....	13
I.8.3. La loi normale.....	14
I.9 Conclusion.....	14

Chapitre II : Modèles de dégradation

II. Modèles de dégradation.....	15
II.1 Comprendre le processus	15
II.1.1. Modèle dégradation discret (choc)	15
II.1.2. Modèle dégradation continue (usure).....	16
II.2. Modèle de dégradation par corrosion	17

II.2.1. Définition de la corrosion.....	17
II.2.2. Dégradation par corrosion dans les pipelines.....	18
II.2.2.1. Perte de métal des pipelines (corrosion).....	19
II.2.2.1.1. Corrosion interne.....	19
II.2.2.1.2. Corrosion externe.....	20
II.3. Les Formes De Corrosion.....	21
II.3.1. La Corrosion Uniforme.....	22
II.3.2. La corrosion localisée.....	22
II.4. Modèle de corrosion.....	28
II.4.1. Modèles empiriques.....	28
II.4.1.1. Modèles linéaires.....	28
II.4.1.2. Modèles puissances.....	30
II.4.1.3. Modèles de Guedes Soares et Garbatov.....	31
II.4.1.4. Modèles de Paik.....	32
II.4.1.5. Modèles de Qin et Cui.....	33
II.5. Conclusion.....	36

Chapitre III : Stratégie d'inspection

III.1. Introduction.....	37
III.2. Politique d'inspection.....	37
III.2.1 Les stratégies d'inspection.....	38
III.2.1.1. Stratégie d'inspection périodique.....	38
III.2.1.2. Stratégie d'inspection séquentielle (non périodique).....	38
III.3. Critère d'optimisation de maintenance.....	39
III.3.1. Critère de disponibilité.....	39
III.3.2. Critère de coût.....	39
III.2.2.1. Les différents types des coûts de maintenance.....	40
III.2.3. Critère de sécurité :.....	41
III.3. Effets de la maintenance sur les systèmes.....	41
III.3.1. Modèle de base.....	41
III.3.1.1. Le modèle de maintenance parfaite.....	42
III.3.1.2. Modèles de maintenance imparfaite.....	43
III.3.1.3. Modélisation de maintenance minimale.....	43
III.4. Conclusion.....	44

Chapitre IV : Evaluation de la dégradation du pipeline GG1 Sonatrach

IV.1. Présentation général de l'entreprise Sonatrach.....	45
IV.1.1.Créations de la SONATRACH.....	45
IV.1.2. Organigramme de Sonatrach	46
IV.1.3. Les principales Activités de la Sonatrach.....	47
IV.1.4. L'activité Transport par Canalisation «TRC».....	47
IV.1.5. Caractéristique de la ligne	47
IV.1.6. Ouvrages de la ligne GG1.....	48
IV.1.7. Les conditions d'exploitation du GG1 sont.....	49
IV.2. Evaluation de la dégradation des réseaux de pipeline corrodés	50
IV.2.1. Présentation de l'étude :.....	50
IV.2.3. Principe de la démarche proposée	50
IV.3. résultats et discussion	51
IV.3.1. Cas réel (données de l'entreprise).....	51
IV.3.2. Cas simulation	52
IV.3.3. Discussion.....	58
 Conclusion générale	 59
Bibliographie	60

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : classification des résultats de $d(t)$	51
Tableau IV.2 : les probabilités de l'évènement en fonction du temps	52
Tableau IV.3 : Variation des coûts en fonction de $\Delta T1$	53
Tableau IV.4. : Variation des coûts en fonction de $\Delta T2$	55
Tableau IV.5. : Variation des coûts en fonction de $\Delta T3$	56
Tableau IV.6. : Variation des coûts en fonction de $\Delta T4$	57

Liste des figures

Figure I.1 : les différentes stratégies de maintenance.....	6
Figure I.2 : Temps caractéristiques lors d'une intervention.....	8
Figure I.3. Fonctions Fiabilité / Défiabilité	9
Figure. I.4. Exemple d'une courbe en baignoire du taux de défaillance	11
Figure I.5. Distribution des fonctions de la loi exponentielle	12
Figure.II.1. Schématisation d'un modèle à dégradation discrète	16
Figure.II.2. Représentation d'un modèle à dégradation continue.	17
Figure.II.3. Schéma simplifié du processus de corrosion (Destruction de l'équilibre par réaction Du milieu).	18
Figure.II.4. Pertes de métal dues à la corrosion interne	19
Figure.II.5. Pertes de métal dues à la corrosion externe.....	20
Figure.II.6. Formes principales de corrosion regroupées par leur facilité d'identification .	21
Figure.II.7. Corrosion Uniforme.....	22
Figure.II.8. Corrosion par Piqures	23
Figure.II.9. Corrosion Galvanique.....	23
Figure.II.10. corrosion caverneuse	24
Figure II.11. Corrosion inter granulaire d'un acier inoxydable.....	25
Figure.II.12. Corrosion sous contrainte	25
Figure II.13. Représentation schématique du phénomène de corrosion érosion.	26
Figure II.14. Colonie de bactéries sur un acier.....	27
Figure III.1. Equilibre entre maintenance préventive et maintenance corrective.....	40
Figure III.2. Intensité de taux de défaillance dans le cas Maintenance parfaite.....	42
Figure III.3. Intensité de taux de défaillance dans le cas de Maintenance .imparfaite.....	43
Figure III.4. Intensité de taux de défaillance dans le cas Maintenance minimale.....	44

Figure IV.1. : Variation des coûts en fonction de $\Delta T1$	53
Figure IV.2. : Variation des coûts en fonction de $\Delta T2$	55
Figure IV.3. : Variation des coûts en fonction de $\Delta T3$	56
Figure IV.4. : Variation des couts en fonction de $\Delta T4$	57
Figure IV.5. : Variation des coûts selon les différents ΔT	58

Glossaire

Mot	Définition
AFNOR	Association française de normalisation.
ABAO	As Bad As Old (Aussi mauvais que vieux).
AGAN	As Good As New (Aussi mauvais que neuf).
RP	Renewal process (Processus de Renouvellement)
HPP	Homogenous poisson process (Processus de poisson Homogène)
NHPP	Non homogenous poisson process (Processus de poisson Non Homogène).
HP	Haute Pression

Introduction générale

Introduction générale

Dans des nombreux secteurs industriels, la sûreté de fonctionnement est un enjeu majeur pour assurer une compétitivité optimale de l'outil de production. En réalité, la sûreté de fonctionnement englobe des notations essentielles tel que : la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité de n'importe quel système industriel produisant des biens ou des services.

La maintenance préventive (la planification des inspections) permet de réduire considérablement les probabilités de défaillance, mais elle engendre des coûts supplémentaires, qui sont dus, dans plusieurs cas, au manque à gagner résultant de l'indisponibilité du système. L'objectif de la politique de maintenance (d'inspection) est donc de rechercher le meilleur compromis entre des exigences contradictoires de coût et de fiabilité.

Les tubes utilisés pour l'exploitation pétrolière (pipelines) sont généralement conçus en aciers à résistance élevée mais ils peuvent aussi être attaqués par un phénomène de corrosion interne et externe, de fissuration ou bien de faille de fabrication. La corrosion interne et externe peut générer d'énormes fuites et de ruptures des canalisations, se traduisant parfois par des dégâts catastrophiques (dégâts humains, pollution du milieu naturel, frais supplémentaires de réparation, arrêt prolongé du pompage, etc.). Si un pipeline porteur d'eau est affecté d'un éclatement de fuite, au moins cela ne nuit pas à l'environnement. Cependant, si c'est la fuite de pipeline est du pétrole, cela peut être un désastre environnemental.

Sur le plan économique, toute augmentation de la durabilité des matériaux métalliques entraîne un gain financier important, connaître la vitesse de corrosion permet par ailleurs un ajustement plus pertinent de la quantité de matériaux utilisée dans la fabrication des ouvrages métalliques en fonction de la durée de vie souhaitée. La mise en place de la surveillance de ces ouvrages peut se faire selon un cahier des charges défini et optimisé en fonction des modèles prédictifs établie en prenant en compte chaque élément constituant l'ouvrage.

La prévision du comportement de la dégradation par corrosion à long terme est un défi car la corrosion est une combinaison de multiples phénomènes d'origine physique, chimique et mécanique. La compréhension de ces phénomènes doit permettre de lutter plus efficacement

contre la dégradation des matériaux en choisissant la méthode de protection la mieux appropriée.

Plusieurs méthodes de calcul sont désormais utilisées dans le but d'optimiser les dates d'inspection et de contrôle de pipeline pour éviter toutes défaillances inattendues. Dans notre cas on a utilisé le Modèle de Paik [21] Afin de tenir compte des facteurs qui influencent la corrosion des structures (entretien, fréquence de nettoyage, température, humidité, gaz dissous, etc). Ce modèle prend en compte les trois phases de vie d'un pipeline à savoir :

- La première phase qui correspond à la période d'efficacité du système de protection ;
- La deuxième phase est une période de transition ou d'amorçage de la corrosion ;
- La troisième phase représente la progression de la corrosion.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres.

Chapitre I, présente une étude bibliographique sur la maintenance industrielle et on introduit quelque définition sur la (La fiabilité, La disponibilité, La Maintenabilité,) et les lois usuelles de fiabilité

Chapitre II Une étude général sur les modèles de dégradation (discrète, continu), Plus exactement nous sommes intéressé à la dégradation par corrosion, puisque cette dernière représente la dégradation la plus rencontré dans les pipelines (système étudiant).

Chapitre III présente les différentes politiques d'inspection existantes dans la littérature, Ainsi les différents critères d'optimisation de maintenance à savoir le critère de minimisation coût et le critère de maximisation de disponibilité.

Chapitre IV renferme l'application de la méthodologie proposée au pipeline GG1 de Sonatrach, et les différents situations ont été étudiés et discutés.

Chapitre I

Généralités sur la maintenance

I. Généralités sur la maintenance

I.1. Introduction

Les activités de maintenance, au sens de dépannage d'un équipement, ont toujours existé. Mais ces activités étaient au départ peu ou pas formalisées : elles n'étaient pas nécessairement assurées par du personnel spécialisé, ni encadrées par des méthodes spécifiques. De plus, elles consistaient essentiellement à réparer un équipement une fois que celui-ci était défaillant, mais n'intégraient que peu la notion de "préventif", c'est-à-dire des interventions visant à prévenir la panne.

La notion formalisée de "maintenance" est relativement récente. Elle est apparue avec l'automatisation des systèmes de production, les enjeux économiques et industriels croissants, les réglementations strictes pour la protection de l'individu et de l'environnement.

La fonction de maintenance ne peut se réduire à la seule activité d'entretenir un parc de machine mais a vocation à intervenir dans tout le cycle de l'exploitation du système (choix et conception du matériel, mise en service, détermination des plans de maintenance, organisation et logistique des activités de maintenance, suivi de l'évolution du système, etc.).

Définition :

Selon la norme NF EN 13306 [1], la maintenance représente, « l'ensemble de toutes les actions technique, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinée à maintenir ou à rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Maintenir c'est donc effectué des opérations qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production.

I.2 Objectifs de la maintenance

- Assurer la production prévue (quantité).
- Maintenir la qualité du produit fabriqué (qualité).
- Respecter les délais (temps).
- Rechercher les coûts optimaux (rentabilité).
- Assurer la sécurité des employés.

I.3 Les niveaux de maintenance

Pour mettre en œuvre une organisation efficace de la maintenance et prendre des décisions comme gestionnaire dans des domaines tel que la sous-traitance le recrutement de personnel approprié, Les niveaux de maintenance sont définis en fonction de la complexité des travaux. L'AFNOR identifie 5 niveaux de maintenance dont en précise le service:

➤ **NIVEAU 1**

Réglage simple prévu par le constructeur ou le service de maintenance, au moyen d'éléments accessible sans aucun démontage pour ouverture de l'équipement. Ces interventions peuvent être réalisées par l'utilisateur sans outillage particulier à partir des instructions d'utilisation.

➤ **NIVEAU 2:**

Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet et d'opération mineure de maintenance préventive, ces interventions peuvent être réalisées par un technicien habilité ou l'utilisateur de l'équipement dont la mesure où ils ont reçu une formation particulière

➤ **NIVEAU 3:**

Identification est diagnostique de panne suivit éventuellement d'échange de constituant, de réglage et de d'étalonnage général. Ces interventions peuvent être réalisées par technicien spécialisé sur place ou dans un local de maintenance à l'aide de l'outillage prévu dans des instructions de maintenance.

➤ **NIVEAU 4:**

Travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ces interventions peuvent être réalisées par une équipe disposant d'un encadrement technique très spécialisé et des moyens importants adaptés à la nature de l'intervention.

➤ **NIVEAU 5:**

Travaux de rénovation, de reconstruction ou de réparation importante confiée à un atelier central de maintenance ou une entreprise extérieure prestataire de service.

I.4 Les Activités De La Maintenance

1. L'inspection : C'est un contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien.

2. La surveillance : C'est l'activité exécutée manuellement ou automatiquement ayant pour objectif d'observer l'état réel d'un bien.

3. La réparation : Ce sont les actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne.

4. Le dépannage : Ce sont les actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée

5. L'amélioration : Ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise.

6. La modification : Ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à changer la fonction d'un bien.

7. La révision : Ensemble complet d'examens et d'actions réalisés afin de maintenir le niveau requis de disponibilité et de sécurité.

8. La reconstruction : L'objectif de la reconstruction est normalement de donner à un bien une vie utile qui peut être plus longue que celle du bien d'origine.

I.5 Les types de maintenance

Les stratégies de maintenance peuvent être répertoriées en deux grandes catégories : la maintenance corrective et la maintenance préventive.

La maintenance corrective est la maintenance qui intervient suite à la défaillance du système alors que la maintenance préventive est réalisée lorsque le système est encore en fonctionnement. Le recours à l'une ou à l'autre de ces stratégies diffère suivant l'élément considéré mais aussi le type de structure, la politique d'exploitation et de suivi, les coûts, la disponibilité de l'information, etc.

Dans la (Figure *I.1*) nous présentons les différentes stratégies suivant le type de maintenance étudiée. Alors que la mise en place d'opérations correctives ne dépend que de l'occurrence d'une panne, les maintenances préventives peuvent être programmées en fonction de différents paramètres

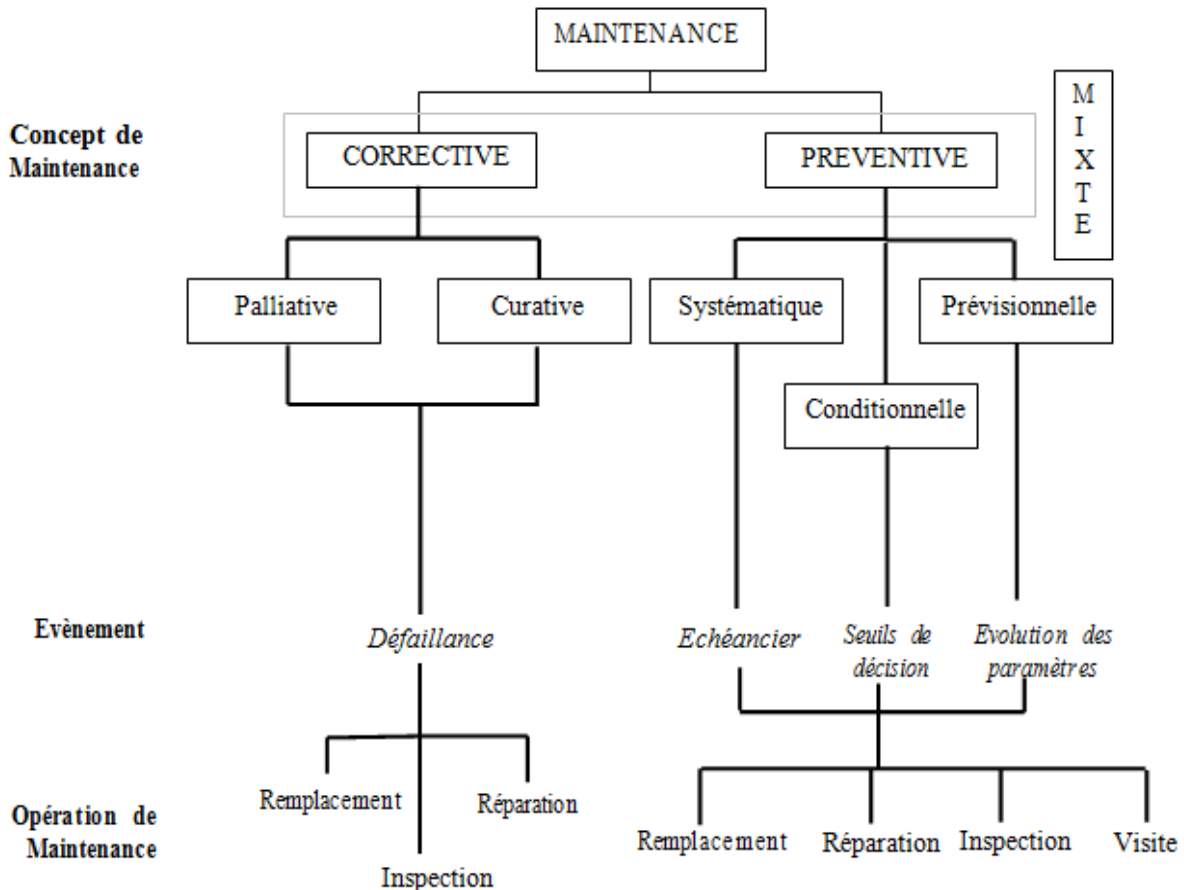


Figure I.1 : les différentes stratégies de maintenance [2]

I.5.1 La maintenance corrective

Selon la norme NF EN 13306 [1] c'est une « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». Elle se divise en :

- **Maintenance curative** : réparation consistant en une remise en état initial.
- **Maintenance palliative** : dépannage (donc provisoire) de l'équipement, permettant à celui-ci d'assurer tout ou partie d'une fonction requise, elle doit toutefois être suivie d'une action curative dans les plus brefs délais.

On peut citer aussi la maintenance mixte qui consiste à profiter de l'opportunité offerte par l'arrêt d'un système pour effectuer parallèlement d'autres interventions, prévues ou non, sur d'autres éléments. Le système considéré peut être :

- **Une machine** : lors de la défaillance d'un équipement, on profite de l'arrêt de la machine pour effectuer des interventions sur d'autres équipements de la machine.
- **une ligne de production** : Lors de l'arrêt de la machine, des interventions sont réalisées sur une ou plusieurs machines de la même ligne et dont l'arrêt ne pénalisera pas le fonctionnement de l'unité de production.

I.5.2 La maintenance préventive

La maintenance préventive a pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Par ailleurs, une maintenance préventive est intéressante, en considérant le coût comme critère d'évaluation, si les coûts induits par la perte de performance sont élevés et si les coûts de réparation et d'inspection sont relativement faibles par rapport aux premiers. La maintenance préventive peut être systématique, conditionnelle ou prévisionnelle.

Une synthèse des politiques de maintenance préventive est donnée par [3]. Il existe trois groupes de maintenance préventive :

➤ **maintenance systématique**

C'est la maintenance préventive effectuée sans contrôle préalable de l'état du bien conformément à un échéancier établi selon le temps, le nombre de cycles de fonctionnement, le nombre de pièces produites ou un nombre prédéterminé d'usages pour certains équipements (révisions périodiques) ou organes sensibles (graissage, étalonnage, etc..)[2].

L'optimisation d'une maintenance préventive systématique consiste à déterminer au mieux la périodicité des opérations de maintenance sur la base du temps, du nombre de cycles de fonctionnement, du nombre de pièces produites, etc.

➤ **maintenance conditionnelle**

Lorsque l'opération de maintenance préventive est subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation ou de la baisse de performance d'une entité, on parle de maintenance conditionnelle. Les paramètres significatifs de la dégradation peuvent être soit des mesures de caractéristiques physiques du système (épaisseur d'un matériau, degré d'érosion, température, pression, ...), soit des informations sur la durée de vie résiduelle (on parle alors de maintenance prédictive).

La planification des interventions repose sur l'existence et la détermination de seuils critiques pour ces paramètres de dégradation. On parle alors de seuils de décision.

➤ maintenance prévisionnelle

Lorsque la maintenance préventive est effectuée sur la base de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste avant l'observation de l'événement redouté, on parle de maintenance prévisionnelle.

Une maintenance prévisionnelle peut prendre en compte un âge du matériel qui n'est pas forcément calendaire mais par exemple le temps de fonctionnement mesuré depuis la dernière inspection.

Dans le milieu industriel, en général, une maintenance mixte est appliquée aux systèmes. En effet, la maintenance préventive est destinée à réduire la probabilité de défaillance mais il subsiste une part de maintenance corrective incompressible. Il est donc nécessaire de considérer des stratégies qui combinent les deux : maintenance corrective et maintenance préventive.

I.6. Les temps de la maintenance

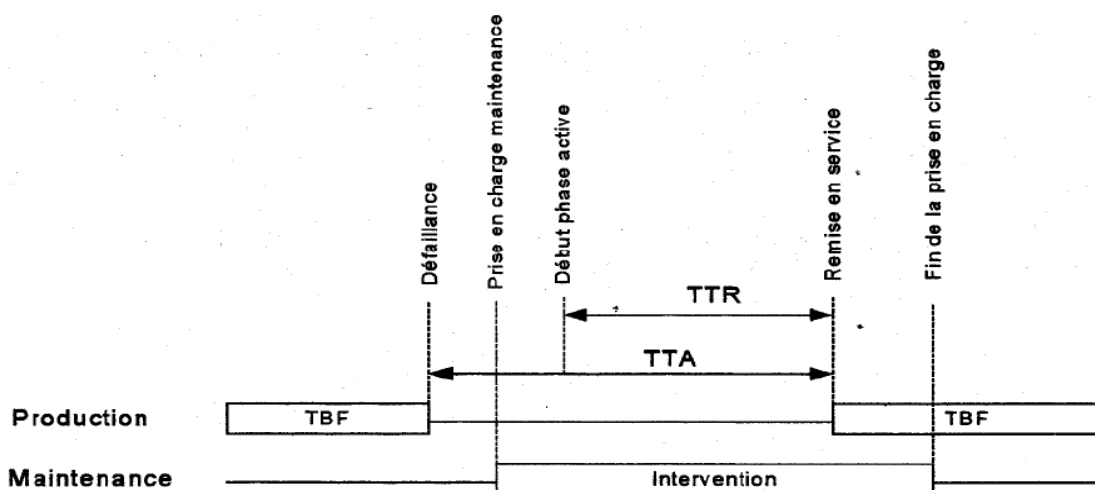


Figure I.2 : Temps caractéristiques lors d'une intervention [2]

La MTBF : est la moyenne des temps de bon fonctionnement (TBF).

Un temps de bon fonctionnement est le temps compris entre deux défaillances.

Remarque : En anglais, MTBF signifie mean time between failures

La MTTR : est la moyenne des temps techniques de réparation (TTR).

Le **TTR** est le temps durant lequel on intervient physiquement sur le système défaillant. Il débute lors de la prise en charge de ce système jusqu'après les contrôles et essais avant la remise en service.

Remarque : En anglais, MTTR signifie mean time to restoration

La MTTA : est la moyenne des temps techniques d'arrêt (TTA).

Les temps techniques d'arrêt sont une partie des temps d'arrêt que peut connaître un système de production en exploitation. Ils ont pour cause une raison technique et, ce faisant, sont à distinguer des arrêts inhérents à la production (attente de pièce, de matière, d'énergie, changement de production, etc.).

I.7. Concepts de base de la maintenance

I.7.1. La fiabilité

Selon la norme NF EN 13306 [1] « Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné ». Elle est notée R . La fiabilité se calcule comme suit :

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{1.1}$$

$$F(t) = P(T \leq t)$$

Où $F(t)$ est la fonction de répartition de T . elle représente la probabilité que le système ait une défaillance avant l'instant t

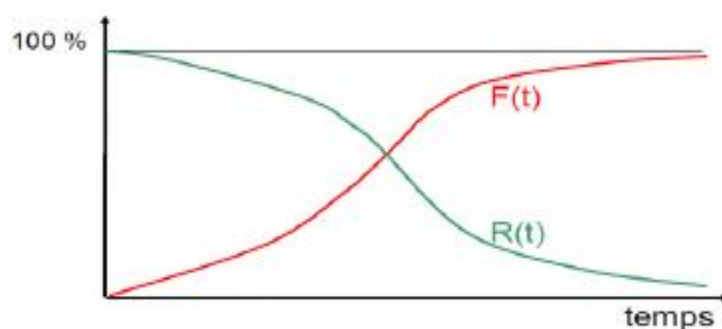


Figure I.3. Fonctions Fiabilité / Défiabilité

I.7.2. La disponibilité

Selon la norme NF EN 13306 [1] c'est l' « Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée ». La disponibilité dépend à la fois de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de la maintenance (procédure d'entretien et de réparation du système).

D'une façon générale, la disponibilité $D(t)$ d'un équipement au temps $t > 0$, est la probabilité pour que ce dernier fonctionne au temps t , sous des conditions données.

$$D(t) = P(\text{que l'équipement est non défaillant à l'instant } t)$$

On définit la disponibilité opérationnelle par la quantité

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTTR + MTBF + MTL} \quad (1.2)$$

MTL : Moyenne des Temps Logistiques

Et la disponibilité intrinsèque par la quantité

$$D_i = \frac{MTBF}{MTTR + MTBF} \quad (1.3)$$

I.7.3. La Maintenabilité

C'est une caractéristique qui permet d'assurer la disponibilité et la facilité de la maintenance des équipements dans des conditions pour lesquelles il a été conçu, selon la norme NF EN 13306 [1] « la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits ».

$$M(t) = P(\text{que le dispositif soit réparé avant } t)$$

I.7.4. Taux de défaillance

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est un estimateur de la fiabilité (exprimé en pannes par heure), il est présenté par le rapport :

$$\lambda = \frac{\text{nombre de défaillances}}{\text{durée d'usage}}$$

Sa fonction peut aussi s'écrire de la façon suivante :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.4)$$

$f(t)$ la densité de probabilité de défaillance du système.

Il est représenté par trois phases [4] :

- Phase de jeunesse : $\lambda(t)$ décroît rapidement. C'est la période de mise en service et de rodage de l'installation. Les défaillances sont dues à des anomalies ou imperfection de montage.
- Phase de maturité : $\lambda(t)$ est pratiquement constant. C'est la période de vie utile ou la défaillance est aléatoire. Le taux de défaillance est constant ou légèrement croissant, correspondant au rendement optimal de l'équipement.
- Phase de vieillesse : $\lambda(t)$ croît rapidement. C'est la période d'observation, à dégradation accélérée. Souvent, on trouve une usure mécanique de la fatigue, une érosion ou une corrosion.

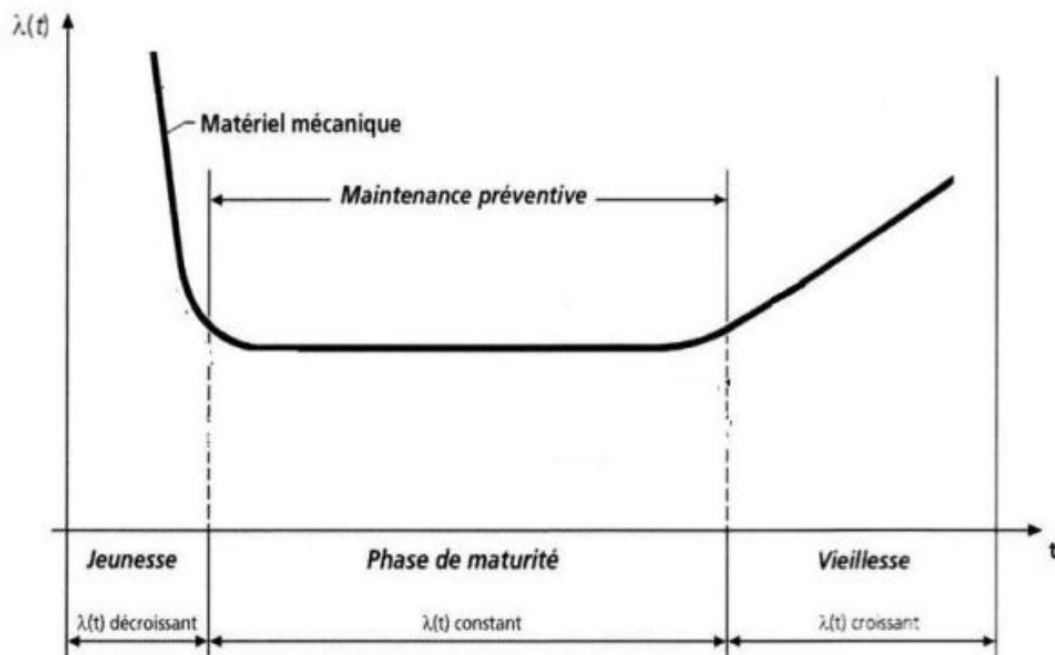


Figure. I.4. Exemple d'une courbe en baignoire du taux de défaillance

I.8. Lois usuelles de fiabilité

I.8.1. La loi exponentielle

C'est la loi la plus répandue de la fiabilité que ce soit sur le plan pratique ou théorique. Elle modélise la période de vie utile des matériels caractérisée par des défaillances aléatoires avec une probabilité constante d'apparition, ainsi que les matériels complexes constitués de composante de différents âges. Sur le plan théorique, l'hypothèse de loi exponentielle simplifie énormément les calculs [4].

Pour caractériser la durée de vie et mettre en évidence la notion de vieillissement. On montre en particulier l'utilité pratique de la loi exponentielle pour approcher la distribution des temps de panne. La distribution exponentielle s'exprime ainsi :

- **Densité de probabilité :**

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad t \geq 0 \text{ et } \lambda \geq 0 \quad (1.5)$$

- **Fonction de répartition :**

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad t \geq 0 \text{ et } \lambda \geq 0 \quad (1.6)$$

- **Fonction de fiabilité :**

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}. \quad t \geq 0 \text{ et } \lambda \geq 0 \quad (1.7)$$

- **Taux de défaillance :**

$$\lambda(t) = \lambda = \text{constant} \quad (1.8)$$

Avec les paramètres de significations :

e : est la base de l'exponentielle (2,718...)

λ: Le taux de défaillance.

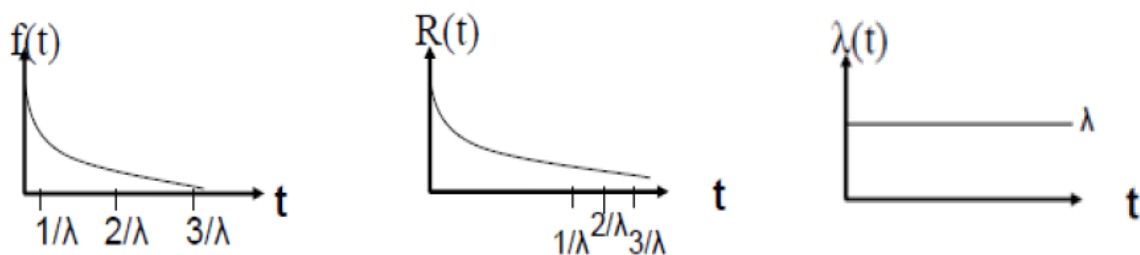


Figure I.5. Distribution des fonctions de la loi exponentielle

I.8.2. Loi de weibull

La loi de Weibull est un modèle couramment employé pour modéliser la durée vie d'un matériel. Elle permet d'ailleurs, à partir des résultats obtenus de déterminer dans quelle période de sa vie se trouve le système étudié [5].

Elle couvre les cas de taux de défaillance variables, décroissants (périodes de jeunesse), ou croissant (période de vieillesse).

Paramètres de Weibull :

β : Paramètre de forme >0 sans dimension:

- Si $\beta > 1$, le taux de défaillance est croissant, caractéristique de la zone de vieillesse
 - $1,5 < \beta < 2,5$: fatigue
 - $3 < \beta < 4$: usure, corrosion
- Si $\beta = 1$, le taux de défaillance est constant, caractéristique de la zone de maturité
- Si $\beta < 1$, le taux de défaillance est décroissant, caractéristique de la zone de jeunesse

η : Paramètre d'échelle >0 qui s'exprime dans l'unité de temps

γ : paramètre de position, $-\infty < \gamma < +\infty$, qui s'exprime dans l'unité

• Fonction de fiabilité :

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (1.9)$$

• Densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (1.10)$$

• Fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (1.11)$$

• Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (1.12)$$

I.8.3. La loi normale

La loi normale est la plus usuelle parmi les lois de fiabilité. Elle comporte deux paramètres la moyenne μ et l'écart-type σ . La fonction de densité s'écrit, pour $t \geq 0$, comme suit :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1.13)$$

La loi normale prend une place particulière dans les études statistiques grâce à la convergence d'une suite de variables aléatoires vers cette loi en utilisant le théorème de la limite centrale. En effet, elle correspond au comportement de la moyenne d'une suite d'expériences aléatoires similaires et indépendantes lorsque le nombre d'expériences est très élevé. Grâce à cette propriété, la loi normale permet de s'approcher d'autres distributions et ainsi de modéliser de nombreuses études scientifiques telles la modélisation d'erreurs de mesure ou d'expériences aléatoires.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini la maintenance, comme on a présenté ces différents types, et ces activités, puis on a parlé sur quelques concepts de base de la maintenance (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, taux de défaillance). Finalement on a cité les lois usuelles les plus utilisées en fiabilité (exponentielle, weibull et normale).

Chapitre II

Modèles de dégradation

II. Modèles de dégradation

II.1 Comprendre le processus

On appelle modèle de dégradation, les modèles pour lesquels l'espace des états se compose non seulement des états de marche et de panne, mais aussi d'états intermédiaires appelés "états dégradés". Les états de dégradation permettent de transiter successivement entre l'état neuf ou le moins dégradé et l'état de panne, et une défaillance se produit lorsque le niveau de dégradation atteint un certain seuil. Dans ce cas, il faut trouver les lois de dégradation qui vont donner les dates d'entrée dans ces différents états intermédiaires et le temps passé dans chaque état. Selon la nature du système, on distingue deux grandes classes de dégradation : les modèles à dégradation discrète et les modèles à dégradation continue.

Définition :

Selon la norme NF EN 13306 [1] la dégradation : est une évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une cause externe altération de fonction, phénomène continu, vieillissement physique.

II.1.1. Modèle dégradation discret (choc)

Les modèles à dégradation discrète font référence à des dégradations de type chocs (*Figure.II.1*). Chaque choc, à occurrence aléatoire, va incrémenter la dégradation de l'entité modélisée. Cet incrément de dégradation peut être déterministe ou aléatoire. Un choc entraîne un saut d'un état de dégradation à un autre. Entre deux chocs consécutifs, on considère que l'état du système reste stable. Les incréments de dégradation s'additionnent jusqu'à la défaillance totale de l'entité. Pour cette classe de dégradation, les processus markoviens [6] sont généralement utilisés. En pratique, la caractérisation des transitions entre les différents états peut s'avérer délicate.

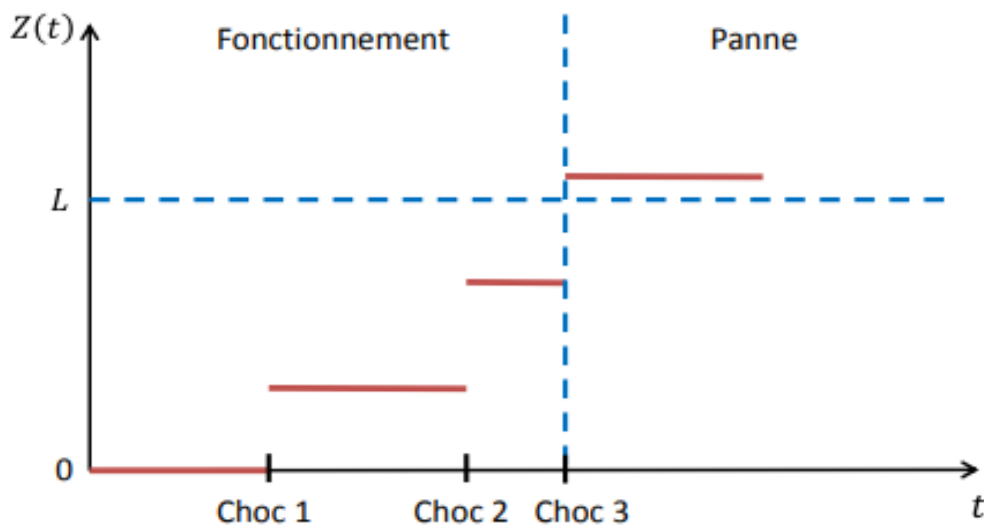


Figure.II.1. Schématisation d'un modèle à dégradation discrète

II.1.2. Modèle dégradation continue (usure)

Les modèles à dégradation continue sont, quant à eux, pertinents pour modéliser des phénomènes tels que la fatigue, l'érosion graduelle d'un matériau ou encore l'usure progressive d'une pièce mécanique, etc. Pour ces modèles, il est nécessaire de connaître la loi des incréments de dégradation entre deux instants consécutifs afin de prédire le niveau de dégradation à tout instant (*Figure.II.2*). On considère généralement que le processus de dégradation est markovien [6]. Cela implique que les incréments de détérioration ne dépendent ni de l'âge, ni de l'état de santé de l'entité mais uniquement de la durée d'observation. Cette hypothèse se justifie naturellement si la seule information disponible sur l'état de l'entité est l'accroissement de sa dégradation entre deux observations. Les propriétés d'indépendance et de stationnarité des incréments conduisent à retenir la classe des processus de Lévy pour la modélisation de la dégradation d'une entité. Ces processus sont détaillés dans la sous-partie suivante.

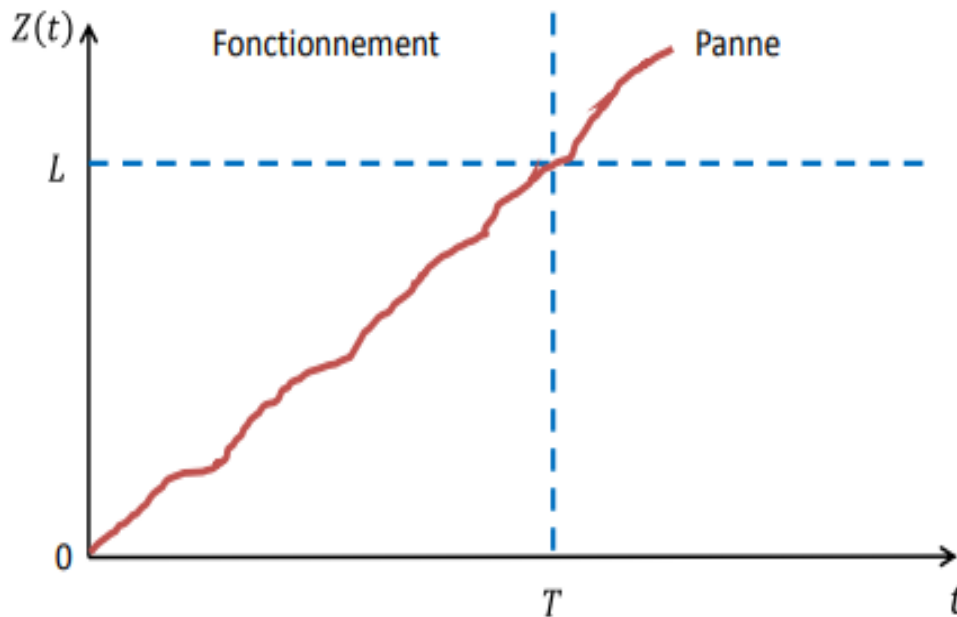


Figure.II.2. Représentation d'un modèle à dégradation continue.

II.2. Modèle de dégradation par corrosion

La corrosion peut être définie comme une dégradation physique d'un matériau et l'altération de ses propriétés chimiques sous l'influence de son milieu environnant.

L'importance de la corrosion n'est plus à démontrer. En effet, elle peut affecter de nombreuses matériaux, en particulièrement, les aciers qui constituent les matériaux de base dans la construction de nombreuses structures sont fortement exposés à la corrosion qu'ils soient au contact d'atmosphères humides, immergés en eau douce ou saline, implantés dans les sols ou en présence de solutions plus ou moins agressives [7]

II.2.1. Définition de la corrosion

La corrosion est la destruction chimique ou électrochimique des matériaux métalliques par leur environnement. C'est, en fait, le phénomène suivant lequel les métaux ont tendance à revenir à leur état naturel d'oxyde, sulfate, carbonate ... plus stable par rapport au milieu corrosif, et ainsi à subir une dégradation de leurs propriétés.

On pourrait en conclure que la corrosion étant la manifestation de l'affinité chimique des métaux pour certains éléments constitue une branche de la chimie. Malheureusement ce concept purement chimique ne permet pas d'interpréter bien des phénomènes de corrosion qui font intervenir un certain nombre de facteurs présentant un caractère chimique, électrochimique, métallurgique, mécanique, et agissant souvent simultanément[8].

II.2.2. Dégradation par corrosion dans les pipelines

La corrosion des pipelines (Acier) est un phénomène courant et naturel, d'où les molécules de fer sont transformées en des formes d'hydroxydes ferreux. Ce phénomène peut être décomposé en deux réactions: anodique et cathodique (figure.II.1).

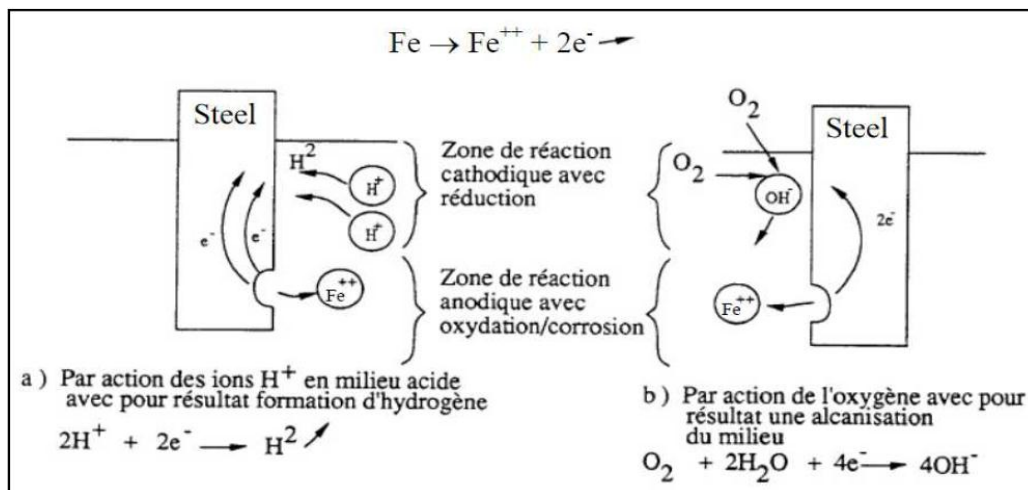
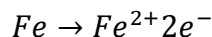
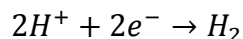


Figure.II.3. Schéma simplifié du processus de corrosion (Destruction de l'équilibre par réaction Du milieu) [12].

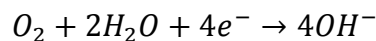
La réaction anodique correspond a la dissolution du fer est représentée par:



La réaction cathodique est dépendante de l'environnement. À titre d'exemple, le dégagement D'hydrogène est caractérisé par:



Une autre réaction cathodique est la réduction de l'oxygène dans les solutions neutres, alcalines :



Les pipelines sont des éléments essentiel dans le transport des hydrocarbures, les conduites sont souvent exposées a la corrosion (interne et externe) ce qui provoque des pertes de métal et diminue leurs durée de vie.

II.2.2.1. Perte de métal des pipelines (corrosion)

II.2.2.1.1. Corrosion interne

Elle est provoquée par l'attaque chimique de la surface interne de la conduite. Ce type de corrosion est favorisé par la présence de sulfure d'hydrogène H_2S et dioxyde de carbone CO_2 dans le gaz et la présence des bactéries sulfato-réductrices BSR dans l'oléoduc.

(Figure 2.4). [9].



Figure.II.4. Pertes de métal dues à la corrosion interne

La protection des pipelines contre la corrosion interne se fait principalement par injection d'inhibiteurs de corrosion et des biocides sans oublier la couche de peinture exécutée en usines.

➤ Conséquence

Plus difficile à détecter par l'extérieur que les autres types de défauts, et à résoudre, la corrosion interne peut avoir des conséquences graves. Elle peut être extrêmement rapide comme par exemple dans le cas d'attaque par des bactéries sulfurogènes.

➤ Causes

Les causes en sont surtout la présence de CO_2 , d'acides organiques, parfois d' H_2S et des bactéries. L'utilisation des alliages résistants à ce type de corrosion est généralement réservée aux tubings de puits.

II.2.2.1.2. Corrosion externe

Provoques par des phénomènes de type chimique et électrochimique. Favorise par des défauts de protection passive (Revêtement) et Active (Protection Cathodique). (Figure 2.3).

Les principaux facteurs favorisant ce type de corrosion sont :

- Les défauts de revêtement de la conduite ;
- Les insuffisances du système de protection cathodique;
- L'agressivité du sol (sol de faible résistivité électrique) [10].



Figure.II.5. Pertes de métal dues à la corrosion externe

La protection des pipelines contre la corrosion externe se fait par protections active (protection cathodique) et passive (revêtement).

➤ Conséquences

Elles sont multiples et peuvent aller jusqu'au percement en très peu de temps (quelques mois) et avoir des conséquences dramatiques pour l'environnement.

➤ Causes

Mis à part les causes exogènes (acidité des terrains, courants vagabonds, etc.), elles sont imputables à des défauts de revêtement (protection passive) et/ou à une protection cathodique (protection active) défailante ainsi qu'à des états de stress mécanique de la conduite (corrosion sous contraintes).

II.3. Les Formes De Corrosion

Les formes de corrosion ont été classées selon leurs modes d'identification en trois groupes

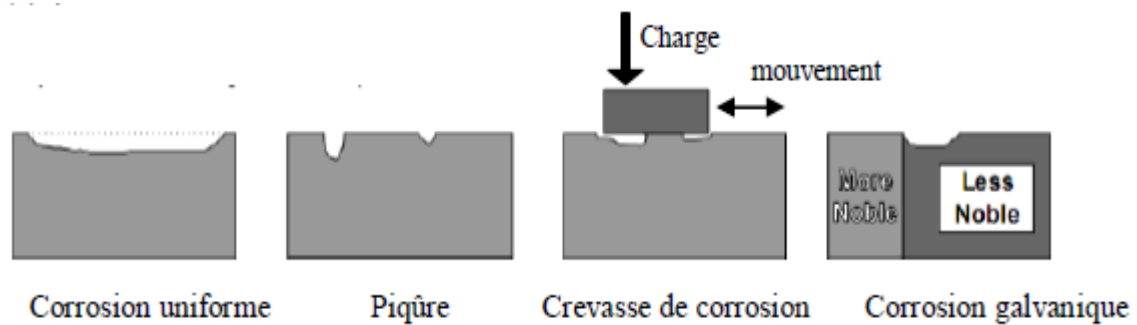
Figure.II.4:

Groupe I : aisément identifiable par un examen visuel (**Figure.II.4 (a)**).

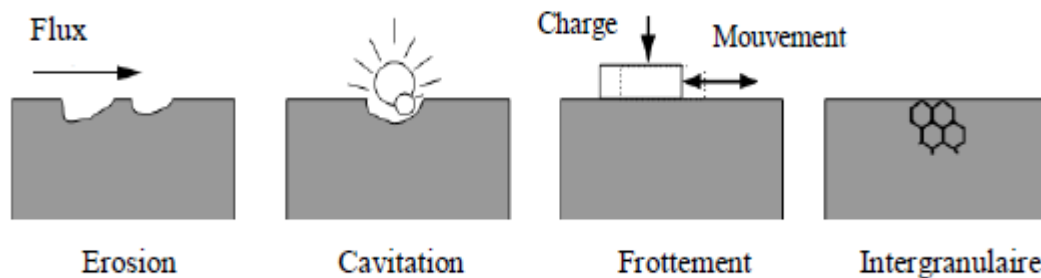
Groupe II : identifiable par des moyens supplémentaires d'examen (**Figure.II.4 (b)**).

Groupe III : une vérification est exigée par la microscopie (optique, électronique)

(**Figure.II.4 (c)**) [11].



(a) Les formes de corrosion identifiables par un examen visuel.



(b) Les formes de corrosion identifiables par des moyens supplémentaires d'examen.

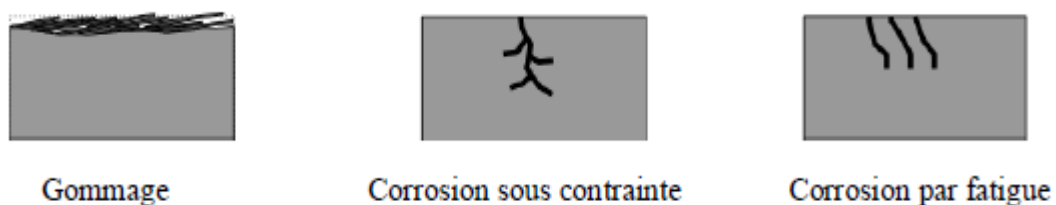


Figure.II.6. Formes principales de corrosion regroupées par leur facilité d'identification.

II.3.1. La Corrosion Uniforme

La corrosion uniforme est caractérisée par un taux de corrosion relativement uniforme sur l'ensemble d'une surface exposée. Ce type de corrosion est habituellement prévu pour les pièces faisant partie d'élément structural qui peuvent être sacrifiés au fil du temps, mais elle affecte tous les métaux communs. Dans le cas des aciers au carbone, le fer réagit avec l'oxygène pour former de la magnétite minérale, qui est de l'oxyde de fer dont la formule chimique est Fe_3O_4 .

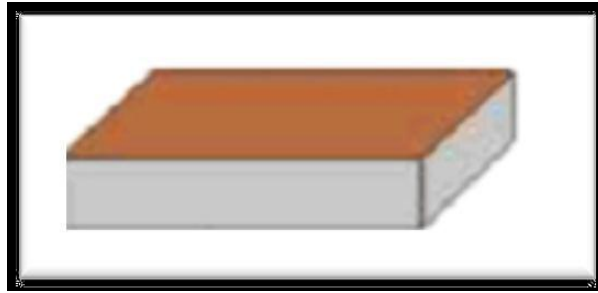


Figure.II.7. Corrosion Uniforme

II.3.2. La corrosion localisée

C'est une corrosion qui se déroule en un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elle diffère de la corrosion uniforme car on distingue clairement les endroits anodiques et cathodiques. En pratique, la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement. La corrosion localisée survient sur une partie du métal à un taux bien supérieur au reste de la surface; elle peut avoir plusieurs formes. Ce phénomène est très important. Beaucoup de problèmes de corrosion surviennent bien qu'on ait choisi un métal qui convienne pour milieu donné dans lequel d'habitude il ne se corrode pas mais où il peut quand même être sujet à la corrosion localisée

Différents types de mécanismes de corrosion localisée existent :

➤ Corrosion Par Piqures

C'est une forme de corrosion localisée produite par certains anions, notamment les halogènes et plus particulièrement les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre.

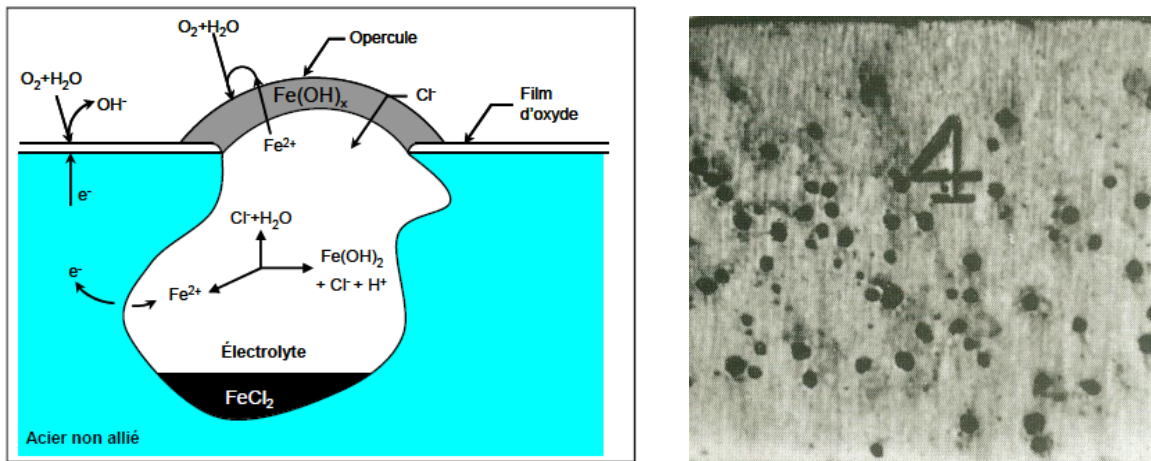


Figure.II.8. Corrosion par Piqures

➤ **Corrosion Galvanique**

Elle est due à un contact entre des matériaux de nature différente exposés au même milieu conducteur appelé électrolyte. Cette situation est appelée "couplage galvanique", la corrosion galvanique fonctionne comme une pile qui constituée de deux électrodes plongeant dans une solution électrolyte qui est en général une solution diluée d'acide.

Les deux électrodes sont reliées extérieurement par un circuit électrique qui assure la circulation des électrons.

Les conditions de cette corrosion :

- Métaux de nature différente (potentiel différent).
- Présence d'un électrolyte.
- Continuité électrique entre les deux métaux

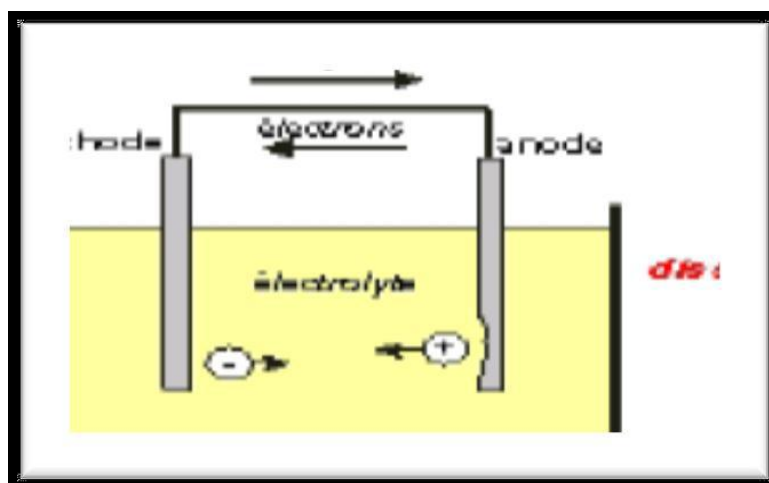


Figure.II.9. Corrosion Galvanique

➤ Corrosion Caverneuse

Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène.

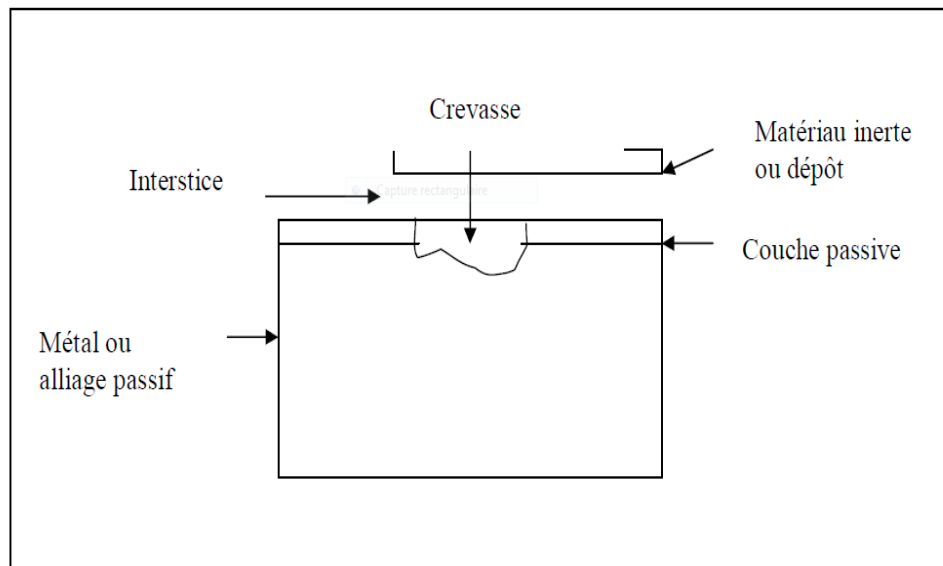


Figure.II.10. corrosion caverneuse

➤ Corrosion Inter Granulaire

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

En effet, les points de jonctions constituent, des zones désordonnées par rapport au réseau cristallographique plus régulier des grains. Ils admettent de ce fait de nombreux défauts de structures (lacunes, dislocation), favorables à la précipitation de phases intermétallique ou de composés métalliques tels que les carbures, ainsi qu'à la ségrégation d'impureté en solution solide. Sous prétexte, qu'ils sont chimiquement plus actifs, ils constituent une cible vulnérable lorsqu'ils sont exposés dans un milieu corrosif. A titre d'exemple ; on rencontre cette forme de corrosion dans les aciers inoxydables.

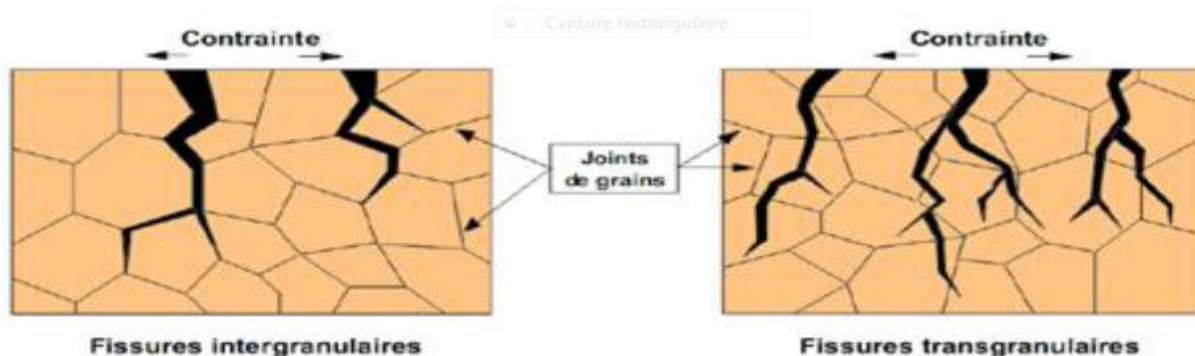


Figure II.11. Corrosion inter granulaire d'un acier inoxydable.

➤ Corrosion Sous-Contrainte

C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action conjointe d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique.

La corrosion sous contrainte est caractérisée par un temps d'incubation. Plus la contrainte est élevée, plus le temps d'incubation est court. Les fissures s'amorcent ensuite et se propagent alors d'une façon relativement rapide.

Les fissures sont initiées par des défauts de surface, elles peuvent être inter granulaires ou transgranulaires, simples ou branchées suivant l'environnement et la structure du métal. Leur propagation est perpendiculaire à la direction de la contrainte. La corrosion sous contrainte est influencée par certains facteurs métallurgiques

- Composition du métal
- Orientation des grains
- Composition et répartition des précipités
- Dislocations, traitement thermique

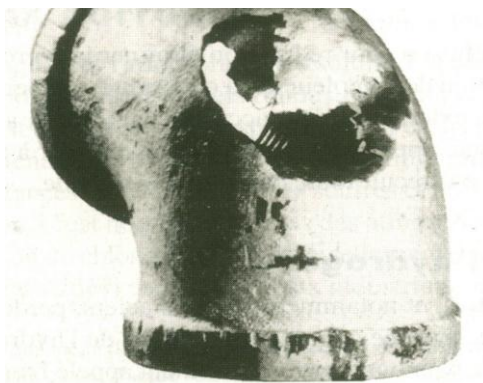


Figure.II.12. Corrosion sous contrainte

➤ Corrosion-érosion

La corrosion-érosion se produit lorsque le débit de l'eau se combine à la corrosion pour augmenter considérablement la vitesse d'enlèvement du métal par rapport à la vitesse d'enlèvement à des débits plus faibles. L'effet du débit est dû à l'enlèvement des ions métalliques et des couches protectrices à mesure qu'ils se forment, ce qui accroît la force d'entraînement de corrosion chimique et peut empêcher la formation d'une couche protectrice. Cet effet est l'une des principales causes de perte de métal dans les tubes des condensateurs de vapeur en alliage de cuivre. Les particules fines et d'autres particules issues des produits de corrosion comme le sable et le limon dans le fluide de refroidissement peuvent également accroître la vitesse de corrosion.

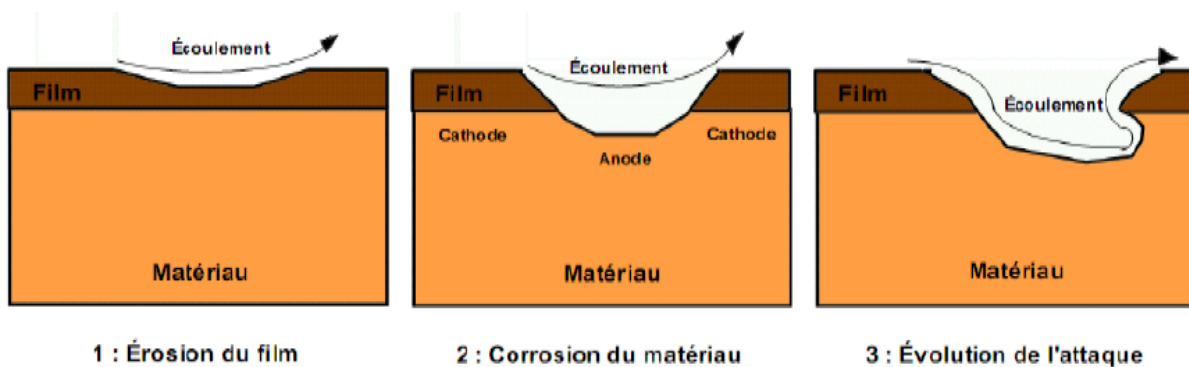


Figure II.13. Représentation schématique du phénomène de corrosion érosion.

➤ Fatigue-corrosion

La corrosion dans les conditions de charges cycliques est la réduction considérable de la résistance à la fatigue du métal considéré. Dans ce cas, la courbe de fatigue peut ne pas présenter de limite d'endurance et diminuer vers les très faibles contraintes de façon monotone; cette diminution est due à l'effet combiné des facteurs électrochimiques et des facteurs mécaniques.

➤ Corrosion électriques ou corrosion par les courants vagabonds (courants parasites)

Si un courant électrique continu peut avoir pour effet de protéger cathodiquement une structure lorsqu'il circule dans un sens convenable, il peut provoquer sa corrosion lorsqu'il circule dans le sens opposé. Mais en général, les courants vagabonds se propagent dans le sol où les liquides selon un chemin autre que celui prévu. Donc, ils peuvent entrer dans une structure conductrice enterrée ou immergée puis en ressortir plus loin, provoquant une

corrosion par dissolution anodique. Ces courants circulant de façon non maîtrisée, sont variables en direction et en intensité et pour cette raison, ils ont reçu la nomination de courants vagabonds.

➤ **La corrosion bactérienne**

La biocorrosion, appelée encore corrosion bactérienne, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement. Lorsque les colonies de microorganismes se fixent à la surface du matériau (figure I.19), elles créent ce que l'on appelle alors un biofilm.

La présence de microorganismes est susceptible de modifier l'une de ces réactions cathodiques ou anodiques, et par là même d'accélérer la corrosion du matériau. L'action des bactéries est donc ici purement électrochimique, et ne correspond pas à une nouvelle forme de corrosion mais à la modification de la cinétique d'une corrosion existante ou à l'apparition d'une corrosion par la modification des conditions de fonctionnement du système.

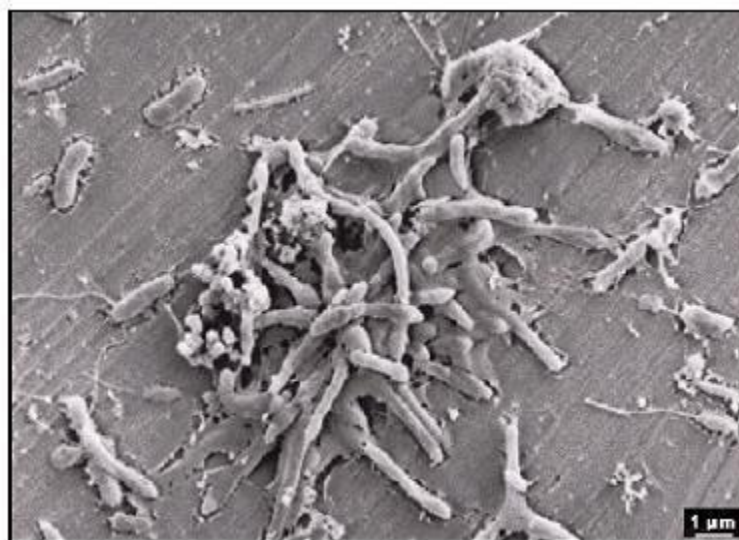


Figure II.14. Colonie de bactéries sur un acier

II.4. Modèle de corrosion [12]

Les modèles prédictifs de corrosion de l'acier sont très utiles pour les concepteurs d'ouvrages, mais aussi pour les gestionnaires de patrimoine afin de planifier la maintenance dans le temps et pour interpréter les mesures réalisées en vue de réévaluer le niveau de performance des structures.

Un recensement non exhaustif des modèles de corrosion existants dans la littérature est présenté ci-après. Il repose essentiellement sur les inventaires des modèles de corrosion (généralisée) de l'acier, dressés par Melchers [13]. Les modèles sont classifiés en trois groupes :

- Les modèles empiriques ;
- Les modèles physico-chimiques ;
- Les modèles phénoménologiques.

Remarque : Dans notre travail on va se focaliser juste sur les modèles empiriques.

II.4.1. Modèles empiriques

II.4.1.1. Modèles linéaires

Les modèles conventionnels conduisent à une relation linéaire entre la perte d'épaisseur de métal et le temps.

$$d(t) = a \times t \quad (2.1)$$

Avec :

$d(t)$: perte d'épaisseur de métal au temps t (mm)

a : vitesse de corrosion (mm/an)

t : temps (années)

A partir de données empiriques, différents auteurs ont montré que la perte d'épaisseur du métal augmente de manière non linéaire [14,15]; par conséquent, un modèle non linéaire semble plus approprié.

Un des modèles empiriques les plus répandus est celui de Southwell et Alexanre. Il a été établi à partir de données de corrosion à long terme collectées dans des eaux tropicales [14,16].

Deux modèles ont été définis:

➤ *un modèle linéaire:*

$$d(t) = 0.076 + 0.038t \quad (2.2)$$

➤ *un modèle bi-linéaire:*

$$\begin{aligned} d(t) &= 0.09t & 0 \leq t < 1.46\text{ans} \\ d(t) &= 0.076 + 0.038t & 1.46\text{ans} \leq t < 16\text{ans} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Melchers a proposé une amélioration des modèles de Southwell en intégrant l'aspect probabiliste [17], ce qui conduit aux deux modèles suivants:

➤ **Un modèle linéaire:**

$$\begin{aligned} \mu_d(t) &= 0.076 + 0.038t \\ \sigma_d(t) &= 0.051 + 0.025t \end{aligned} \quad (2.4)$$

➤ **un modèle bi-linéaire:**

$$\begin{aligned} \mu_d(t) &= 0.09t & 0 \leq t < 1.46 \text{ ans} \\ \mu_d(t) &= 0.076 + 0.038t & 1.46 \leq t < 16 \text{ ans} \\ \sigma_d(t) &= 0.062t & 0 \leq t < 1.46 \text{ ans} \\ \sigma_d(t) &= 0.035 + 0.017t & 1.46 \leq t < 16 \text{ ans} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Avec:

$\mu_d(t)$: Perte d'épaisseur moyenne de métal au temps t (mm)

$\sigma_d(t)$: Écart type de la perte d'épaisseur de métal au temps t (mm)

Melchers a même suggéré un modèle tri-linéaire [18]:

$$\begin{aligned}
 d(t) &= 0.17t & 0 \leq t \leq 1 \text{ans} \\
 d(t) &= 0.152 + 0.0186t & 1 \leq t < 8 \text{ans} \\
 d(t) &= -0.364 + 0.038t & 8 \leq t < 16 \text{ans}
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

II.4.1.2. Modèles puissances

Plusieurs auteurs ont utilisés des modèles puissances pour représenter l'évolution de la perte d'épaisseur due à la corrosion dans le temps.

$$d(t) = a \cdot t^b \tag{2.7}$$

$d(t)$: perte d'épaisseur au temps t (mm)

a et b : coefficients obtenus à partir des données empiriques.

Melchers et Southwell ont proposé le modèle puissance suivant :

$$\begin{aligned}
 \mu_d(t) &= 0.084 \cdot t^{0.0823} \\
 \sigma_d(t) &= 0.056 \cdot t^{0.823}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

Avec:

$\mu_d(t)$: perte d'épaisseur moyenne de métal au temps t (mm)

$\sigma_d(t)$: écart type de la perte d'épaisseur de métal au temps t (mm)

t : temps (années)

Les résultats obtenus à l'aide du modèle de Melchers et de southwell montrent qu'après 2 à 5 années d'exposition, la vitesse de corrosion diminue. A l'inverse, la variabilité du phénomène augmente dans le temps.

Melchers a également proposé un autre modèle puissance pour représenter la perte d'épaisseur d'acier due à la corrosion dans la zone de marnage à partir des données collectées dans la littérature depuis 1994 [19]:

$$d(t) = 0.1207 \cdot t^{0.6257} \quad (2.9)$$

Pour la corrosion atmosphérique, des recherches étendues ont été effectuées dans le but de dériver les modèles empiriques qui sont valides pour différentes conditions environnementales. La plupart des équations empiriques pour la profondeur de la corrosion sont de la forme générique :

$$d_{UC}(t) = \alpha_{UC} \cdot T^{\beta_{UC}} \quad (2.10)$$

α_{UC} , β_{UC} : Sont des fonctions des différents facteurs d'influence, tels que la période de l'humidité, de l'hygrométrie, de la température, de l'anhydride sulfureux (SO₂) et de la concentration en chlorure dans l'environnement.

II.4.1.3. Modèles de Guedes Soares et Garbatov

Le modèle proposé par Guedes Soares et Garbatov comporte trois phases [20]:

- La première phase durant laquelle la corrosion est inactive à cause de l'efficacité du système de protection ;
- La deuxième phase débute quand le système de protection est endommagé et correspond à l'amorçage de la corrosion qui se traduit par une diminution de l'épaisseur de métal dans le temps ;
- La troisième phase correspondant à un ralentissement, puis une stabilisation de la corrosion.

La vitesse de corrosion devient alors quasi nulle. Ceci est dû à la protection apportée par les produits de corrosion formés à la surface du métal contre l'agressivité du milieu environnant.

La suppression de cette couche protectrice par nettoyage ou par abrasion a pour effet de réactiver la corrosion.

Le modèle de Guedes Soares et Garbatov prend la forme générale suivante:

$$d(t) = d_{\infty}(1 - e^{-t/\tau_t}) \quad (2.11)$$

La solution particulière s'écrit :

$$\begin{aligned}
 d(t) &= 0 & t \leq \tau_c \\
 d(t) &= d_\infty \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_c}\right)/\tau_t}\right) & t > \tau_c
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

Avec :

τ_t : est le temps de transition, défini à partir de la formule suivante :

$$\tau_t = \frac{d_\infty}{\tan \alpha}
 \tag{2.13}$$

α : angle défini

$d(t)$: perte d'épaisseur au temps t (mm)

d_∞ : Perte d'épaisseur à long terme (mm)

τ_c :Durée de vie du revêtement, intervalle de temps entre l'application de la peinture et sa perte d'efficacité (année).

II.4.1.4. Modèles de Paik

Afin de tenir compte des facteurs qui influencent la corrosion des structures (entretien, fréquence de nettoyage, température, humidité, gaz dissous, etc), Paik a proposé un modèle de corrosion qui tient compte de la localisation et de la catégorie des éléments structurels des navires [21,22]. Le modèle de Paik comporte trois phases:

- La première phase correspond à la période d'efficacité du système de protection ;
- La deuxième phase est une période de transition ou d'amorçage de la corrosion ;
- La troisième phase représente la progression de la corrosion.

La durée de vie des revêtements est généralement probabiliste à l'aide d'une loi lognormale [21,22] :

$$f(t_c) = \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(\ln T_c - \mu_c)^2}{2\sigma_c^2} \right\}
 \tag{2.14}$$

Avec :

$f(t_c)$: Densité de probabilité de la durée de vie du système de protection T_c (années)

μ_c : Moyenne de $\ln T_c$ (année)

σ_c : Écart type de $\ln T_c$ (année)

La phase de transition débute lorsque l'efficacité du revêtement est nulle. Le temps de transition peut être considéré comme une variable aléatoire qui suit une distribution exponentielle. Dans un premier temps, Paik fait l'hypothèse que la corrosion démarre immédiatement après la perte d'efficacité du revêtement de la même manière que le modèle de Guedes Soares et Garbatov.

La phase de progression de la corrosion s'exprime par :

$$d(t) = C_1(t - T_c)^{C_2} \quad (2.15)$$

Avec :

$d(t)$: la fonction de perte d'épaisseur (mm) ;

T_c : Durée de vie du système de protection (années) ;

t : et le temps en années ;

C_1, C_2 : les paramètres d'évolution de la corrosion du modèle.

Lors des applications de son modèle, Paik prend un coefficient $C_2=1$ ce qui revient à un modèle linéaire avec une vitesse constante dans le temps :

$$d(t) = C_1(t - T_c) \quad (2.16)$$

II.4.1.5. Modèles de Qin et Cui

Les modèles empiriques développés par Southwell et Melchers ne prennent pas en considération les systèmes de protection contre la corrosion, à l'inverse de ceux proposés par Guedes Soares et Paik. Cependant ces modèles reposent sur l'hypothèse que la corrosion démarre seulement après la perte totale d'efficacité du système. Le modèle développé par Qin et Cui [23] intègre une initiation de la corrosion sous forme de piqûre dès que le revêtement

commence à se dégrader. Lorsque le système perd totalement son efficacité, la corrosion devient alors généralisée [24,25].

Qin et Cui proposent de décrire l'évolution de la vitesse de corrosion dans le temps à l'aide d'une loi de Weibull.

$$\begin{aligned}
 r(t) &= 0 & 0 \leq t \leq T_{st} \\
 r(t) &= d_{\infty} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-T_{st}}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t-T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} \right\} & T_{st} \leq t \leq T_L
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Avec :

T_{st} : Temps de début de dégradation du système de protection ;

T_{cl} : Temps de fin de vie du système de protection ;

T_A : Temps où la vitesse de corrosion est maximale (année). T_A est différent de T_{cl} , cependant par simplification, les auteurs considèrent T_A est égal à T_{cl} ;

T_L : Temps de fin de vie de la structure ou temps au-delà duquel les actions de maintenance ne sont plus programmées ;

$r(t)$: vitesse de corrosion (mm/an) ;

$d_{\infty}, \beta, \eta, T_{st}$: paramètres du modèle à déterminer .

La vitesse de corrosion est maximale au temps T_A :

$$\begin{aligned}
 T_A &= T_{cl} = T_{st} + \eta \left(\frac{\beta-1}{\beta} \right)^{1/\beta} & \text{Pour } \beta > 1 \\
 T_A &= T_{st} & \text{Pour } \beta \leq 1
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Sa valeur est donnée par:

$$\begin{aligned}
 r_{max} &= d_{\infty} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{\beta-1}{\beta} \right)^{(\beta-1)/\beta} \exp \left(\frac{\beta-1}{\beta} \right) & \text{Pour } \beta > 1 \\
 r_{max} &= d_{\infty} \frac{\beta}{\eta} & \text{Pour } \beta = 1 \\
 r_{max} &\rightarrow \infty & \text{Pour } \beta < 1
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

L'évolution dans le temps de la perte d'épaisseur de métal due à la corrosion peut alors être calculée selon l'expression suivante:

$$d(t) = 0 \quad 0 \leq t \leq T_{st} \quad (2.20)$$

$$d(t) = d_{\infty} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} \right] \right\} \quad T_{st} \leq t \leq T_L$$

Le modèle proposé est flexible et présente l'avantage de pouvoir décrire différents modèles de corrosion en utilisant un format unique. En effet, la plupart des modèles existants sont des cas particuliers du modèle proposé par Qin et Cui.

Lorsque $k=1$, l'équation correspond au modèle proposé par Guedes Soares et Garbatov :

$$d(t) = d_{\infty} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - T_{st}}{\eta} \right) \right] \right\} \quad (2.21)$$

Lorsque $\eta = 1$, le développement en série de Taylor au voisinage de 0 à l'ordre 1 de la fonction permet d'aboutir au modèle de la corrosion proposé par Paik :

$$d(t) = d_{\infty} \left(\frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} = d_{\infty} (t - T_{st})^{\beta} \quad (2.22)$$

Lorsque $d_{\infty}=0.1207$, $T_{st}=0$, $\eta = 0.6257$, alors le modèle correspond au modèle puissance proposé par Melchers.

II.5. Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous avons parlé sur les modèles de dégradation ainsi leurs deux grandes classes, modèle de dégradation discrète et continu. Ensuite on s'est focalisé sur le modèle de dégradation par corrosion et les effets qu'ils engendrent sur les pipelines qui sont généralement les pertes de métal (interne et externe), puis nous avons expliqué le phénomène de la corrosion et ses différentes forme.

Enfin, on a terminé avec les différents modèles de corrosion où on a basé beaucoup plus sur les modèles empiriques.

Chapitre III

Stratégie d'inspection

III.1. Introduction

L'objectif principal de toute entreprise consiste à maximiser les bénéfices et minimiser les pertes et surtout prendre en considération le critère de sécurité. Ainsi, les stratégies d'inspection (périodique et séquentielle) s'orientent vers les réductions des coûts des actions de maintenance et/ou l'amélioration de la disponibilité du système.

Pour que les politiques de maintenance soient efficaces, il est essentiel de construire des modèles qui reflètent le comportement réel du système et de son environnement, pour cela, la considération des effets des actions de maintenance sur le système est le développement des méthodes pour la quantification de ces effets sur une nécessité absolue.

III.2. Politique d'inspection

Selon la norme NF EN 13306 [1], une inspection est un « contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien ».

L'objectif de la politique d'inspection est donc de rechercher le meilleur compromis entre des exigences contradictoires de coût et de fiabilité. Le plan de l'inspection optimal est celui qui garantit la meilleure fiabilité/disponibilité, au moindre coût d'intervention.

En général, l'inspection peut être réalisée avant, pendant ou après d'autres activités de maintenance. En d'autres termes, les inspections sont nécessaires pour contrôler la dégradation du système de production et/ou son état de fonctionnement. Dans la littérature, on distingue deux familles de stratégies d'inspection : (1) les stratégies d'inspection périodique, est adaptées particulièrement aux systèmes complexes, qui ne peuvent être inspectés à n'importe quel moment. Et (2) les stratégies d'inspection séquentielle sont adaptées aux systèmes moins complexes qui peuvent être inspectés plus facilement et permettent une grande liberté pour la planification des inspections.

Plusieurs classifications de politiques d'inspection existent. Chouikhi [26] a proposé de classer les politiques selon le critère d'optimisation, qui peut être un critère de coût, critère de disponibilité ou un critère de sécurité.

III.2.1 Les stratégies d'inspection

III.2.1.1. Stratégie d'inspection périodique

Le système est inspecté périodiquement (la durée entre deux inspections consécutives est constante), On effectue une maintenance préventive lorsque le niveau de dégradation atteint un seuil d'alarme S , et une maintenance corrective si le niveau de dégradation atteint le seuil critique L . On se retrouve alors face à un problème d'optimisation à deux dimensions. Dans ce cas, On effectue périodiquement des inspections afin de rester que dans le seuil de la maintenance préventive. Bérenguer et al. [27] ont proposé un modèle de surveillance continue et de réparation parfaite pour déterminer le seuil de maintenance préventive afin de minimiser l'indisponibilité du système. Ils ont également considéré dans leur modèle que le délai et la durée de la maintenance sont aléatoires.

En 2002, Jia et Christer [28] ont présenté une extension de la politique d'inspection périodique à deux pas. La date de la première inspection après maintenance est τ_1 et la périodicité des inspections suivantes est τ . Parmi les avantages de cette politique qu'elle prend en compte le niveau de dégradation.

III.2.1.2. Stratégie d'inspection séquentielle (non périodique)

Le système est inspecté avec une stratégie non périodique (la durée entre deux inspections consécutives est variable)

Si la dégradation est uniforme, il devient donc plus intéressant d'adapter l'intervalle d'inspection en fonction de niveau de dégradation observé. Ceci permet de limiter le nombre d'inspection pour des états peu dégradés et d'ajuster au plus près un éventuel remplacement préventif. Jia et Christer [28] ont proposé une politique d'inspection non périodique pour laquelle les inspections sont effectuées à chaque instant T_n défini par :

$$T_n = T_{n-1} + I(D(T_n)) \quad (3.1)$$

Avec :

$I(D(T_n))$: est la fonction d'inter-inspection qui est décroissante en fonction de niveau de dégradation du système observé à l' instant T_n .

III.3. Critère d'optimisation de maintenance

III.3.1. Critère de disponibilité

Dans la littérature, plusieurs travaux sont dédiés aux stratégies d'inspection/maintenance ayant comme objectif de maximiser la disponibilité du système. Des solutions numériques ont été présentées dans le cas d'une panne qui suit une loi normale ou de Weibull. Sarkar et Sarkar [29] ont étudié la disponibilité d'un système inspecté périodiquement et soumis à une réparation parfaite dont le temps est non négligeable. Dans cette étude, la période optimale d'inter-inspection a été évaluée pour maximiser la disponibilité stationnaire du système dans le cas où la durée de vie du système suit une loi gamma ou exponentielle.

Cui et Xie [30] ont étudié la disponibilité d'un système pour les inspections périodiques. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus dans la méthode de Sarkar et Sarkar [29]. Liao et al [31] ont proposé une stratégie de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue contrôlé en temps réel. Cette stratégie de maintenance consiste à maximiser la disponibilité d'un système soumis à des actions de maintenance imparfaite. Liao et al [31] ont proposé un algorithme afin de déterminer le seuil optimal de maintenance préventive pour un système à dégradation modélisée par un processus gamma.

III.3.2. Critère de coût :

L'optimisation de la politique de maintenance est basé essentiellement sur un critère de coût, le but de ce critère est d'assurer les opérations de maintenance au coût optimal, il s'agit donc de trouver l'équilibre entre les deux maintenances (préventive et corrective) (Figure III.1) pour maximiser les effets positifs de la maintenance, tout en minimisant le coût global.

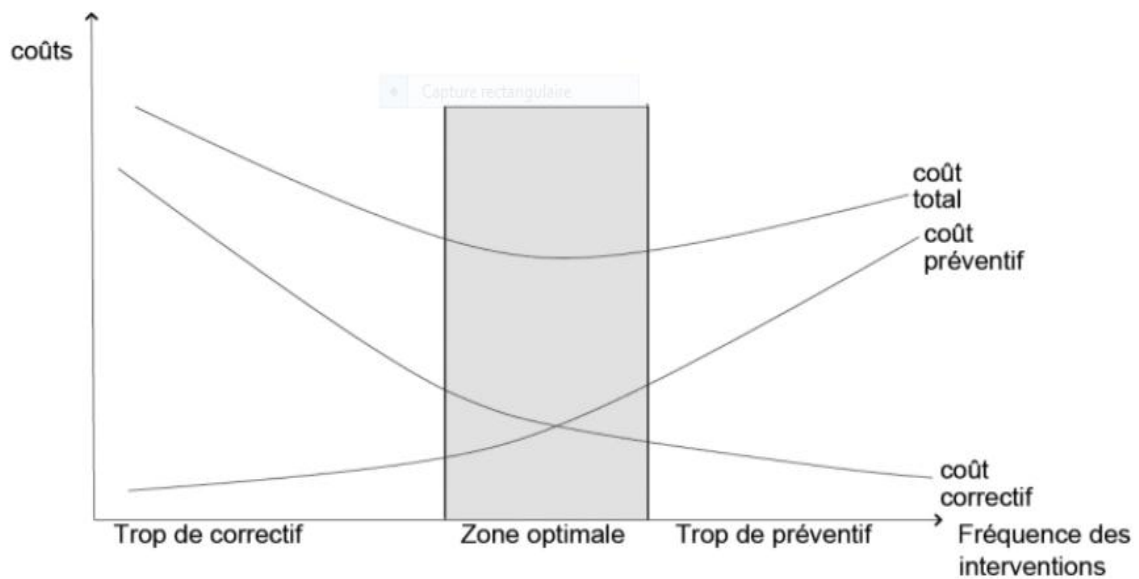


Figure III.1. Equilibre entre maintenance préventive et maintenance corrective

Depuis 1950, plusieurs travaux de recherche ont porté sur la modélisation de la maintenance dans le but de minimiser les coûts. On peut citer le travail par exemple, Wang [32] a examiné les principales stratégies de maintenance existant pour des systèmes à un ou plusieurs composants. La stratégie de maintenance type âge et la stratégie de maintenance type bloc

III.2.2.1. Les différents types des coûts de maintenance :

➤ Les coûts directs

Inhérents aux activités de maintenance (inspections, remplacements, réparation, etc.) se rapporter à :

- Coût de main-d'œuvre ;
- Coût de formation du personnel ;
- Coût de la pièce de rechange ;
- Coût d'équipement.

➤ Les coûts indirects

Entrainés par leurs conséquences (non productivité en raison de l'indisponibilité, remorquage, perte de cargaison, etc.) se rapporter à :

- de l'indisponibilité du système. En effet, l'arrêt (prévu ou non) d'une entité entraîne nécessairement un préjudice ;
- des coûts de non production ;
- un manque à gagner de production ;
- des pénalités commerciales ;
- un dommage à l'image de marque du produit ou de l'entreprise.

III.2.3. Critère de sécurité :

Dans les industries à risques, comme l'aéronautique ou le nucléaire, un dysfonctionnement peut avoir des conséquences catastrophiques. Les politiques de maintenance que l'on applique sur ces entités, soumises à des normes et à des réglementations (strict, sévère), visent avant tout à éviter que ces défaillances se produisent. Dans ce cadre, **la sécurité** sera bien évidemment le critère retenu [33].

III.3. Effets de la maintenance sur les systèmes

III.3.1. Modèle de base

Les modèles de maintenance dit « de base » représentent les trois cas extrême des effets de la maintenance sur les systèmes. Le premier model qui est appelé model de maintenance minimal considère que l'effet de la maintenance sur le système est nul, alors que le second model appelé model de la maintenance parfaite suppose que l'effet est maximal puisque il remet le système a son état neuf et le troisième model, appelé model de maintenance imparfaite quand les changements sont opérés sur le système nous dirons donc que ce dernier est dans un état meilleurs que vieux.

III.3.1.1. Le modèle de maintenance parfaite

Le modèle de maintenance parfaite considère que chaque maintenance remet le système à neuf. Le système après maintenance est donc aussi bon que neuf ou en anglais **As Good As New (AGAN)**. Les durées inter-défaillances, et donc inter-maintenances, sont alors indépendantes et de même loi. On montre facilement que cela implique que l'intensité de défaillance s'écrit:

$$\lambda_t = \lambda(t - T_{N_t}) \quad (3.2)$$

La **Figure III.2** représente une trajectoire de l'intensité de défaillance d'un système pour des maintenances **AGAN**. Les instants de défaillance sont les instants de saut de l'intensité. Après une maintenance, l'intensité repart de zéro parallèlement à la courbe d'intensité initiale.

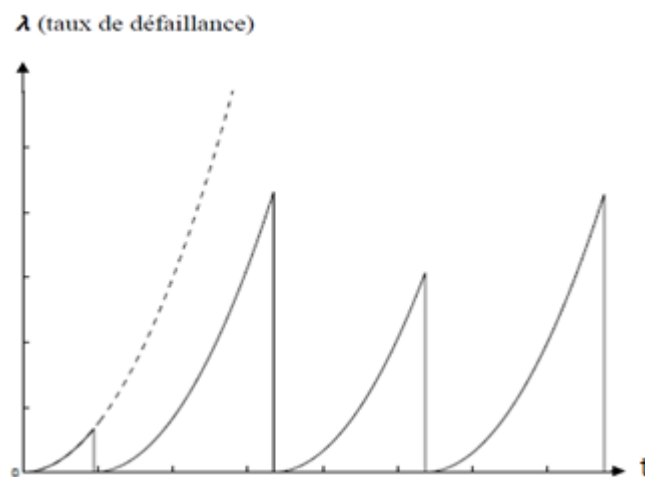


Figure III.2. Intensité de taux de défaillance dans le cas Maintenance parfaite.

Le processus aléatoire correspondant est appelé Processus de Renouvellement (**RP**). Le **HPP** est à la fois un **NHPP** et un **RP**. Un système dont le processus des défaillances est un **HPP** est donc à la fois **ABAO** et **AGAN**. Cela dénote une situation de fiabilité stable, ou le système ne vieillit pas et ou la maintenance se contente de le remettre en état de marche. Il est possible que le système soit **AGAN** et que le processus des défaillances ne soit pas un **HPP**: dans ce cas, les durées inter-défaillances sont indépendantes et de même loi, mais cette loi n'est pas exponentielle [34].

III.3.1.2. Modèles de maintenance imparfaite

Toute action permettant de ramener le système dans un état entre « as good as new » et « as bad as old ».elle est considérée comme un cas extrême englobant les deux cas extrêmes, la maintenance parfaite et la maintenance minimale.

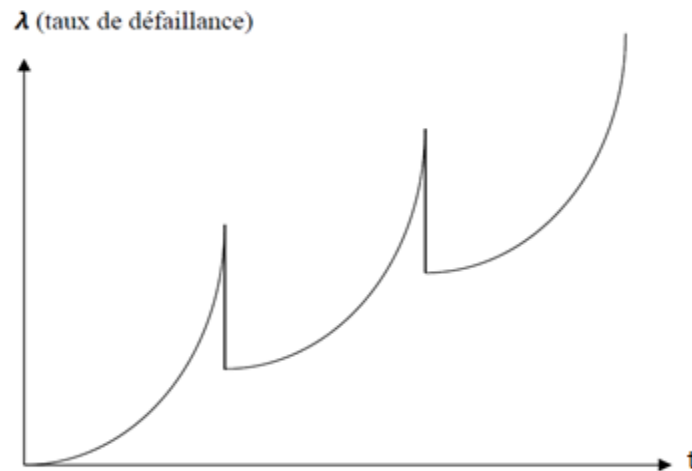


Figure III.3. Intensité de taux de défaillance dans le cas de Maintenance .imparfaite

Pour que la maintenance soit imparfaite sont :

- Réparer le mauvais composant (réparer un autre composant que celui qui est défaillant) réparer partiellement le composant défaillant.
 - Réparer (partiellement ou complètement) le composant défaillant tout en endommageant les composants adjacents.
 - Evaluer incorrectement l'état du composant inspecté.
- Les mauvaises maintenances peuvent être dues aux :

- défaut ou défaillance non détectées lors des opérations de maintenance.
- erreurs humaines telles que les faux ajustements ou les endommagements causés lors de la maintenance.
- remplacement avec de mauvais composant.

III.3.1.3. Modélisation de maintenance minimale

Le modèle de maintenance minimale suppose que l'action de maintenance remet le système, après l'intervention, à son état juste avant l'intervention. Dans ce cas, l'effet de la

maintenance est nul (maintenance ne dégrade pas et n'améliore pas le système). Le système après l'action de maintenance est dit aussi mauvais que vieux ("As bad As Old" (ABAO) la fonction d'intensité de défaillance du système dans le cas d'une maintenance ABAO ne dépend que du temps, elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) \quad (3.3)$$

Où $\lambda_0(t)$ ne représente la fonction d'intensité de défaillance initiale avant d'effectuer une action de maintenance [35].

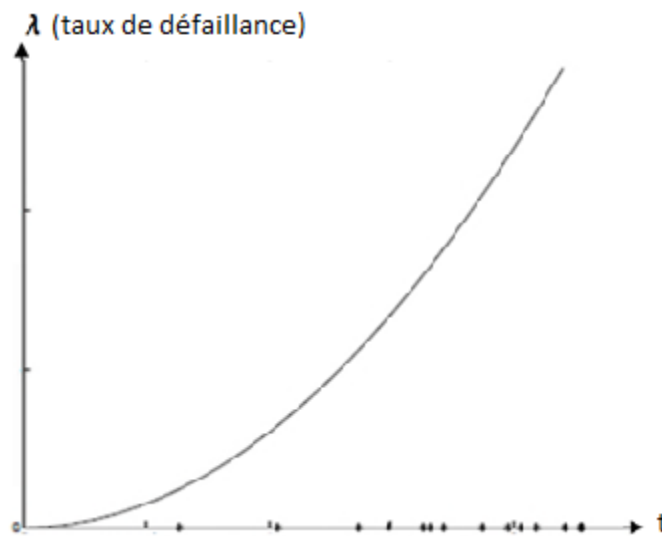


Figure III.4. Intensité de taux de défaillance dans le cas Maintenance minimale

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons conclu que le bon choix de la politique d'inspection est une nécessité pour la maintenabilité du système et l'amélioration de la disponibilité, donc l'objectif de la politique d'inspection est de rechercher le meilleur compromis entre des exigences contradictoires de coût et de fiabilité.

Nous avons aussi parlé sur les différents modèles de base de maintenance, et ces effets sur le système.

Chapitre IV

Evaluation de la dégradation du pipeline GG1 Soatrach

IV.1. Présentation générale de l'entreprise Sonatrach :

IV.1.1. Créations de la SONATRACH

Sonatrach « SPA », est une compagnie algérienne pour la recherche et l'exploitation minière, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures et de leurs dérivés.

Elle intervient également dans d'autres domaines tels que la génération électrique, les énergies nouvelles et renouvelables et le dessalement d'eau de mer. Elle exerce ses métiers en Algérie et partout dans le monde où des opportunités se présentent, elle emploie plus de 120 000 personnes dans l'ensemble du groupe.

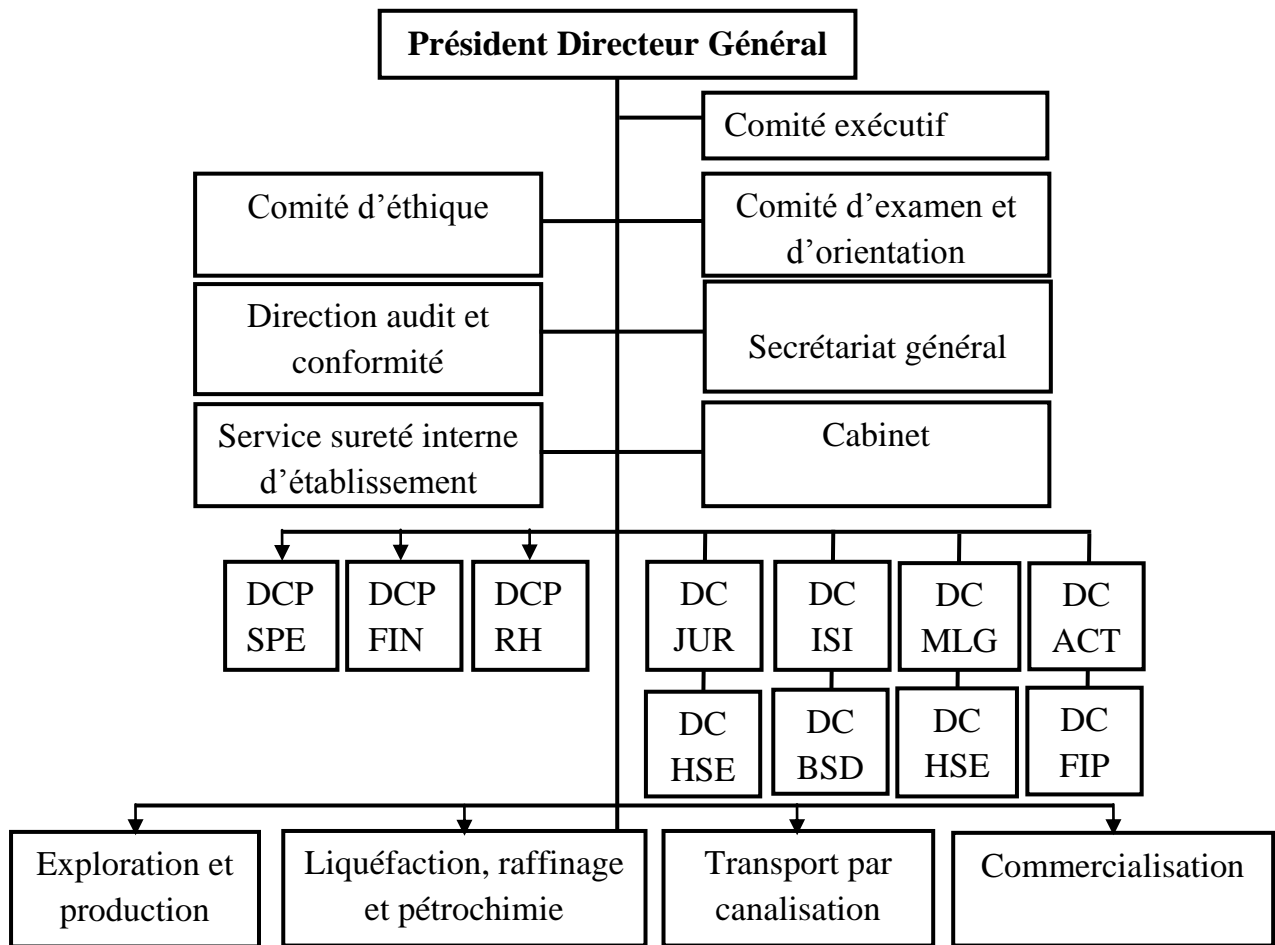
La Sonatrach, créée par décret N° 63/491 du 31 décembre 1963, dispose d'un capital social de 350 milliards de dinars entièrement et exclusivement Souscrit et libéré par l'État. Son activité a débuté le 01/01/1964.

Sonatrach, avec sa stratégie d'internationalisation, opère également dans plusieurs pays du monde tels que le Mali, le Niger, la Libye, l'Égypte, l'Espagne, l'Italie, le Portugal, la Grande Bretagne, le Pérou et les USA.

Sonatrach, avec ses chiffres d'affaires assez importantes, est classée comme suit

- 1^{ère} compagnie en Afrique ;
- 3^{ème} exportateur mondial de GPL ;
- 6^{ème} Compagnie Mondiale en matière de Gaz Naturel (réserves et production) ;
- 5^{ème} exportateur mondial de Gaz Naturel ;
- 4^{ème} exportateur mondial de Gaz Naturel Liquéfié (GNL) ;
- 12^{ème} dans le monde ;
- 13^{ème} Compagnie Mondiale concernant les hydrocarbures liquides (réserves et production).

IV.1.2. Organigramme de Sonatrach



Directions Corporels (DCP) :

- SPE : Stratégie, Planification & Économie.
- FIN : Finances.
- RHU : Ressources Humaines.

Directions Centrales (DC) :

- FIP : Filiales & participations.
- ACT : Activités Centrales.
- JUR : Juridique.
- ISI : Informatique & Système d'Information.
- MLG : Marchés et Logistique.
- HSE : Santé, sécurité & environnement.
- BSD : Business Développment.
- RDT : Recherche & Développement.

IV.1.3. Les principales Activités de la Sonatrach

Sonatrach exerce ses activités dans quatre principales Activités Opérationnelle à savoir :

- ♦ **L'Activité Exploration - Production (E&P)** : recouvre les métiers de recherche, d'exploration, de développement et de production des hydrocarbures ;
- ♦ **L'Activité Liquéfaction, Raffinage et Pétrochimie (LRP)** : en charge le développement et l'exploitation des complexes hydrocarbures (liquéfaction, raffinerie...);
- ♦ **L'Activité Transport par Canalisations (TRC)** : assure l'acheminement des différents hydrocarbures par canalisation ;
- ♦ **L'Activité Commercialisation (COM)** : a pour mission l'élaboration et l'application de la stratégie commerciales de Sonatrach sur le marché national et international.

IV.1.4. L'activité Transport par Canalisation «TRC»

L'Activité Transport par canalisation constitue le maillon intermédiaire entre l'Amont de l'activité pétrolière et gazière et les activités en Aval en matière de transformation, de traitement des hydrocarbures et leur commercialisation. Elle assure l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, condensat, gaz naturel & GPL). Qui a en charge le développement, la gestion et l'exploitation des réseaux de transport, de stockage et de livraison des hydrocarbures.

IV.1.5. Caractéristique de la ligne

Intitulé de l'ouvrage	GG1 Hassi R'mel - ISSER
Date de mise en service	Décembre 1981
Diamètre (")	42"
Epaisseur	11,91mm de Pk 0 au Pk 307 12,70 mm du Pk 307 au Pk 437 19,05 mm pour les points spéciaux
Nuance d'acier	X60 amélioré
Capacité (Cm ³ /an) avec écoulement libre	7×10 ⁹
Capacité (Cm ³ /an) avec compression	13×10 ⁹

IV.1.6. Ouvrages de la ligne GG1

➤ Deux terminaux

- Terminal départ ; situé à Hassi R'Mel, il se compose d'une gare d'envoi racleurs, d'une vanne de sectionnement (pour isoler la ligne en cas d'éclatement), d'un système de régulation, d'un système de comptage et d'un système d'envoi racleur.

- Terminal arrivé ; situé à Bordj Menaiel, comprend une gare racleur arrivée, une vanne de sectionnement, les équipements auxiliaires nécessaires aux opérations de réception racleurs et un poste de prélèvement (PP20) en 30" qui alimente Alger et la centrale de Cap Djanet.

➤ Postes de coupure

Au nombre de cinq (05), chaque poste comprend :

- Une chaîne de mesure de pression et de température ;
- Une gare racleur arrivée équipée d'une vanne 42" entrée GRA ;
- Une gare racleur départ équipée d'une vanne 42" sortie GRD ;
- Un réseau de mise à l'évent ;
- Un détecteur racleur entré GRA ;
- Un détecteur racleur sortie station ;
- By-pass poste (36") équipé d'une vanne et clapet de non-retour.

Les postes de coupures sont des futures stations de compression.

➤ Postes de sectionnements

Au nombre de six (06), situés chacun à l'intérieure d'une enceinte grillagée de 30x25m chaque poste comprend :

- Une vanne de sectionnement avec by-pass en 12" ;
- Un réseau de mise à l'évent ;
- Une chaîne de mesure de pression et de température.

Les postes de sectionnement ont été installés sur la ligne afin de limiter les pertes de fluides en cas de ruptures.

➤ Postes de prélèvement

Au nombre de 31 située chacun dans une enceinte grillagée de 30x25m, comprend :

- Une vanne de sectionnement ;
- Une chaîne de mesure de débit, pression et température.

➤ Postes de purge

Il existe trois (03) postes de purge ont été implantés à intervalles variables drainant ainsi le condensat.

➤ Station de compression

La station de compression (SC3) mise en service en date du 17 décembre 2007. Elle se compose d'un ensemble de turbocompresseurs, vannes motorisées, et autres équipements dont la finalité est d'augmenter le débit du gaz transporté via le gazoduc GG1.

La plus part des ouvrages concentrés de la ligne GG1 sont équipés par des équipements d'instrumentation et de télécommunication reliée au système SCADA pour la supervision et l'exploitation du gazoduc ; du terminal départ au terminal d'arrivé, à partir de salle de contrôle de BBM.

IV.1.7. Les conditions d'exploitation du GG1 sont :

- La pression maximale de refoulement 65bar
- La pression minimale de refoulement 55bar
- La pression minimale d'aspiration PMA station = 42bar
- La pression maximale sortie station de compression 65.5bar
- La pression minimale arrivé Bordj Menaiel égale à 55bar
- La pression minimale arrivé Bordj Menaiel égale à 55bar
- La pression contractuelle de livraison arrêtée dans la convention SH/ SONEGAS est :
 - Pression minimum : 45 bars
 - Pression maximum : 70 bars
- Le débit de la ligne : en fonction de la consommation des clients.

IV.2. Evaluation de la dégradation des réseaux de pipeline corrodés

Les pipelines sont exposés à plusieurs mécanismes de dégradation, la corrosion est l'une des modèles de dégradation structurale le plus courant pour les pipelines. Ce qui explique l'importance accordé à ce phénomène par l'entreprise (Sonatrach).

IV.2.1. Présentation de l'étude

Dans le but de faire une étude sur la dégradation du pipeline nous avons simulé le modèle de corrosion pour les 50 prochaine années, afin d'improviser les différentes défaillances à éviter, et les coûts à estimer pour toute cette périodes, pour cela nous avons implémenté un programme Matlab dans les principales étapes peuvent être résumé comme suite :

Étapes 1 : Introduire les paramètres du modèle

Étapes 2 : Générer les paramètres d'évolution de la corrosion du modèle sur 10000 générations

Étapes 3 : Classification des résultats selon la probabilité de l'événement

Étapes 4 : Calculer le coût total de maintenance

Étapes 5 : Varier les intervalles de temps d'inspection

IV.2.3. Principe de la démarche proposée

Dans ce travail, nous avons opté pour l'utilisation du modèle de corrosion proposé par Paik. Ce modèle donne l'évolution de perte d'épaisseur par corrosion en fonction du temps selon l'expression (2.15) suivante:

$$d(t) = C_1(t - T)^{C_2}$$

Avec :

$d(t)$: la fonction de perte d'épaisseur (mm) ;

T : Durée de vie du système de protection (5 ans) ;

t : est le temps en années [5,50] ;

C_1, C_2 : Les paramètres d'évolution de la corrosion du modèle.

C_1 suit une loi de Weibull de paramètre ($\beta = 1.1327$ et $\alpha = 0.1314$) et C_2 suit une loi normale de paramètre ($\mu=0.6$ et $\sigma=0.1$)

IV.3. résultats et discussion

IV.3.1. Cas réel (Données de l'entreprise)

➤ **Classification des résultats en fonction de perte d'épaisseur**

D'après les valeurs de $d(t)$ que nous avons obtenues dans l'étape 2, on les a classifiés selon trois catégories :

1. P1 : $d(t)$ inférieur à S
2. P2 : $d(t)$ entre S et L
3. P3 : $d(t)$ supérieur à L

Sachant que $S=0.7*e$ est le seuil d'alarme, $L=0.85*e$ est le seuil critique de dégradation, et $e=11.91\text{mm}$ est l'épaisseur du pipeline.

Le tableau ci-dessous est la représentation des résultats obtenu :

P T (années)	P1	P2	P3
5	10000	0	0
10	6762	91	3147
15	6537	104	3359
20	6439	79	3482
25	6355	89	3556
30	6278	106	3616
35	6236	93	3671
40	6186	94	3720
45	6137	107	3756
50	6107	101	3792

Tableau IV.1 : classification des résultats de $d(t)$

➤ **Calculer les probabilités de l'évènement**

T (années) \ P	Pi	Pp	Pc
5	1	0	0
10	0.6762	0.0091	0.3147
15	0.6537	0.0104	0.3359
20	0.6439	0.0079	0.3482
25	0.6355	0.0089	0.3556
30	0.6278	0.0106	0.3616
35	0.6236	0.0093	0.3671
40	0.6186	0.0094	0.3720
45	0.6137	0.0107	0.3756
50	0.6107	0.0101	0.3792

Tableau IV.2 : les probabilités de l'évènement en fonction du temps

Avec :
$$P_i = \frac{P_1}{10000} , \quad P_p = \frac{P_2}{10000} , \quad P_c = \frac{P_3}{10000}$$

Sachant que :

Pi : est la probabilité d'inspection ;

Pp : est la probabilité de la maintenance préventive ;

Pc : est la probabilité de la maintenance corrective.

➤ **Les résultats des coûts en fonctions de ΔT_1**

Dans cette situation, l'intervalle que nous avons considéré c'est celui adopté par l'entreprise et il est représenté comme suit :

$\Delta T_1 \in \{5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50\}$

Les résultats des coûts totaux par unité de temps obtenu, à l'aide du programme précédent, pour un coût d'inspection $C_i = 1227812.81$ \$, un coût de maintenance préventif $C_p = 6139064.05$ \$, un coût de maintenance corrective $C_c = 12278128.1$ \$, sont présentés dans le tableau (*Tableau IV.3.*).

ΔT_1 (années)	Coûts (\$) /an
5	24556,2562
10	95000,7884
15	99813,8146
20	102286,63
25	104020,301
30	105513,322
35	106601,164
40	107693,917
45	108617,232
50	109353,92

Tableau IV.3 : Variation des coûts en fonction de ΔT_1

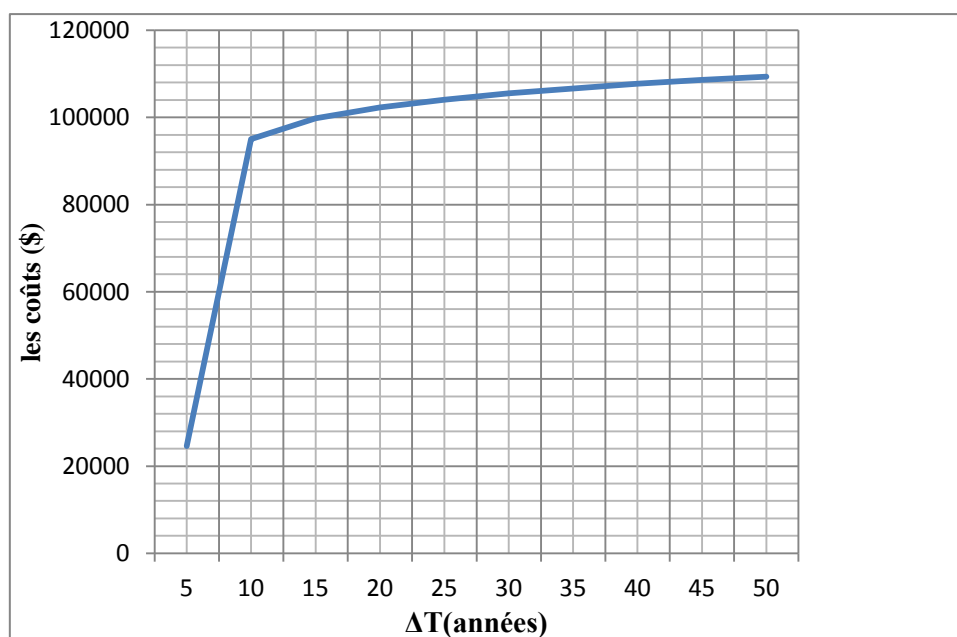


Figure IV.1. : Variation des coûts en fonction de ΔT_1

IV.3.2. Cas simulation

- **Etude de l'influence des différents intervalles de temps de vérification (ΔT) sur les coûts total par unité de temps de maintenance**

Dans cette situation, l'idée est de varier les intervalles d'inspection ΔT de temps, afin d'étudier l'influence de ces intervalles sur les coûts totaux de maintenance, pour cela nous avons considéré les 3 situations suivantes :

- **Situation1** : Dans ce cas, nous avons considéré l'intervalle d'inspection ΔT_2 comme suit (*Tableau IV.4.*) :

$$\Delta T_2 \in \{4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48, \}$$

- **Situation2** : Dans ce cas, nous avons considéré l'intervalle d'inspection ΔT_3 comme suit (*Tableau IV.5.*) :

$$\Delta T_3 \in \{7, 14, 21, 28, 35, 42, 49\}$$

- **Situation3** : Dans ce cas, nous avons considéré l'intervalle d'inspection ΔT_4 comme suit (*Tableau IV.6.*) :

$$\Delta T_4 \in \{10, 20, 30, 40, 50\}$$

➤ Situation1 :

ΔT_2 (années)	Coûts (\$) /an
4	24560
8	92750
12	97150
16	99680
20	101600
24	103210
28	104330
32	105330
36	106130
40	106780
44	107400
48	108050

Tableau IV.4. : Variation des coûts en fonction de ΔT_2

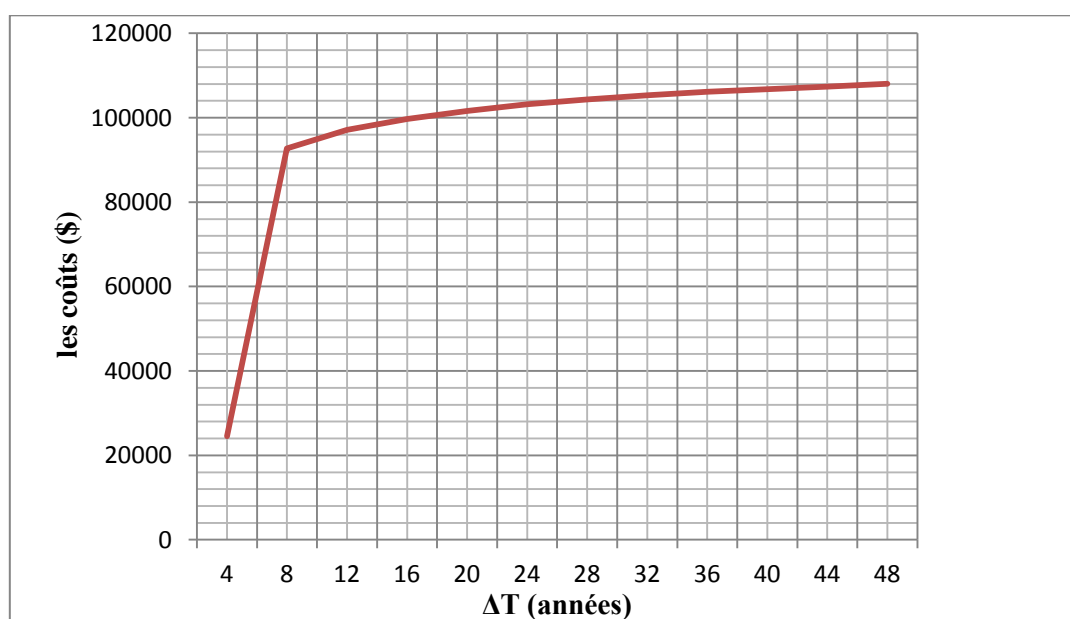


Figure IV.2. : Variation des coûts en fonction de ΔT_2

➤ Situation2:

ΔT_3 (années)	Coûts (\$) /an
7	24560
14	97250
21	101930
28	104320
35	106200
42	107790
49	108850

Tableau IV.5. : Variation des coûts en fonction de ΔT_3

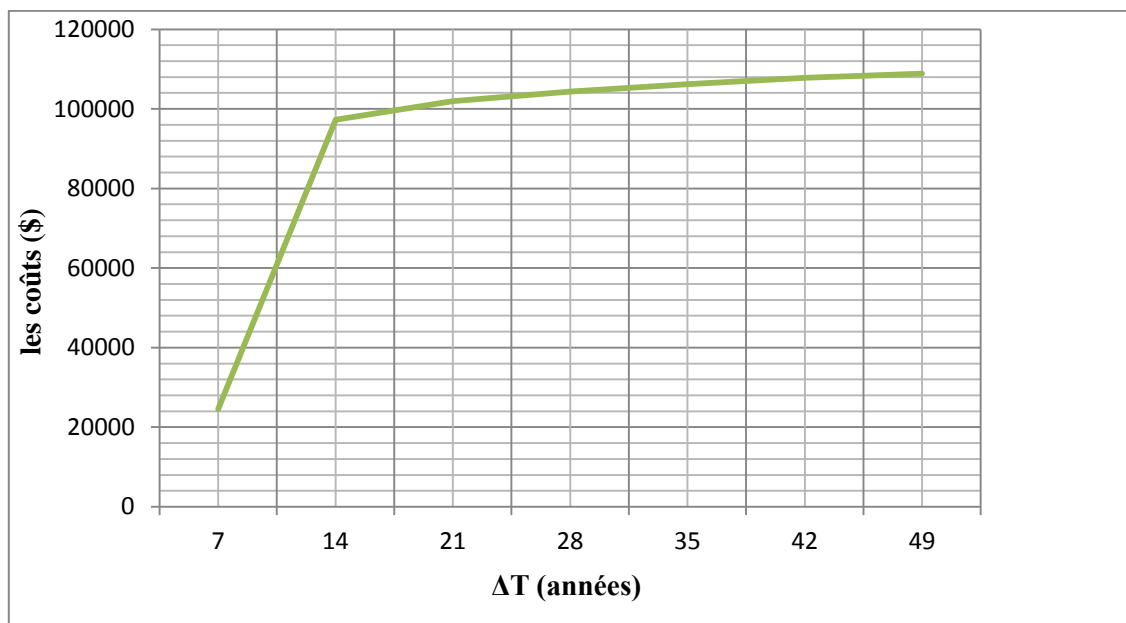


Figure IV.3. : Variation des coûts en fonction de ΔT_3

➤ Situation3 :

ΔT_4 (années)	Coûts (\$) /an
10	24560
20	96270
30	100730
40	103650
50	105720

Tableau IV.6. : Variation des coûts en fonction de ΔT_4

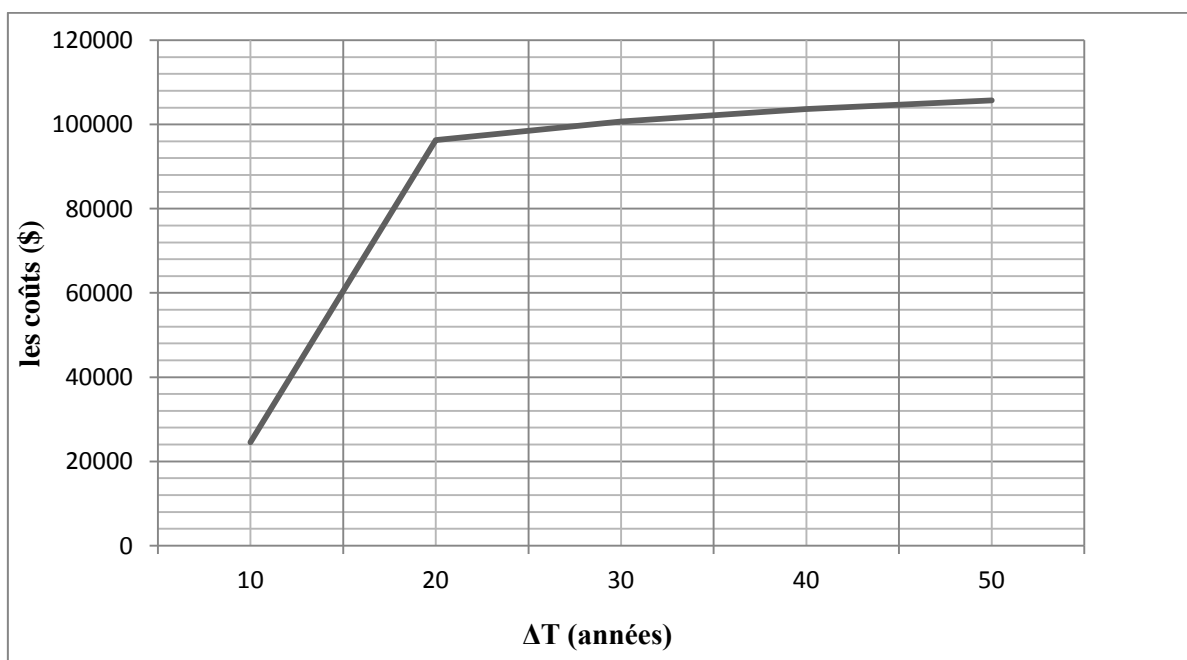


Figure IV.4. : Variation des couts en fonction de ΔT_4

IV.3.3. Discussion

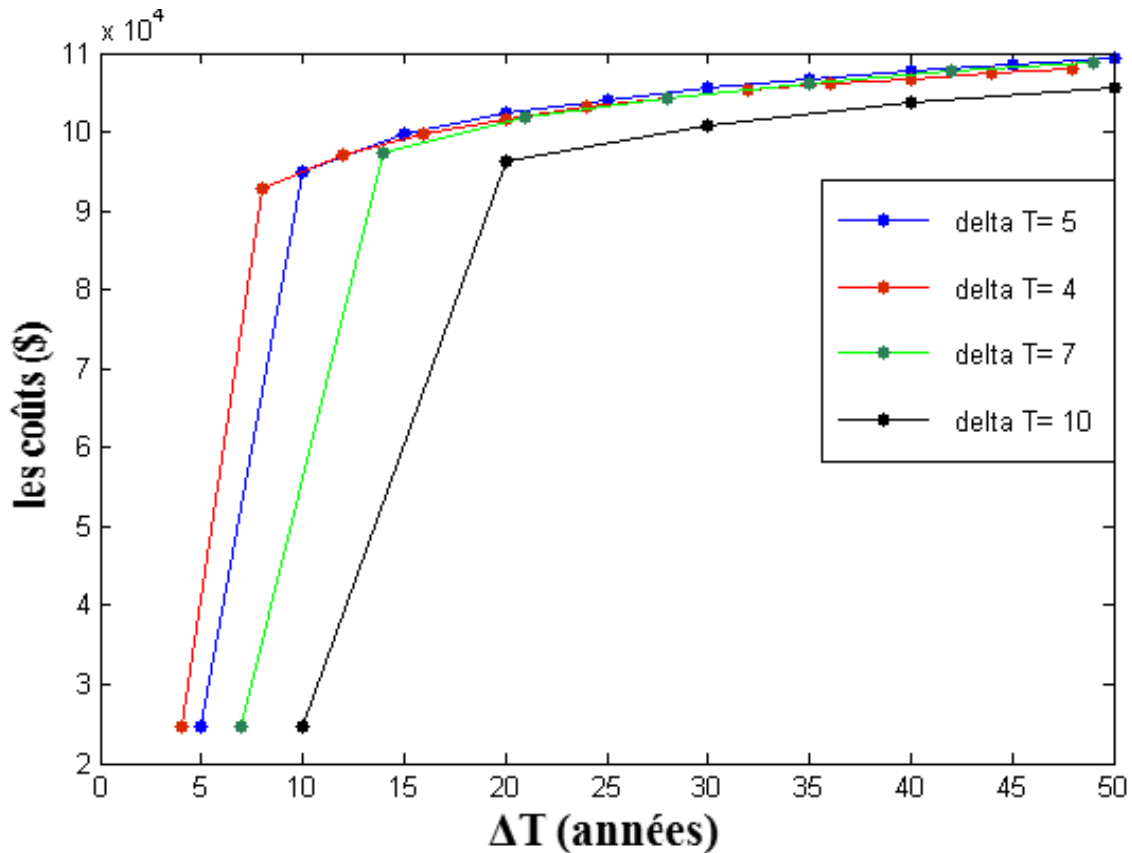


Figure IV.5. : Variation des coûts selon les différents ΔT

D'après la (figure IV.5.), on a constaté que l'intervalle de temps d'inspection de 10ans est le plus efficace pour l'entreprise sur le plan économique pour tout le cycle de vie du pipeline, mais le risque de défaillance ou d'éclatement du pipeline reste élevé donc l'entreprise ne devrait pas prendre un tel risque, car la rupture ou la défaillance du pipeline peut engendrer des dégâts catastrophiques sur l'environnement, le pipeline lui même et humains.

Mais pour les autre intervalles, on constate que l'intervalle d'inspection de 7ans reste le plus efficace et sans risque d'éclatement du pipeline pour les 30 premières années du moment que la canalisation reste encore jeune, et à partir de la 30eme année on déduit que l'intervalle de 4ans reste efficace économiquement et sans prendre le risque de défaillance ou d'éclatement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre projet de fin d'études a été réalisé au sein de l'entreprise Sonatrach (Bejaia). L'objectif principal de notre travail est l'étude de l'influence de la corrosion sur les pipelines et à l'implémentation d'une politique d'inspection optimale pour le système en question.

La corrosion est en grande partie, la cause des défaillances des canalisations, elle affecte directement l'exploitation de ces ouvrages. Leur suivi est impératif afin de prévoir des actions préventives et minimiser le coût des manques à gagner des arrêts imprévus, et les dégâts causés à l'environnement par ce phénomène.

L'inspection est indispensable dans le but de maintenir l'intégrité des canalisations. Grâce à des nouvelles techniques d'inspection, et des méthodes instrumentales avancées les résultats sont bien précis, et grâce à ces moyens, l'exploitant dispose assez d'informations qui lui permettent de prendre des décisions fiables sur les choix de maintenance à faire et les moyens à mettre en œuvre pour le maintenir en bonnes conditions.

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés aux types de maintenance et au choix des instants d'inspection et pour cela nous avons implémenté un programme Matlab qui nous permet de calculer les intervalles d'inspection optimaux.

D'après les résultats obtenus, on déduit que l'intervalle d'inspection le plus efficace sur le plan économique est celui de 10 ans, mais le taux de risque de défaillance ou d'éclatement du pipeline reste élevé donc l'industriel ne peut pas se permettre de prendre un tel intervalle de temps d'inspection. L'autre résultat qu'on peut tirer c'est que l'intervalle d'inspection de 7 ans reste le plus efficace et sans risque d'éclatement du pipeline pour les 30 prochaines années du moment que la canalisation reste encore jeune, et à partir de la 30^{ème} année c'est bien d'opter pour celui de 4 ans vu le vieillissement de pipeline qui augmente la probabilité de défaillance.

Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] AFNOR NF EN 13306. Terminologie de la maintenance. Norme européenne, , Juin 2001.
- [2] Abdi A. Optimisation de la fonction maintenance par la method AMDEC. Mémoire fin de cycle Université Abou Bekr Belkaid Telemcen, 2013 .
- [3] Barlow R.E.and Proschan.F. Mathematical Theory of Reliability. Wiley, New-York, 1965.
- [4] Laggoune R. Chateaneuf A. and Aissani D. Maintenance opportune des systèmes Multicomposants. Editions Universitaires Européennes, SarreBruk, allemagne, 2011.
- [5] Gertsbakh I., Reliability theory with applications to preventive maintenance. Springer, Berlin Allemagene, 2000.
- [6] Kiessler, P.C. Availability of periodically inspected systems subject to markovian degradation. Journal of Applied Probability, 39(4), 700–711. 2002.
- [7] Le bozec N. réaction de réduction de l'oxygène sur les aciers inoxydables en eau de mer naturelle, thèse de doctorat, université de bretagne occidentale 2000
- [8] Phénomènes de corrosion ; protection des métaux, documentations interne de l'entreprise.
- [9] Koch G.H., Brongers M.P.H., Thompson N.G., Virmani Y.P., Payer J.H., Corrosion costs and preventive strategies in the United States. U.S. Federal Highway Administration Report, FHWA-RD-01-156, March, 2002.
- [10] Peabody A.W.Control of pipeline corrosion, Houston, Texas, second Edition, R. Bianchetti, NACE International, 2001.
- [11] Guillaume S, François R, Hubert A, Manuel de Technologie Mécanique. Dunod, Paris, 2006.
- [12] SAHRAOUI Y. Optimisation des méthodes d'inspection des pipes, Thèse de Doctorat de l'Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.
- [13] Melchers R.E, Probabilistic modelling of immersion corrosion of steels in marine waters. Proceedings of Offshore Mechanics and Artic Engineering conference, Rio de janero, 3-8 june 2001.
- [14] Southwell C.R., Bultman J.D., Hummer Jr. C.W. Estimating of service life of steel in seawater. In: Schumacher M. (Editor), Seawater Corrosion Handbook, Noyes Data Corporation, New Jersey, p. 374-387, 1979.

- [15] Yamamoto N. Reliability based criteria for measures to corrosion. In: Proceedings of the 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE'98), Safety and Reliability Symposium, New-York, USA: ASME, 1998.
- [16] Southwell C.R., Alexandre A.L., Corrosion of metals in tropical waters - Structural ferrous metals. *Materials Protection*, 9 (1), 179-183, 1970.
- [17] Melchers R.E., Marine corrosion of steel specimens – Phenomenological modelling. Research Report, N° 125.12., The University of Newcastle, New South Wales, Australia, 1995.
- [18] Melchers R.E., Probabilistic modelling of immersion marine corrosion. In: Shiraishi N, Shinozuka M, Wen YK, editors, *Structural safety and reliability*, Vol.3. Rotterdam: Balkema, p.1143-1149,1998.
- [19] Melchers R.E. Long-term corrosion of steels exposed to marine environments. 1st International Conference Medachs (Construction Heritage in Coastal and Marine Environments. Damage, Diagnostics, Maintenance, and Rehabilitation)- Interreg IIIB Atlantic Space - Project N° 197, Keynotes, Lisbon, Portugal, 28-30 January 2008.
- [20] Guedes Soares C., Garbatov Y. Reliability of maintained corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads. *Marine Structures*, 12 (6), 425-445, 1999.
- [21] Paik J.K., Lee J.M., Park Y.I., Hwang J.S., Kim CW, Time-variant ultimate longitudinal strength of corroded bulk carriers, *Marine Structures*, 16, 567–600, 2003.
- [22] Paik J.K., Thayamballi A.K., Park Y.I., Hwang J.S. A time-dependent corrosion wastage model for seawater ballast tank structures of ships. *Corrosion Science*, 46, 471–486, 2004.
- [23] Qin S., Cui W. A discussion of the ultimate strength of ageing ships, with particular reference to the corrosion model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 216 (2) 155-160, 2002.
- [24] Yamamoto N. Kumano A., Matoba M. Effect of corrosion and its protection on hull strength (2nd report). *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 176, 281-289, 1994.
- [25] Yamamoto N., Ikegami K. A Study on the degradation of coating and corrosion of ship's hull based on the probabilistic approach. *Proceedings of the international Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium (OMAE'96)*, Vol. 2. p. 159-166, 1996.
- [26] Chouikhi H. Optimisation des stratégies de maintenance verte pour les systèmes de production de biens et de services, Thèse doctorat de l'Université de Lorraine, France, 2012.

- [27] C. B_ereguier, A. Grall, L. Dieulle, and M. Roussignol. Maintenance policy for a continuously monitored deteriorating system. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 02(17):235-250, 2003.
- [28] X. Jia and A. H. Christer. A prototype cost model of functional check decisions in reliability-centred maintenance. *Operation Research Sociality*, 53, 2002.
- [29] Sarkar, J. and Sarkar, S. Availability of a periodically inspected system under perfect repair. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 91(1), 77–90.2000.
- [30] Cui, L. and Xie, M. Availability of a periodically inspected system with random repair or replacement times. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 131(1), 89–100,2005.
- [31] Liao, H., Elsayed, E.A., and Chan, L.Y.Maintenance of continuously monitored degrading systems. *European Journal of Operational Research*, 175(2), 821–835.2006.
- [32] Wang H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139(3), 469–489.2002.
- [33] Deloux E. politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes,France,2008.
- [34] Doyen L. –Gaudoin O. Modélisation de l'efficacité de la maintenance des systèmes réparables - Synthèse bibliographique, Institut National Polytechnique de Grenoble Laboratoire de Modélisation et Calcul, 2009.
- [35] AIT MOKHTAR EH. Optimisation de la sureté de fonctionnement et de la maintenance des systèmes complexes par les réseaux bayésiens , Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia,Algerie, 2016.