

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE A. MIRA – BEJAIA



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master en électromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

**Maintenance prédictive basée sur le pronostic
pour les structures se dégradant**

Réaliser par :

- AITHAMMA Fares
- AISSANI Reda

Encadré par :

Mr. AIT MOKHTAR Elhassene

Année Universitaire : 2021-2022

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent travail.

Nous remercions notre encadrant *M. Ait Mokhtar Elhassene* pour sa disponibilité et ses efforts incessants durant la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions *M. Charfaoui Bachir* pour son aide précieuse sans laquelle ce travail n'aurait pas pu être réalisé.

Nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À toi, chère grand-mère, pilier de notre foyer, bénédiction de notre vie je prie le grand dieu de te garder toujours telle une couronne sur nos têtes.

À mon père et ma mère, vous êtes les parents les plus formidables au monde, vous avez su être là quand il le faut, je ne pourrais jamais vous remercier assez pour tout ce que vous avez fait et vous faites pour moi. Si je suis là aujourd'hui sachez que c'est grâce à vous.

En ce jour mémorable, MAMAN, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime, puisse le tout puissant te donner la santé, et la longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.

À mes frères MEHDI et FAYSAL qui ont toujours étaient là pour moi quand j'avais le plus besoin d'eux.

À mes chers amis, ADEL, LOUNIS, MOHO, NABIL, KARIM et SAID.

À mon binôme REDA et à toute la promotion de maintenance industrielle 2022, de l'université de Bejaia.

Fares

Dédicace

« Il est une autre richesse que celle de l'or ou de l'argent et c'est l'amour de sa famille. »

Je dédie tout d'abord ce travail, à mes très chers parents qui m'ont élevé, m'ont tout appris et ont fait de moi la personne que je suis aujourd'hui merci à vous de m'avoir guidé de la meilleure des façons sur ce chemin parsemer d'embuches qu'est la vie.

À ma sœur Lydia, pour son soutien et son encouragement durant les moments difficiles merci d'être toujours à mes cotes quand j'en ai besoin.

À mes amis : ROUJI, GHILAS, LOUNIS, ADEL, YANIS, MOUMED, NASSIM et LOUCIF.

À mon binôme *FARES* et à toute la promotion de maintenance industrielle 2022, de l'université de Bejaia.

Reda

Table de matières

Table de matières

Introduction générale.....01

Chapitre I : Estimation de la durée de vie résiduelle des systèmes corrodé.

I.1 Introduction.....02

I.2 Définition de la dégradation.....02

 I.2.1 Les modèles de dégradation.....02

 I.2.1.1 Modèle dégradation discret (choc)02

 I.2.1.2 Modèle dégradation continue (usure)03

I.3 Le phénomène de corrosion.....04

 I.3.1 Les types de corrosion.....04

 I.3.2 Les modèles prédictifs de corrosion04

 I.3.2.1 Modèles physico-chimiques.....04

 I.3.2.2 Modèles phénoménologiques.....05

 I.3.2.3 Modèles empiriques.....05

 I.3.2.3.1 Modèles de Guedes Soares et Garbatov.....05

 I.3.2.3.2 Modèles de Paik.....07

 I.3.2.3.3 Modèles de Qin et Cui.....08

I.4 La durée de vie résiduelle.....10

 I.4.1 Définition de la durée de vie résiduelle10

 I.4.2 Estimation de la durée de vie résiduelle (Pronostic)10

 I.4.3 Les méthodes de pronostic11

 I.4.3.1 Le pronostic basé sur les modèles mathématiques11

 I.4.3.2 Le pronostic guidé par les données11

 I.4.3.3 Le pronostic basé sur l'expérience12

I.5 L'estimation de la durée de vie résiduelle suivant le modèle Paik.....12

 I.5.1 Estimation de la dégradation à l'instant $t=30$ ans.....13

 I.5.2 Estimation de la durée de vie résiduelle à l'instant $t = 30$ ans.....14

I.6 Conclusion16

Chapitre II : Modèles de maintenance et d'inspection.

II.1 Introduction.....17

II.2 Définition de la Maintenance.....17

II.3 Types de maintenance17

Table de matières

II.3.1 Maintenance préventive	18
II.3.1.1 Maintenance systématique	18
II.3.1.2 Maintenance préventive conditionnelle	18
II.3.1.3 Maintenance préventive prévisionnelle	18
II.3.2 Maintenance corrective	18
II.4 Politique d'inspection	19
II.4.1 Définition de la politique d'inspection	19
II.4.2 Types de politique d'inspection.....	19
II.4.2.1 Classification selon la périodicité.....	19
II.4.2.1.1 Politique d'inspection périodique	19
II.4.2.1.2 Politique d'inspection non périodique	20
II.4.2.2 Classification selon la qualité d'information obtenue	20
II.4.2.2.1 Inspection parfaite	20
II.4.2.2.2 Inspection imparfaite	20
II.4.3 Exemples de politiques de maintenance	20
II.4.3.1 Première politique.....	20
II.4.3.2 Deuxième politique.....	22
II.5 conclusion	25
 Chapitre III : Optimisation de la maintenance d'un pipeline corrodé.	
III.1 Introduction	26
III.2 Politique de maintenance proposée.....	26
III.3 Description de la démarche d'optimisation	28
III.3.1 Modélisation de niveau de dégradation.	28
III.3.2 Estimation de la durée de vie résiduelle.....	29
III.3.3 Optimisation de l'intervalle d'inspection ΔT	29
III.4 Application.....	30
III.4.1 La première étape.....	30
III.4.2 La deuxième étape.....	31
III.4.2 La troisième étape.....	32
III.5 Conclusion.....	34
Conclusion générale.....	35

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Estimation de la durée de vie résiduelle des systèmes corrodés.

Figure I.1 Représentation d'un modèle à dégradation discrète.....03
Figure I.2 Représentation d'un modèle à dégradation continue.....03
Figure I.3 Evolution de la dégradation par corrosion selon le modèle de Guèdes Soares.....06
Figure I.4 Evolution de la dégradation par corrosion selon le modèle de Paik.....08
Figure I.5 Evaluation de la dégradation par corrosion selon le modèle de Qin et Cui.....09
Figure I.6 Evolution de la dégradation selon le modèle de Paik.....13
Figure I.7 Distribution aléatoire de la dégradation selon le modèle de Paik.....14
Figure I.8 Le seuil de la perte d'épaisseur pour le modèle Paik.....15
Figure I.9 Distribution aléatoire de temps de défaillance selon le modèle Paik.....15

Chapitre II : Modèles de maintenance et d'inspection.

Figure II.1 : Schéma démonstratif des différents types de maintenance.....17
Figure II.2 : Organigramme de la première politique.....21
Figure II.3 Organigramme de la deuxième politique.....24

Chapitre III : Optimisation de la maintenance d'un pipeline corrodé.

Figure III.1 Organigramme de la politique de maintenance.....27
Figure III.2 Evolution de la perte d'épaisseur.....29
Figure III.3 La Courbe des coûts totales en fonction de temps d'inspection.....32

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre III : Optimisation de la maintenance d'un pipeline corrodé.

Tableau III.1 les valeurs des couts de la maintenance.....30
Tableau III.2 Les valeurs des coûts totales des intervalles d'inspection avec un pas de.....39
Tableau III.3 Les valeurs des coûts totales des intervalles d'inspection avec un pas de31
Tableau III.4 Les valeurs des coûts totales des intervalles d'inspection avec un pas de..... 32

Introduction générale

Introduction générale

Dans l'industrie pétrolière, les pipelines assurent le transport des hydrocarbures du point de gisement vers leurs destinations. Ses systèmes d'acheminement ne sont pas à l'abri des différents agents perturbateurs comme la corrosion, qui provoque des détériorations dans la structure de pipeline, alors le service de maintenance doit adopter la stratégie de maintenance la plus adéquate pour effectuer des replacements.

La maintenance corrective représente plusieurs inconvénients, notamment, une paralysie totale de la chaîne de production pour une durée indéterminée, des replacements qui peuvent s'avérer inutiles et qui entraîne des pertes de pièces de rechange en vain, des accidents de travail et des dégâts matériels inattendus, etc. Ces inconvénients cumulent des coûts potentiellement élevés qu'il faudra impérativement minimiser.

Pour résoudre ce problème, nous adoptons la maintenance prédictive basée sur le pronostic, son objectif principal est d'estimer la durée de vie résiduelle d'un équipement ; pour notre cas, il s'agit de l'estimation de temps de fonctionnement d'un pipeline corrodé avant la défaillance.

Dans ce travail nous allons proposer une politique d'inspection basée sur l'estimation de la durée de vie résiduelle d'un pipeline en état de dégradation suite à l'effet de corrosion, notre objectif principal est la modélisation puis l'optimisation du temps d'inspection.

Ce mémoire est organisé en 03 chapitres, le premier chapitre est dédié au cadre théorique de notre travail, il regroupe des généralités sur la corrosion et le calcul de la durée de vie résiduelle. Dans le deuxième chapitre nous avons abordé la maintenance et les différentes politiques d'inspection existantes. Dans le dernier chapitre nous avons, simulé puis estimé le temps d'inspection optimale.

Chapitre I

Estimation de la durée de vie résiduelle
des systèmes corrodés

I.1 Introduction

La dégradation des équipements est l'un des problèmes majeurs auxquels font face les plus grandes entreprises industrielles d'aujourd'hui, ce phénomène nocif pour la chaîne de production peut être causé par plusieurs facteurs, notamment par la corrosion. Pour résoudre ce problème, les ingénieurs ont opté à des méthodes d'inspections basées sur l'estimation de la durée de vie résiduelle.

Ce premier chapitre est une introduction pour l'ensemble de notre travail, c'est le support théorique de ce mémoire dans lequel nous avons exposé quelques définitions sur la corrosion, la dégradation et les modèles de dégradation et la durée de vie résiduelle.

I.2 Définition de la dégradation

Selon la norme NF EN 13306 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 [1].

I.2.1 Les modèles de dégradation

Les modèles de dégradation sont les modèles pour lesquels l'espace des états se compose des états de marche et de panne ainsi que les états dégradés qui permettent de transiter successivement entre l'état neuf et l'état de panne.

Une défaillance se produit lorsque le niveau de dégradation atteint un certain seuil, donc, 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.

I.2.1.1 Modèle dégradation discret (choc)

Les modèles à dégradation discrète sont basés sur des dégradations de type chocs à occurrence aléatoire. Chaque choc incrémente la dégradation de l'entité modélisée. Cet incrément est aléatoire et 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, c'est ce que représente la figure I.1.

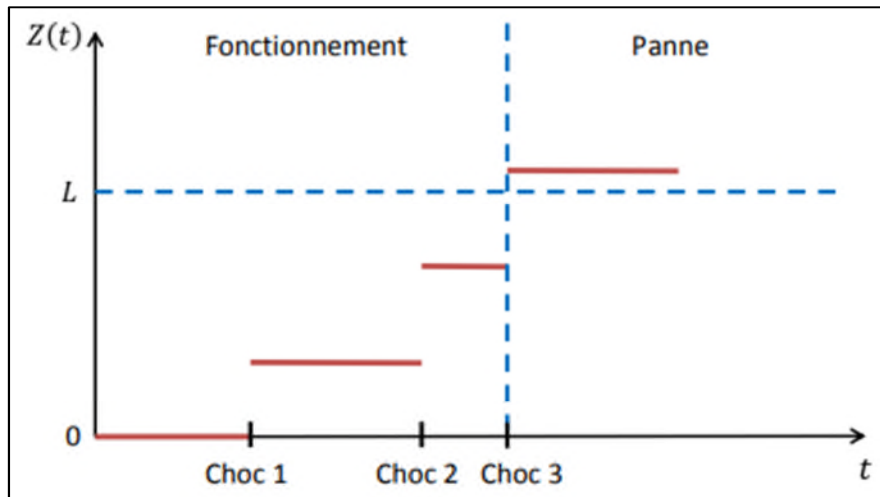


Figure I.1- Représentation d'un modèle à dégradation discrète.

I.2.1.2 Modèle dégradation continue (usure)

Les modèles à dégradation continue sont pertinents pour modéliser des phénomènes tels que la fatigue, l'érosion graduelle d'un matériau ou encore l'usure progressive d'une pièce mécanique. 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. Les incréments de détérioration dépendent uniquement de la durée d'observation. Ce qui est représenté dans la figure I.2

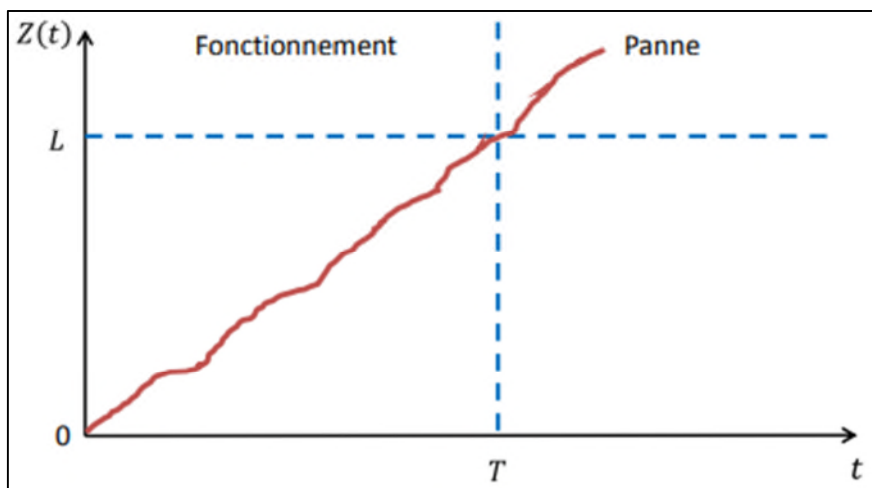


Figure I.2- Représentation d'un modèle à dégradation continue.

I.3 Le phénomène de corrosion

La corrosion est considérée comme une dégradation du matériau ou de ses propriétés par réaction chimique avec l'environnement. Elle se traduit généralement par les effets suivants : diminution de poids, altération de la surface et affaiblissement des propriétés mécaniques [1].

I.3.1 Les types de corrosion

✓ **Corrosion chimique** : c'est une réaction hétérogène entre une phase solide (métal), et une phase gazeuse ou liquide. Dans le cas où le réactif est gazeux, apparaît un phénomène dit corrosion sèche [2].

✓ **Corrosion biologique (bactérienne)** : Correspond à l'attaque directe ou indirecte des métaux par des bactéries, elle apparaît en particulier dans les canalisations enterrées et sur les coques des bateaux [4].

✓ **Corrosion électrochimique** : D'un point de vue pratique, le couplage d'une ou plusieurs réactions d'oxydation du métal à l'anode, avec une ou plusieurs réactions de réduction d'espèces en solution à la cathode, conduit à l'obtention d'un potentiel mixte de corrosion [5].

I.3.2 Les modèles prédictifs de corrosion

Les modèles prédictifs de corrosion sont très utiles, afin de planifier la maintenance dans le temps et pour interpréter les mesures réalisées en vue de réévaluer le niveau de performance des équipements et des structures. Les modèles sont classifiés en trois groupes : les modèles physico-chimiques, les modèles phénoménologiques et les modèles empiriques.

I.3.2.1 Modèles physico-chimiques

Le modèle physico-chimique de prédiction de la corrosion généralisée du métal dans l'eau de mer naturelle, est décrit par la relation suivante :

$$k - \frac{P}{V_p} \left(1 - \exp \left(-\frac{V_p K}{P} \right) \right) = V_p \tau \quad (\text{I.1})$$

Avec :

k : Perte d'épaisseur de métal (μm) ; τ : temps d'exposition (année) ; P : Coefficient caractérisant les propriétés protectrices de la couche de produit de corrosion ($\mu\text{m}^2/\text{an}$) ; V_p : vitesse de corrosion à long terme ($\mu\text{m}/\text{an}$) [6].

I.3.2.2 Modèles phénoménologiques

Melchers [7] a montré que des différences de comportement existent entre l'évolution empirique de la perte d'épaisseur dans le temps et celle obtenue à l'aide des modèles prédictifs. Ceci met en évidence le fait que certains mécanismes, notamment la corrosion bactérienne, ne sont pas pris en compte dans les modèles de corrosion.

Melchers [7] a proposé un modèle phénoménologique dans un contexte probabiliste afin de tenir compte des principaux mécanismes de corrosion de l'acier en fonction de la durée d'exposition et d'insérer les variables de la perte d'épaisseur à la surface corrodée [6].

$$c(t, E) = b(t, E) \cdot fn(t, E) + \varepsilon(t, E) \quad (I.2)$$

Avec :

$c(t, E)$: Perte d'épaisseur en fonction du temps et du vecteur E qui contient les facteurs environnementaux de corrosion (mm), $fn(t, E)$: Perte d'épaisseur moyenne (mm), $\varepsilon(t, E)$: Variabilité de la perte d'épaisseur (mm), $b(t, E)$: Biais (erreur de modèle), t : temps (années), E : Vecteur des facteurs environnementaux de corrosion (facteur physique, chimique et biologiques) [6].

I.3.2.3 Modèles empiriques

Ces modèles comprennent plusieurs types, mais dans notre travail, nous allons nous concentrer sur les trois modèles suivants :

I.3.2.3.1 Modèles de Guedes Soares et Garbatov

D'après [8] ce modèle comporte trois phases :

- La première phase : la corrosion est inactive à cause de l'efficacité du système de protection.
- La deuxième phase : le système de protection est endommagé et correspond à l'amorçage de la corrosion et une diminution de l'épaisseur de métal dans le temps.
- La troisième phase : ralentissement, puis une stabilisation de la corrosion.

Les produits de corrosion forment une couche protectrice contre l'agressivité du milieu environnant à la surface du métal, elle réduit la vitesse de corrosion. La suppression de cette dernière réactivera la corrosion.

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

$$d(t) = d_{\infty}(1 - e^{-t/\tau_t}) \quad (\text{I.3})$$

La solution particulière s'écrit :

$$\begin{aligned} d(t) &= 0 & t &\leq \tau_c \\ d(t) &= d_{\infty}(1 - e^{-(t/\tau_c)/\tau_t}) & t &> \tau_c \end{aligned} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

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

$$\tau_t = \frac{d_{\infty}}{tg \alpha} \quad (\text{I.5})$$

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).

La figure I.3, montre l'évolution de la perte d'épaisseur en fonction du temps, décrit par le modèle de guèdes Soares et Gorbato

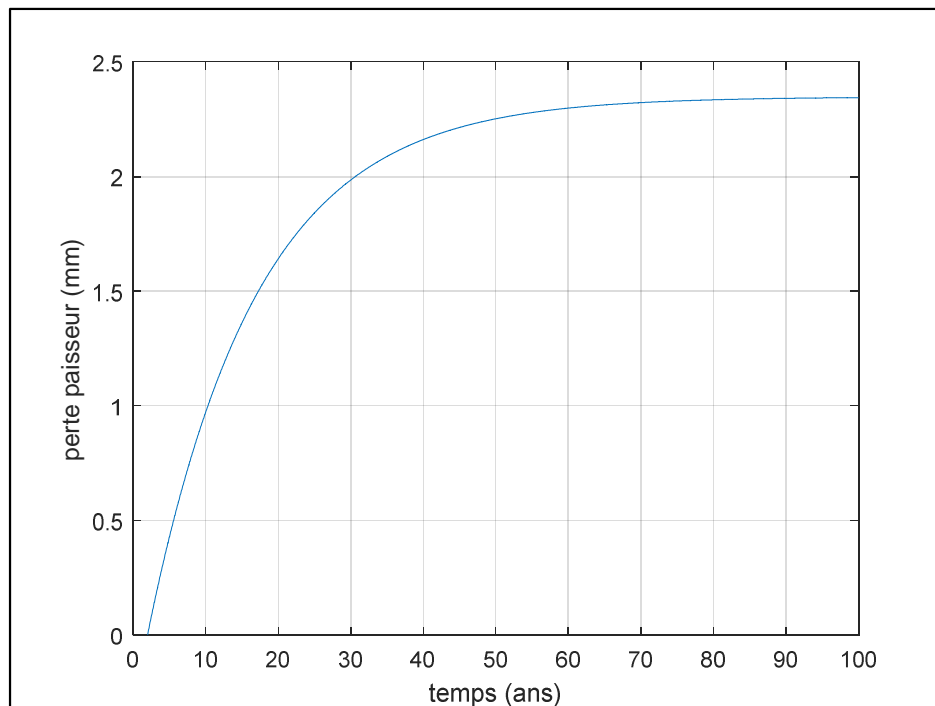


Figure I.3 – Evolution de la dégradation par corrosion selon le modèle de Guèdes Soares.

I.3.2.3.2 Modèles de Paik

Paik a proposé un modèle de corrosion qui tient compte de la localisation et de la catégorie de l'élément structurel des navires, afin de tenir compte des facteurs qui influencent la corrosion des structures [9] [10].

Ce modèle comporte trois phases :

- La première phase : Période d'efficacité du système de protection.
- La deuxième phase : Période de transition ou d'amorçage de la corrosion.
- La troisième phase : représente la progression de la corrosion.

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 :

$$d(t) = C_1(T - T_c - T_t)^{C_2} \quad (\text{I.6})$$

Avec :

$d(t)$: Perte d'épaisseur (mm), T : Âge du système (années), T_c : Durée de vie du système de protection (années), T_t : Durée de transition (année), C_1, C_2 : Coefficient déterminés à partir d'une analyse statistique des données de corrosion collectées sur les navires.

Paik lors des applications de son modèle, il prend un coefficient $C_2 = 1$ et $T_t = 0$, ce qui revient à un modèle linéaire avec une vitesse constante dans le temps [6] :

$$d(t) = C_1(t - T_c) \quad (\text{I.7})$$

On trouve l'évolution de la corrosion d'un pipeline selon le modèle de Paik dans la figure I.4 suivante :

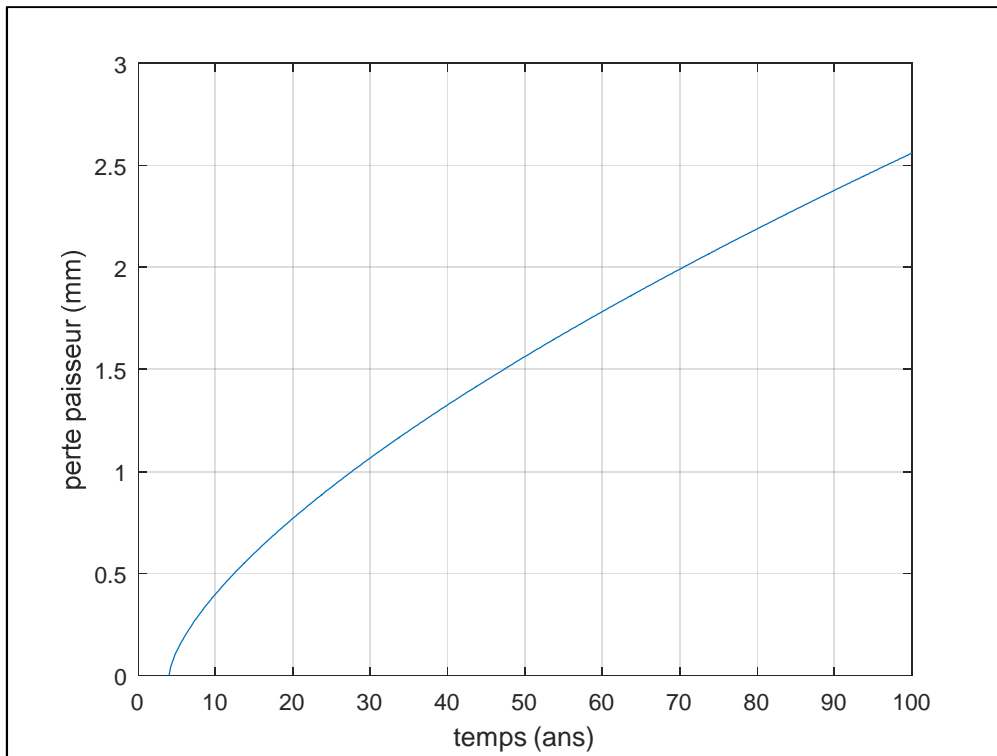


Figure I.4 – Evolution de la dégradation par corrosion selon le modèle de Paik.

I.3.2.3.3 Modèles de Qin et Cui

Le modèle développé par Qin et Cui [11] 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.

L'évolution de la perte d'épaisseur de métal due à la corrosion dans le temps peut être calculée selon l'expression suivante proposée par Qin et Cui [6] [11] :

$$\begin{aligned}
 d(t) &= 0 & 0 \leq t \leq T_{st} \\
 d(t) &= d_{\infty} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} \right] \right\} & T_{st} \leq t \leq T_L
 \end{aligned}
 \tag{I.8}$$

Avec :

$d(t)$: Perte d'épaisseur (mm), T_{st} : Temps de début de dégradation du système de protection ; d_{∞} , η , β , T_{st} : Paramètres du modèle à déterminer , T_L : Temps de fin de vie de la structure ou temps au-delà duquel les actions de maintenance ne sont plus programmées.

Chapitre I : Estimation de la durée de vie résiduelle des systèmes corrodés.

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

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

$$d(t) = d_{\infty} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - T_{st}}{\eta} \right) \right] \right\} \quad (\text{I.9})$$

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 :

$$d(t) = d_{\infty} \left(\frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} = d_{\infty} (t - T_{st})^{\beta} \quad (\text{I.10})$$

Lorsque $d_{\infty} = 0.1207$, $T_{st} = 0$, $\eta = 0.6257$ alors le modèle correspond au modèle puissance proposé par Melchers [6].

La figure I.5 représente l'évolution de la dégradation selon le modèle de Qin et Cui.

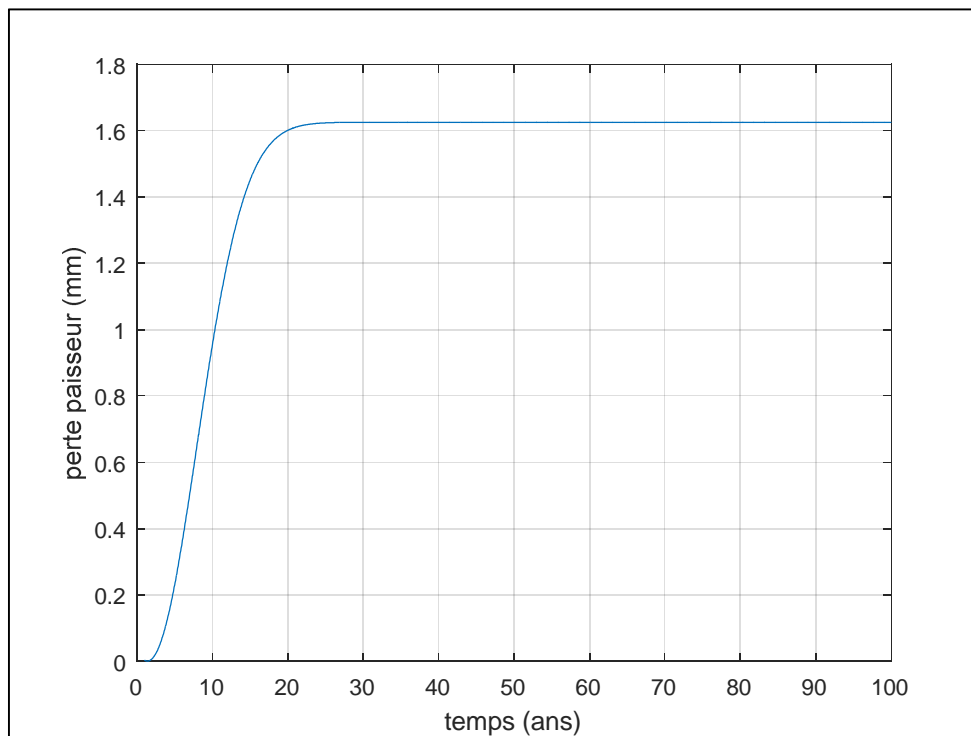


Figure I.5 – Evaluation de la dégradation par corrosion selon le modèle de Qin et Cui.

1.4 La durée de vie résiduelle

Dans le monde industriel, il existe un très grand nombre de structures pour lesquelles une évaluation de la durée de vie résiduelle est nécessaire, celle-ci consiste à surveiller l'état de dégradation des composants, afin de pronostiquer l'apparition d'une défaillance. Il est alors possible de prévoir le moment le plus opportun pour réaliser les interventions nécessaires. Cette stratégie permet ainsi de limiter les périodes d'indisponibilité du système et de réduire les coûts de maintenance.

1.4.1 Définition de la durée de vie résiduelle

Remaining Useful Life (RUL), c'est le temps de fonctionnement restant à un composant avant qu'il cesse de satisfaire ou d'assurer la fonction pour laquelle il a été conçu. Le pronostic consiste en une supposition sur le futur d'un système à partir d'informations passée, présente et future [12].

1.4.2 Estimation de la durée de vie résiduelle (Pronostic)

La maintenance prévisionnelle repose sur le principe de pronostic qui est la capacité de prévoir à l'avance l'apparition d'une défaillance. Son objectif est d'estimer la durée de vie résiduelle en analysant toutes les informations disponibles sur le système, afin de réaliser un bilan de santé des composants sélectionnés. Un modèle de pronostic permet de prévoir l'évolution future de cet état de santé, surtout lors d'apparition d'une panne. Pour ce faire, les algorithmes prennent en compte les événements vécus, et une estimation des conditions d'utilisation futures du système. En résumé, le processus de pronostic consiste à répondre aux questions suivantes [12] :

- Est ce que le composant est dans un état dégradé ?
- Quel mode de défaillance a initié cette dégradation ?
- Dans quel état de "sévérité" est cette dégradation ?
- A quelle vitesse cette dégradation évolue jusqu'à un état défaillant ?
- Quel événement pourrait changer le comportement de cette dégradation ?
- Quels autres facteurs pourraient affecter le calcul d'estimation de la RUL ?

I.4.3 Les méthodes de pronostic

I.4.3.1 Le pronostic basé sur les modèles mathématiques

Les modèles physiques caractérisent de manière quantitative le comportement d'une défaillance grâce à des lois physiques, elles sont applicables lorsqu'il est possible de construire des modèles mathématiques de la dégradation du système à partir de principes fondamentaux.

Généralement, la construction de ces modèles mathématiques implique l'identification de plusieurs paramètres spécifiques au système et qui décrivent son mode de fonctionnement. Après l'élaboration de modèle, ces paramètres sont mesurés en mode fonctionnement et comparés aux sorties du modèle. Les différences entre les données réelles et les sorties du modèle signifient [12] :

- Une faible différence indique un état de fonctionnement normal.
- Une grande différence indique l'apparition prochaine d'une panne.

I.4.3.2 Le pronostic guidé par les données

Le pronostic guidé par les données consiste à évaluer l'état de santé d'un système et estimer sa RUL à partir des données disponibles. Ce pronostic se base sur des indicateurs construits à partir des données de surveillance qui permettent de suivre l'état d'avancement d'une dégradation. En effet, toutes les informations disponibles sur le système peuvent aider à comprendre les mécanismes de dégradation dont il est sujet [13] [14]. Cette méthode utilise des techniques d'apprentissage ou d'analyse de tendance afin de calibrer un modèle pour qu'il corresponde le mieux possible au composant étudié, à savoir : les modèles statistiques et stochastiques et les réseaux de neurones artificiels [12].

➤ Les modèles statistiques et stochastiques

Pour ces modèles, les temps avant défaillance de composants identiques peuvent être considérés comme des variables aléatoires statistiquement identiques et indépendantes. L'état de santé d'un composant étudié peut être représenté par plusieurs indicateurs de dégradation et l'analyse des données de surveillance permet de déterminer l'état de santé actuel du composant. La RUL est déterminée quand l'indicateur atteint une valeur seuil prédéfinie. Ce modèle considère la dégradation du composant comme une succession d'états depuis son fonctionnement nominal jusqu'à sa défaillance. Il est donc nécessaire de décrire les lois de passages d'un état à l'autre. Pour ce faire, on peut distinguer deux classes de modèles : ceux qui décrivent une dégradation continue et ceux qui décrivent une dégradation discrète [12].

➤ Les réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones (Artificial Neural Networks ou ANN en anglais) sont de plus en plus utilisés pour faire du pronostic. Ils permettent de construire un modèle mathématique représentant le composant à partir des données d'observations disponibles. Ils sont efficaces pour modéliser des systèmes complexes et non linéaires, et peuvent généraliser et adapter des solutions à partir de jeux de données limités. Ils sont construits sur le modèle de neurones biologiques afin de reproduire leur mode de fonctionnement.

Le principal avantage de cette méthode est qu'un ANN permet de modéliser un système complexe, multidimensionnel et non linéaire. De plus, il est possible d'utiliser des données d'entrées très différentes, l'inconvénient c'est que les ANNs ne fournissent ni de résultats physique ni d'intervalle de confiance pour les valeurs de RUL qu'ils prédisent. Par conséquent, sans signification physique et sans intervalle de confiance il est difficile de prendre une décision quant à la planification de la maintenance du système. En plus, l'apprentissage d'un réseau de neurones nécessite un grand jeu de données [12].

I.4.3.3 Le pronostic basé sur l'expérience

Le pronostic basé sur l'expérience utilise la modélisation stochastique de la dégradation ou sur des modèles fiabilistes. En principe ce pronostic nécessite un retour d'expérience sur le composant étudié dans des conditions similaires, après l'analyse de ce retour d'expérience sur une population de composants identiques elles déterminent une probabilité de défaillance sur un étendu temporel [15] [16].

I.5 L'estimation de la durée de vie résiduelle suivant le modèle Paik

Dans le but d'évaluer le développement de la dégradation d'un pipeline corrodé, nous allons appliquer le modèle Paik sur un cas réel, afin de pouvoir estimer la durée de vie résiduelle, qui va nous permettre de savoir le temps de fonctionnement restant au pipeline avant qu'il soit totalement défaillant.

I.5.1 Estimation de la dégradation à l’instant t=30 ans

Nous avons modélisé l’évolution de la dégradation de N effectifs en fonction de temps en appliquant l’équation (I.6) du modèle de Paik (voir la figure I.6), puis nous avons extrait les valeurs de la perte d’épaisseur à l’instant t = 30 ans pour calculer la moyenne et l’écart type.

Le tableau I.1 illustre les valeurs des coefficients du modèle de Paik [17] :

Tableau I.1 les valeurs des coefficients du modèle de Paik

Coefficient	Moyenne	Ecart type	N
C_1	0.12	0.0012	100
C_2	0.67	0.0067	100

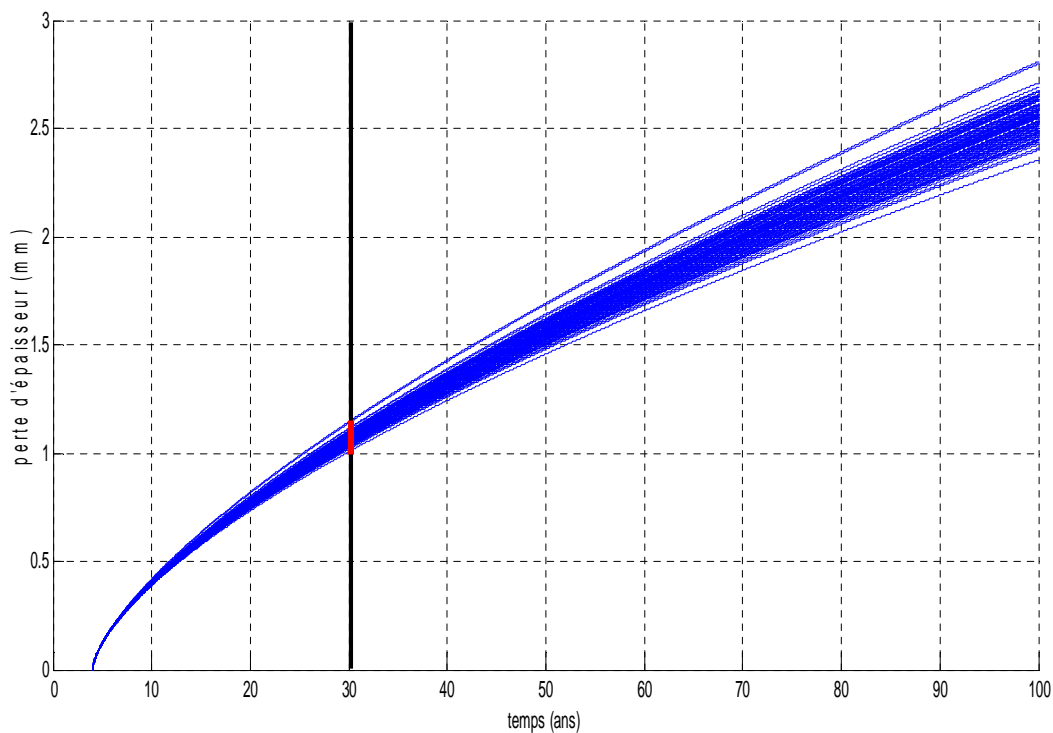


Figure I.6 Evolution de la dégradation selon le modèle de Paik.

La dégradation varie d’une manière croissante cela se traduit par le comportement aléatoire de la corrosion. L’histogramme de la figure I.7 représente la distribution des valeurs de perte d’épaisseur à l’instant (30 ans) en fonction de la densité de probabilité.

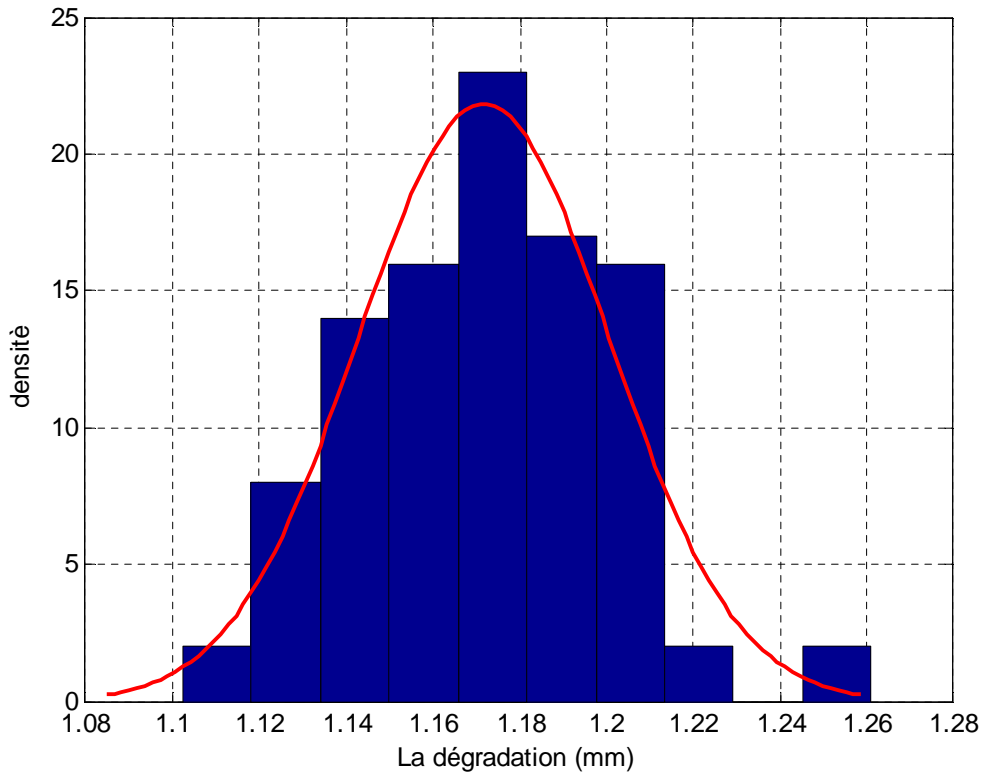


Figure I.7 Distribution aléatoire de la dégradation selon le modèle de Paik.

Les données sont dispersées aléatoirement. Pour plus de sûreté durant cette évaluation, nous avons calculé la moyenne de la perte d'épaisseur qui est 1.1717 mm avec un écart type de 0.0526 mm.

I.5.2 Estimation de la durée de vie résiduelle à l'instant $t = 30$ ans

Nous avons fixé une valeur de 2.1 mm comme un seuil critique de la perte d'épaisseur, après la simulation nous avons enregistré les instants de défaillance (les instants de franchissement de seuil fixé) et calculé leur moyenne et écart type pour estimer la durée de vie résiduelle.

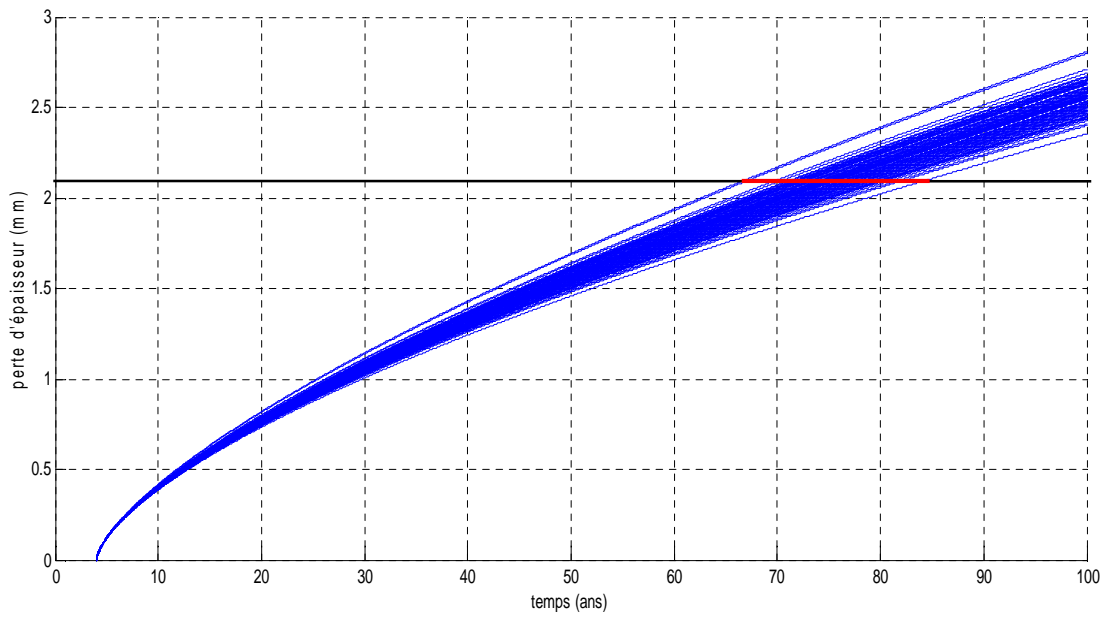


Figure I.8 Le seuil de la perte d'épaisseur pour le modèle Paik.

La figure I.9 nous montre une distribution aléatoire de toutes les valeurs des instants de défaillances probables.

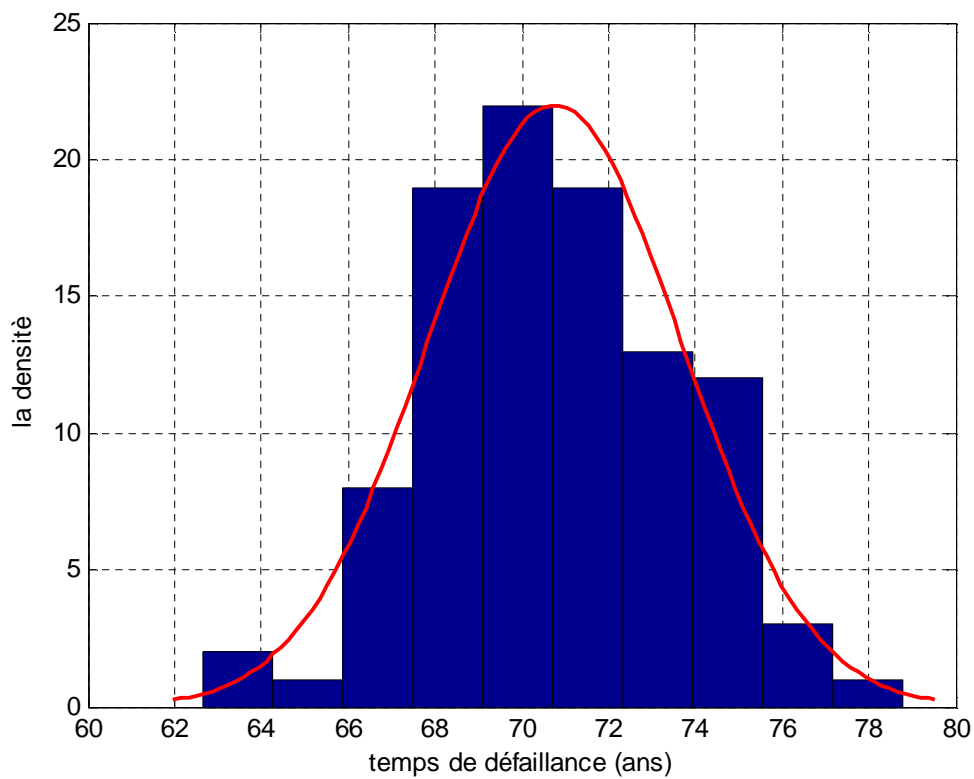


Figure I.9 Distribution aléatoire de temps de défaillance selon le modèle Paik.

Chapitre I : Estimation de la durée de vie résiduelle des systèmes corrodés.

Nous avons une courbe en cloche qui nous montre l'instant de défaillance moyen estimé à 70.7 ans, un écart type de 2.1 ans, La durée de vie résiduelle est environ 40.7 ans.

I.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté des généralités sur la corrosion et dégradation, les modèles de la corrosion, les modèles de dégradation, puis nous avons introduit l'approche de pronostic et l'estimation de la durée de vie résiduelle.

D'après les recherches faites, l'estimation de la durée de vie résiduelle nécessite d'une part d'évaluation de l'état de dégradation des composants du système étudié, et d'autre part de pronostiquer l'apparition future d'une panne. Plus précisément, il s'agit d'estimer le temps restant avant l'arrivée d'une défaillance. L'estimation d'une RUL constitue un réel enjeu car la pertinence et l'efficacité des actions de maintenance dépendent de la justesse et de la précision des résultats obtenus. Il existe de nombreuses méthodes permettant de réaliser un pronostic de durée de vie résiduelle, chacune avec ses spécificités, ses avantages et ses inconvénients.

Chapitre II

Modèles de maintenance et d'inspection

II.1 Introduction

De nos jours les entreprises industrielles sont équipés de chaînes de production de plus en plus sophistiqués et autonomes grâce aux divers équipements dont elles sont composées. Ces équipements souvent sensibles, sont sujet de défaillances ce qui engendre des pertes de temps, de produit et une interruption de l'activité globale de l'entreprise.

La maintenance et l'inspection des machines industrielles alors deviennent une nécessité primordiale afin de rétablir les installations industrielles et contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité. Dans ce deuxième chapitre nous allons parler de la maintenance industrielle et de la stratégie d'inspection ainsi que des modèles de maintenance.

II.2 Définition de la Maintenance

Selon la norme AFNOR EN13306 (2001) « la maintenance est définie comme étant un ensemble de toutes les actions techniques, administrative et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou a le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » [1].

II.3 Types de maintenance

Les types de maintenance sont représentés dans la figure II.1 :

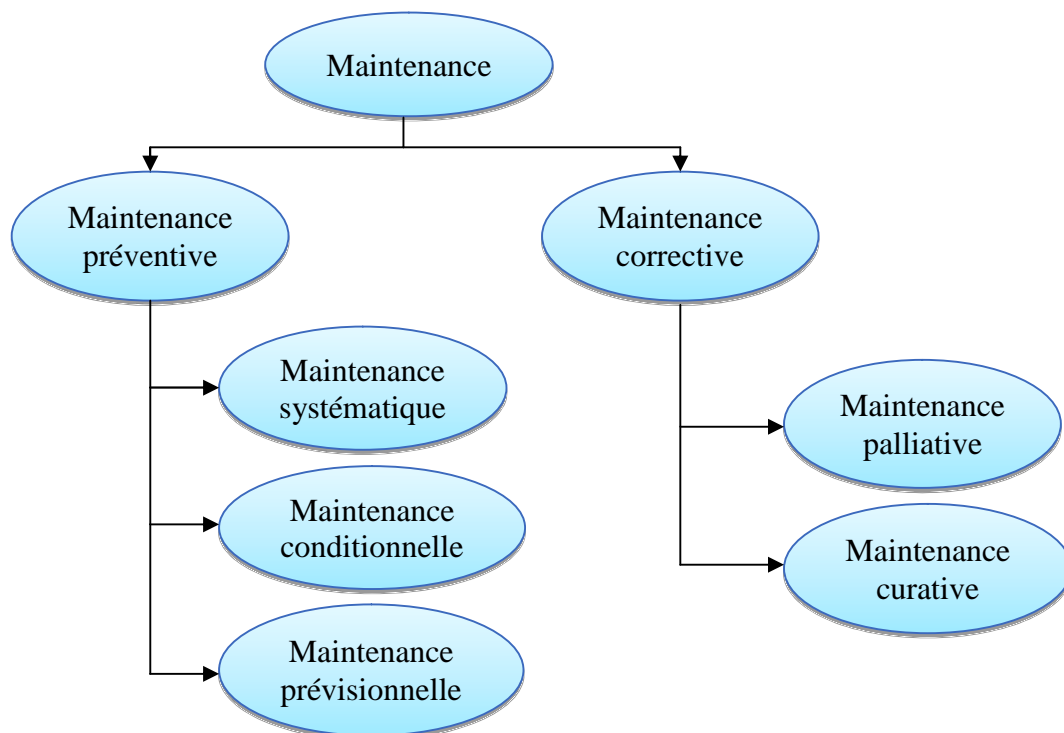


Figure II.1 : Schéma démonstratif des différents types de maintenance.

II.3.1 Maintenance préventive

La maintenance préventive est exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien [1]. La maintenance préventive inclut trois types de plans de maintenance : la maintenance préventive systématique, la maintenance préventive conditionnelle et la maintenance préventive prévisionnelle.

II.3.1.1 Maintenance systématique

La maintenance systématique est une maintenance préventive réalisée à des intervalles prédéterminés. L'opération de maintenance est exécutée conformément à un échéancier, un calendrier déterminé a priori [18].

II.3.1.2 Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle est subordonnée au franchissement d'un seuil prédéterminé significatif de l'état de dégradation du bien. Le franchissement du seuil peut être mis en évidence par l'information donnée par un capteur ou par tout autre moyen [19].

II.3.1.3 Maintenance préventive prévisionnelle

La maintenance préventive prévisionnelle est subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée des paramètres significatifs de dégradation du bien, permettant, grâce à une surveillance très précise, de suivre l'évolution d'un défaut ou d'une usure et donc de planifier une intervention avant une défaillance totale ou partielle [19].

II.3.2 Maintenance corrective

Maintenance corrective est utilisée après la défaillance totale ou partielle d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, en réalisant l'ensemble des activités afin de remettre un équipement dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction pour laquelle il est conçu. Elle se divise en deux familles :

- ✓ **Maintenance palliative** : elle regroupe les activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement une fonction requise [19].
- ✓ **Maintenance curative** : elle regroupe les activités correctives ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié et lui permettre d'accomplir une fonction requise [19].

II.4 Politique d'inspection

L'inspection nous offre la possibilité d'obtenir les informations directes sur l'état des équipements dans les installations industrielles à tout moment. L'inspection directe repose sur l'évaluation de fonctionnement correct des équipements et la détection des états de défaillance, alors que l'inspection indirecte consiste à mesurer les paramètres de contrôle prédéterminés et ensuite comparer les valeurs mesurées à des seuils prédéfinis.

II.4.1 Définition de la politique d'inspection

Selon la norme NF EN133306 [1] une inspection est un contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien. En général, l'inspection peut être réalisée avant, pendant ou après d'autres activités de maintenance.

L'inspection permet de détecter la dégradation d'un système ou de son état de fonctionnement, une politique de maintenance optimale consiste à minimiser le coût total. Un faible espacement des inspections conduit à des coûts élevés des opérations d'inspection, alors qu'un grand espacement ne permet pas de détecter certaines défaillances, augmentant ainsi la possibilité d'une défaillance.

II.4.2 Types de politique d'inspection

Les types de politiques d'inspections peuvent être classifiés selon deux critères majeurs, voire : la périodicité et la qualité d'information obtenue.

II.4.2.1 Classification selon la périodicité

II.4.2.1.1 Politique d'inspection périodique

Dans ce type de politique, les inspections sont effectuées à des intervalles de temps égaux. Lorsque le niveau de dégradation de l'équipement atteint un seuil d'alarme on effectue une maintenance préventive, par contre s'il atteint un seuil critique une maintenance corrective doit être effectuée. Dans ce cas on rencontre un problème d'optimisation à deux dimensions. Alors on effectue des inspections périodiques afin de ne pas dépasser le seuil d'alarme [20].

II.4.2.1.2 Politique d'inspection non périodique

On dit que l'inspection est non périodique quand la durée entre deux inspections consécutives est variable, dans le cas d'une dégradation uniforme, il est préférable d'étudier le rapport : intervalle d'inspection en fonction de niveau de dégradation obtenu, dans le but d'éviter des inspections inutiles pour des états peu dégradés ainsi effectuer des remplacements préventifs sur des périodes plus précises [21].

II.4.2.2 Classification selon la qualité d'information obtenue

II.4.2.2.1 Inspection parfaite

L'inspection parfaite donne l'état réel du système elle fournit des résultats avec une grande fiabilité, dans ce cas la probabilité de détection d'un défaut qui n'existe pas ou non détection d'un défaut existant est nulle. Les modèles proposés ci-dessus pour les deux politiques d'inspections périodiques et non périodiques sont basées sur l'hypothèse que l'inspection est parfaite.

II.4.2.2.2 Inspection imparfaite

Lors d'une inspection imparfaite, la dégradation dans les systèmes complexes ne peut pas être observée directement, donc la certitude des informations obtenue grâce à cette dernière n'est plus assurée, ce qui rend le rôle de l'opérateur plus important et la qualité de la mesure est affectée directement par les conditions de travail [5].

II.4.3 Exemples de politiques de maintenance

II.4.3.1 Première politique

On considère dans ce cas que les systèmes sont soumis à une inspection périodique avec un intervalle d'inspection (ΔT) et un coût d'inspection C_i . La prise de décision des actions de maintenance est basée sur le calcul de la durée de vie résiduelle (RUL).

Dans le cas d'un système défaillant, on effectue immédiatement un remplacement correctif de ce dernier, ce qui engendre des coûts de remplacement tel que, le coût de remplacement correctif C_c et le coût d'arrêt non planifié C_d .

Au moment de l'inspection T_i , Si le système fonctionne toujours le niveau de dégradation actuel et les RUL sont bien déterminés et on retrouve deux cas :

- Si $RUL > \Delta T$, le système n'exige aucune action de maintenance à effectuer et après ce ΔT on effectue l'inspection suivante.
- Si $RUL \leq \Delta T$, le système exige immédiatement une action de maintenance car le niveau de dégradation du système après maintenance est plus faible comparé à l'inspection précédente. Le coût de l'action de maintenance est de C_m , le coût d'arrêt associé est de C_s [22].

Dans cette politique le coût total de la maintenance est calculé comme suit:

$$C_t(t) = C_i.I(t) + (C_c + C_d).R(t) + (C_m + C_s).M(t) \quad (II.1)$$

Où : $I(t)$: la probabilité d'inspection, $R(t)$: la probabilité de remplacement corrective, $M(t)$: la probabilité d'avoir une maintenance imparfaite [22].

La figure II.2 représente l'organigramme de la première politique.

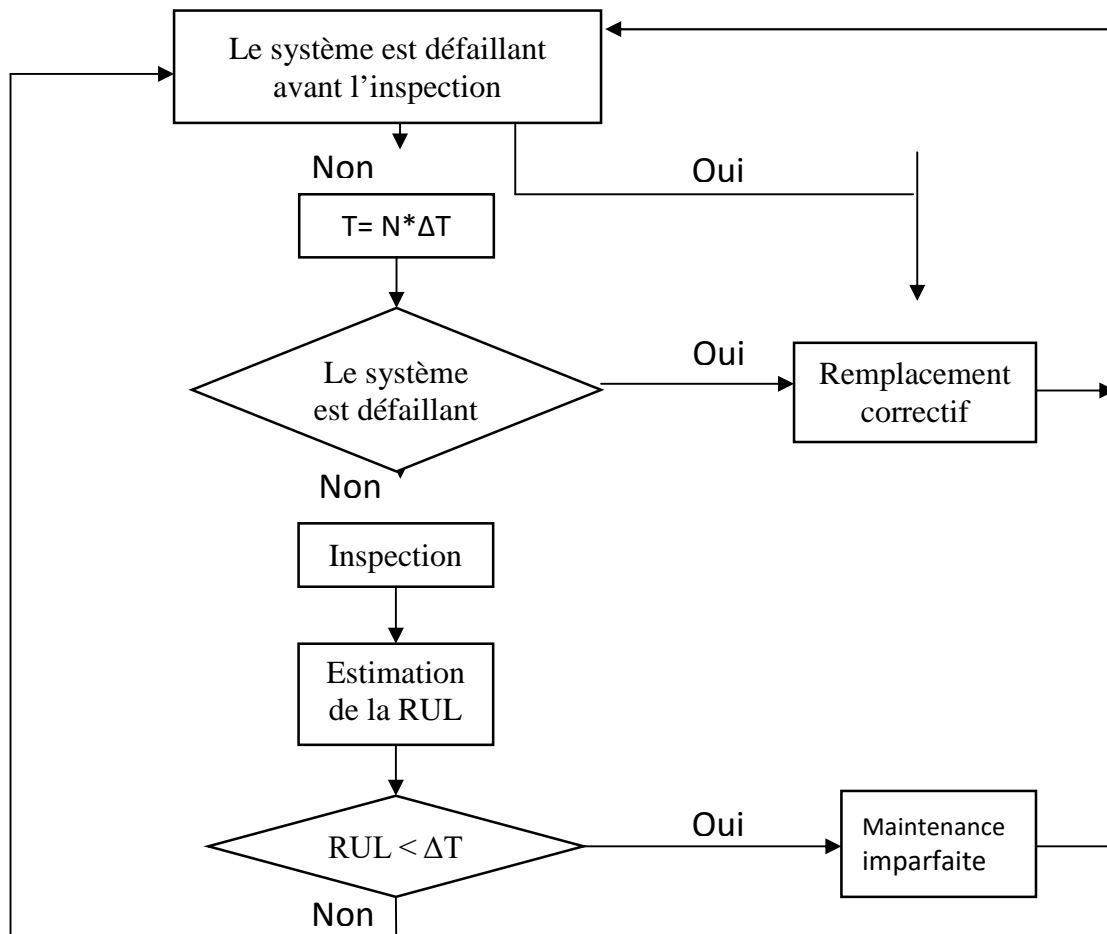


Figure II.2 : Organigramme de la première politique.

- Cette politique de maintenance est basée sur la RUL, c'est à-dire que les actions de maintenance sont prises en fonction du niveau de dégradation lors de la prochaine inspection. En plus de ça les actions de maintenance imparfaites sont prises en compte, ce qui fait que l'état du système après la maintenance se situe dans un état meilleur que vieux.

Cette politique de maintenance est une politique très généralisée dont les résultats ne sont pas toujours aussi fiables, elle ne s'applique pas pour la majorité des systèmes, il existe plusieurs d'autres politiques qui sont plus efficace en termes de précision et dans la détection des défaillances.

II.4.3.2 Deuxième politique

Dans le cadre de l'optimisation de la maintenance conditionnelle on utilise le niveau de détérioration du système pour décider des temps d'inspection et des actions de maintenance à effectuer. Donc la RUL du système est utilisée pour la prise de décision des activités de maintenance. Les actions d'inspection sont programmées à des intervalles réguliers, tel que, l'intervalle de temps entre deux inspections successives est une variable de décision à optimiser nommée ΔT .

Le coût d'inspection C_i et la durée d'inspection sont très petits par rapport à l'horizon de programmation donc ils sont négligeable.

Les règles de décision pour chaque instant discret T_i sont les suivantes :

- si le système est tombé en panne avant T_i . Un remplacement correctif sera effectué dès que les moyens de maintenance seront disponibles à $(T_i + \delta')$, tel que δ' est le temps de préparation pour la maintenance. Cette action de remplacement correctif à son tour prend un temps d' et un remplacement correctif coûte C_c . Un surcoût est induit par le temps d^i écoulé dans l'état défaillant avant T_i au taux de coût d'arrêt non planifié C_f^d ,
- si le système fonctionne toujours à T_i : Une action d'inspection est effectuée pour fournir le niveau de détérioration actuel du système qui est ajouté aux enregistrements de données. Sur ce, la RUL (T_i, Q) est estimée, avec Q étant comme un paramètre de décision à optimiser. On relève les deux cas suivant :
 - si $RUL(T_i, Q) > \Delta T$, aucune action de maintenance n'est effectuée, la prochaine heure d'inspection est $T_{i+1} = T_i + \Delta T$.
 - si $0 < RUL(T_i, Q) \leq \Delta T$, deux cas sont considérés :

- I) Si le nombre total d'actions de maintenance imparfaites exécutées k est inférieur à un nombre constant K ($k < K$), appelé seuil imparfait qui est une variable de décision à optimiser, dans ce cas la prochaine action préventive est imparfaite, donc toutes les ressources de maintenance nécessaires à l'exécution de la prochaine action imparfaite sont immédiatement commandées. La préparation prend le temps δ . Une action imparfaite sera alors effectuée à $T_i + \max(\text{RUL}(T_i, Q), \delta)$ et prend le temps d . Cette action peut réduire à la fois le niveau de détérioration et l'âge virtuel du système avec un coût de C_{ip} .
- II) Si $k \geq K$: la prochaine action préventive est parfaite afin de la réaliser on considère δ' le temps de la préparation des ressources de maintenance. Alors, une maintenance préventive parfaite sera effectuée à $T_i + \max(\text{RUL}(T_i, Q), \delta')$ et prend le temps d' avec un coût. C_p [23].

Selon cette politique la fonction objective de cout total est :

$$C_t = N_i(t).C_i + N_{ip}(t).C_{ip} + N_p(t).C_p + N_c(t).C_c + C_f^d.d(t) \quad (\text{II.2})$$

Où : $N_i(t)$: nombre d'inspections, $N_c(t)$: nombre de remplacement correctif, $N_p(t)$: nombre de maintenance préventive parfaite, $N_{ip}(t)$: nombre de maintenance imparfaite.

La figure II.3 représente organigramme de la deuxième politique.

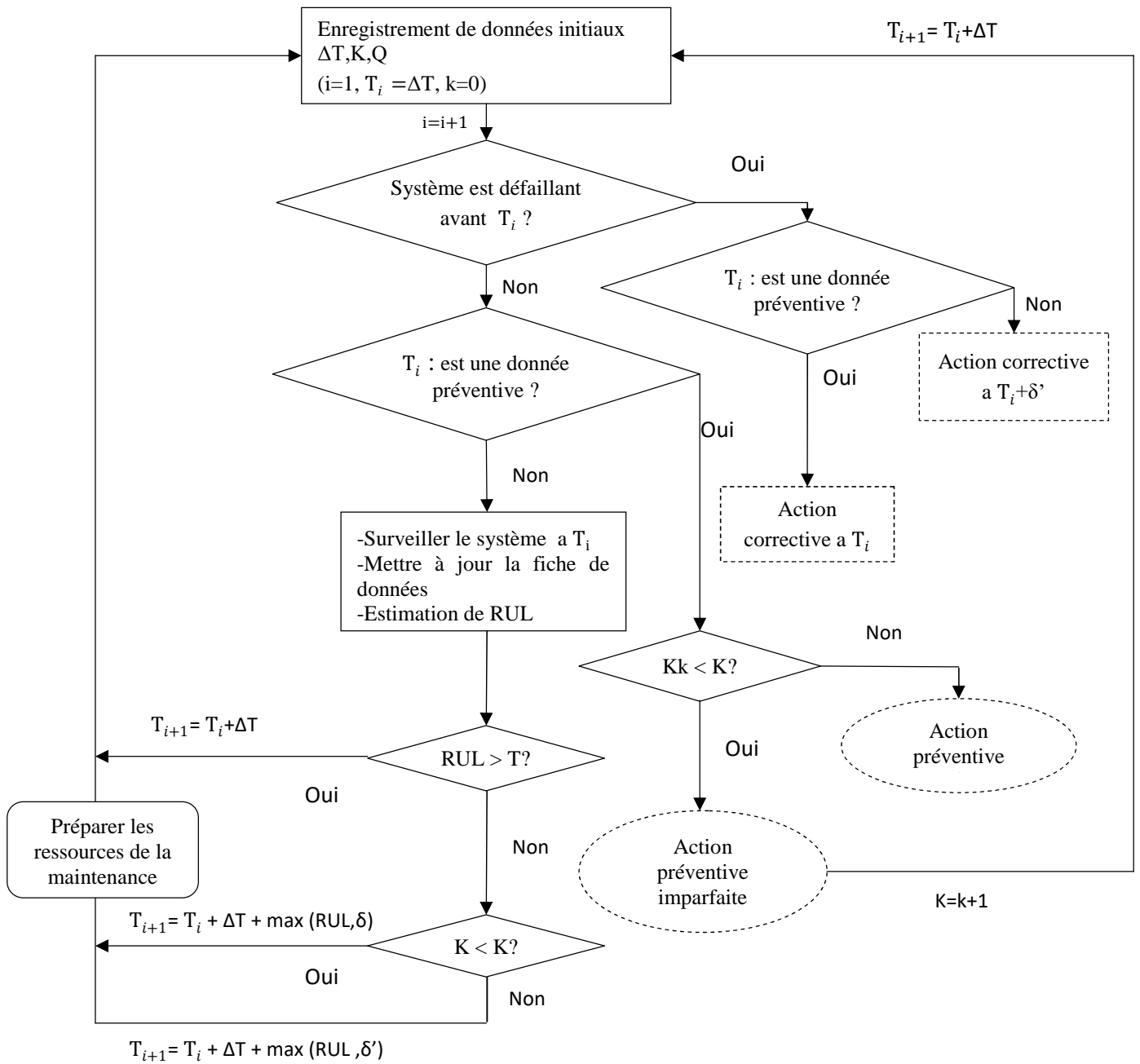


Figure II.3 Organigramme de la deuxième politique.

- Dans le cas de la maintenance conditionnelle, la décision de maintenance préventive est basée sur l'état observé du système, elle devient de nos jours une approche de plus en plus populaire dans les applications industrielles. Cette stratégie de maintenance a conduit à anticiper la panne. L'utilisation du pronostic est dédiée à la prévision de la RUL avant que la panne ne se produise.

Cette politique de maintenance est une politique très avantageuse dont les résultats sont plus fiables, elle est efficace en termes de précision et dans la détection des défaillances.

II.5 conclusion

Les politiques d'inspection effectuent des analyses importantes sur l'état des systèmes en vue des interventions de maintenance appropriées allant des interventions de maintenance préventive à des remplacements. L'objectif de service de maintenance est l'optimisation du coût en optimisant les temps d'intervention ainsi que les activités de maintenance afin d'exploiter au mieux la durée de vie résiduelle des équipements.

Dans ce deuxième chapitre nous avons donné quelques généralités sur la maintenance et les types de maintenance, puis nous avons défini la politique d'inspection et nous avons terminé par les politiques se basant sur la RUL.

Chapitre III

Optimisation de la maintenance d'un pipeline corrodé.

III.1 Introduction

Les pipelines qui assurent le transport des hydrocarbures sont souvent sujets de dégradation causée par la corrosion. Le service de maintenance doit adopter une politique de maintenance à la fois rigoureuse et optimale.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la politique de maintenance proposée afin d'optimiser l'intervalle de temps d'inspection et minimiser les coûts. Pour cela nous avons modélisé la perte d'épaisseur en fonction de temps et appliqué une maintenance préventive basée sur le pronostic.

III.2 Politique de maintenance proposée

En se basant sur les résultats d'inspection et le calcul de la durée de vie résiduelle, on s'est inspirés des deux politiques de maintenance détaillées dans le chapitre II et nous avons construit la politique de maintenance et d'inspection suivante :

Après avoir fait une inspection,

- Si le pipeline est défaillant nous allons effectuer une maintenance corrective, voir un remplacement complet de pipeline, ce qui nécessite un coût de défaillance C_d due à la perte de production (le coût d'arrêt non planifier + le coût correctif).
- Si le système n'est pas défaillant, nous allons déterminer le niveau de dégradation actuel du pipeline dans le but d'évaluer l'avancement de la dégradation et concevoir une base de données. Cette opération engendre un coût d'inspection C_i .
- En se basant sur les données collectées nous allons pouvoir estimer la durée de vie résiduelle de pipe et la prochaine action de maintenance va dépendre de résultat obtenu de cette dernière :
 - Si la RUL obtenue est supérieur à l'intervalle d'inspection, cela signifie que le pipeline demeure fonctionnel tout au long de cet intervalle d'inspection, dans ce cas nous n'allons entreprendre aucune action de maintenance jusqu'à la prochaine inspection.
 - Si la RUL obtenue est inférieur à l'intervalle d'inspection, cela veut dire que le pipeline est en état de dégradation avancé, donc il ne va pas tenir jusqu'à la prochaine inspection, alors nous allons faire une maintenance préventive immédiatement. Dans ce cas nous allons avoir un coût préventif C_p qui regroupe le coût d'arrêt planifié, le coût de préparation de la

maintenance et le coût de la perte de production durant le temps l'action de maintenance.

Le coût total représente la somme des coûts de maintenance dépensés pour un intervalle d'inspection, il est donné par la formule suivante :

$$C_T = \frac{C_i \cdot n_i + C_p \cdot P_p + C_d \cdot P_d}{T_i} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

C_T : coût total de la maintenance ; C_d : coût de défaillance ; C_i : coût d'inspection ;
 n_i : nombres d'inspections ; C_p : coût de la maintenance préventive ; T_i : durée de vie de système ($T_i = \Delta T \cdot n_i$) ; P_p : probabilité d'avoir une maintenance préventive ; P_d : probabilité de défaillance.

Cette politique est illustrée par l'organigramme de La figure III.1.

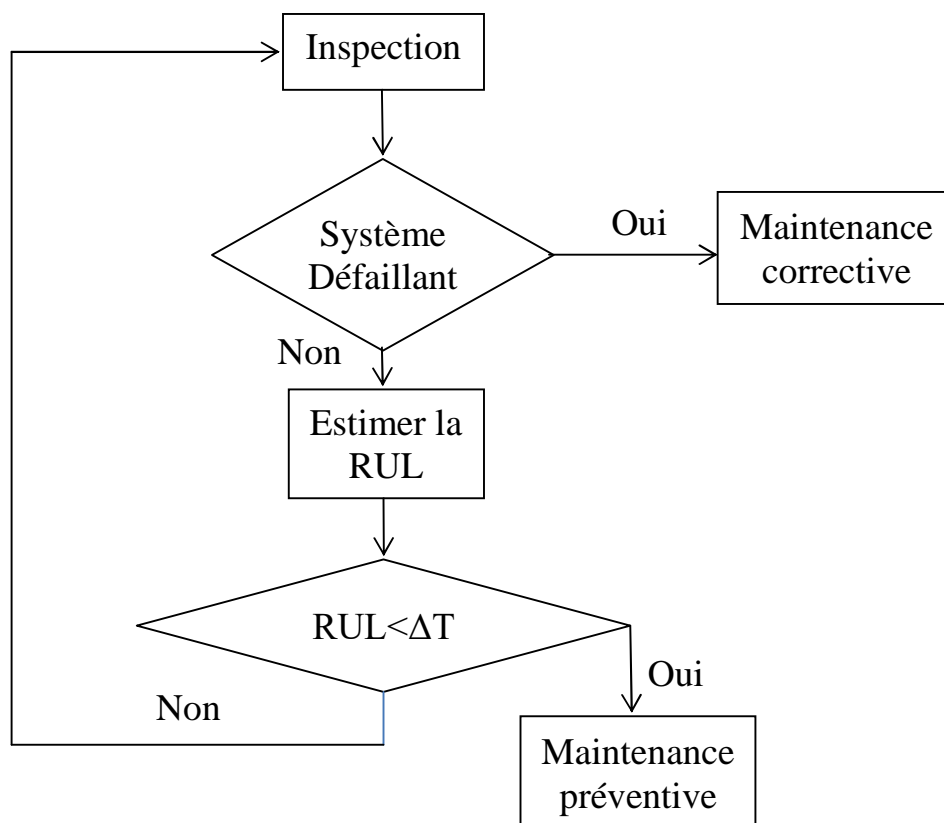


Figure III.1 Organigramme de la politique de maintenance.

- La mise en place d'une politique de maintenance nécessite une analyse rigoureuse de la dégradation, des moyens à mettre en œuvre, des coûts induits, des objectifs en disponibilité et en gain économique, des qualifications du personnel, des réticences des personnels et des conséquences sur l'organisation générale du service. La maintenance corrective engendre une perte importante d'heures de production, nécessite d'avoir des pièces de rechanges en stock, ce type de maintenance occasionne des coûts importants, diminue la disponibilité ainsi que la sécurité.

La maintenance préventive, consiste à intervenir sur un équipement à intervalles réguliers ou en fonction de critères prédéfinis. Son objectif premier est de réduire les risques de panne sur les biens, ce qui réduit la fréquence des arrêts de production et les arrêts des machines pour la réparation ; elle permet aussi de prévoir les interventions de maintenance corrective pour les réaliser dans les meilleures conditions, ce qui augmente la durée de vie des machines et des équipements tout en diminuant le budget de maintenance.

III.3 Description de la démarche d'optimisation

Dans ce qui suit nous allons exposer les démarches suivies pour l'optimisation de la politique de maintenance.

III.3.1 Modélisation de niveau de dégradation

Sous l'environnement de programmation et de simulation Matlab nous avons modélisé la courbe de la perte d'épaisseur en fonction de temps selon le modèle Paik, les actions d'inspection sont programmées à des intervalles réguliers, tel que, l'intervalle de temps entre deux inspections successives est une variable de décision à optimiser.

La figure III.2 illustre le niveau de la dégradation à $t = 50$ ans, après $t=50$ ans, nous avons généré des trajectoires afin d'estimer la durée de vie résiduelle.

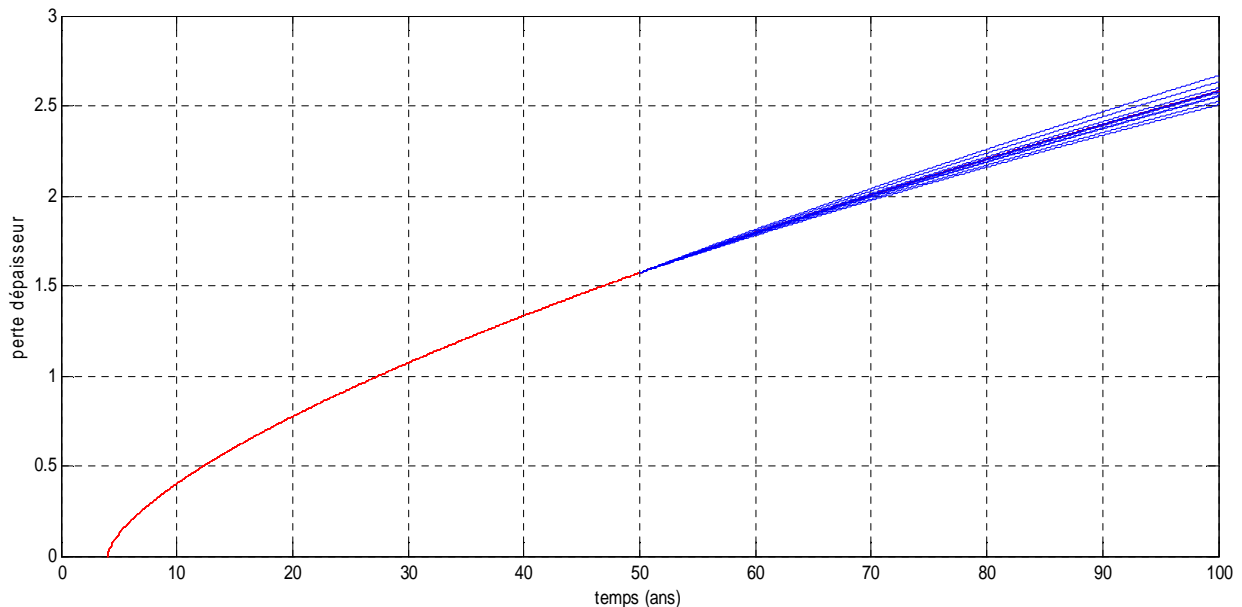


Figure III.2 Evolution de la perte d'épaisseur.

III.3.2 Estimation de la durée de vie résiduelle

Nous avons fixé un seuil de défaillance et nous avons enregistré les temps d'apparition de la défaillance qui correspondent aux instants de franchissement de seuil fixé puis nous avons déterminé la moyenne et la RUL. Nous allons comparer le ΔT à la valeur de la durée de vie résiduelle (RUL) obtenue lors de l'estimation pour pouvoir faire un choix sur la prochaine action de maintenance.

III.3.3 Optimisation de l'intervalle d'inspection ΔT

Dans le but d'estimer la valeur optimale de ΔT qui correspond à l'intervalle d'inspection où le coût de maintenance touche à sa valeur minimale, nous avons calculé les coûts totales de chaque action de maintenance adoptée puis les comparer entre eux pour retrouver le coût minimal.

III.4 Application

Nous sommes passés par 03 étapes pour trouver la périodicité d'inspection optimale et le coût minimal.

III.4.1 Première étape

Nous avons varié les intervalles d'inspection ΔT avec un pas de 10 et nous avons fixé un seuil de défaillance qui correspond à une perte d'épaisseur de 2.1 mm dans la paroi de pipeline et nous avons récupéré les instants de défaillance qui correspondent au temps de franchissement de seuil fixé. Nous avons estimé la durée de vie résiduelle de pipeline pour chaque inspection afin de décider quelle est la prochaine action de maintenance approprié. En s'appuyant sur Le Tableau III.1 qui illustre les valeurs des coûts de maintenance [6], nous avons calculé le coût total de cette action.

Tableau III.1 les valeurs des couts de la maintenance

Paramètres	Symbole	Valeur (UM)
Coût de défaillance	C_d	230 000
Coût d'inspection	C_i	3 500
Coût de préventive	C_p	10 400

Les résultats de cette partie sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.2 Les valeurs des coûts totales des intervalles d'inspection avec un pas de 10.

ΔT (ans)	C_T (UM)
10	498.5
20	4008.3
30	3891.6
40	5875.5
50	4670
60	3891.6
70	3335.7
80	2918.7
90	2594.4
100	2335

- Les résultats de ce tableau montrent que $\Delta T=10$ ans est l'intervalle d'inspection optimale et le coût total minimal de maintenance est $C_T = 498.5$ UM.

III.4.2 Deuxième étape

Dans cette étape nous avons pris des valeurs de ΔT aux alentours de 10 ans avec un pas de 5 soit ($\Delta T = 5$ et 15 ans). Les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau III.3, on remarque que ce sont les mêmes résultats que ceux de la première étape, donc l'intervalle d'inspection optimale est $\Delta T = 10$ ans.

Tableau III.3 Les valeurs des coûts totales des intervalles d'inspection avec un pas de 5.

ΔT (ans)	C_T (UM)
5	838.6
10	498.5
15	4066.6

III.4.2 Troisième étape

Pour avoir des résultats plus fiables et plus précis nous avons pris des valeurs plus proches de $\Delta T = 10$ ans avec un pas de 1, soit ($\Delta T = 5\ 6\ 7\ \dots\ 15$ ans), le Tableau III.4 donne les résultats obtenues.

Tableau III.4 Les valeurs des coûts totales des intervalles d'inspection avec un pas de 1.

ΔT (ans)	C_T (UM)
5	838.6
6	5375
7	747.6
8	5229.1
9	620
10	498.5
11	554.5
12	508.3
13	4692.3
14	4357.1
15	4066.6

La figure III.3 donne l'allure des coûts totales de maintenance en fonction de temps d'inspection.

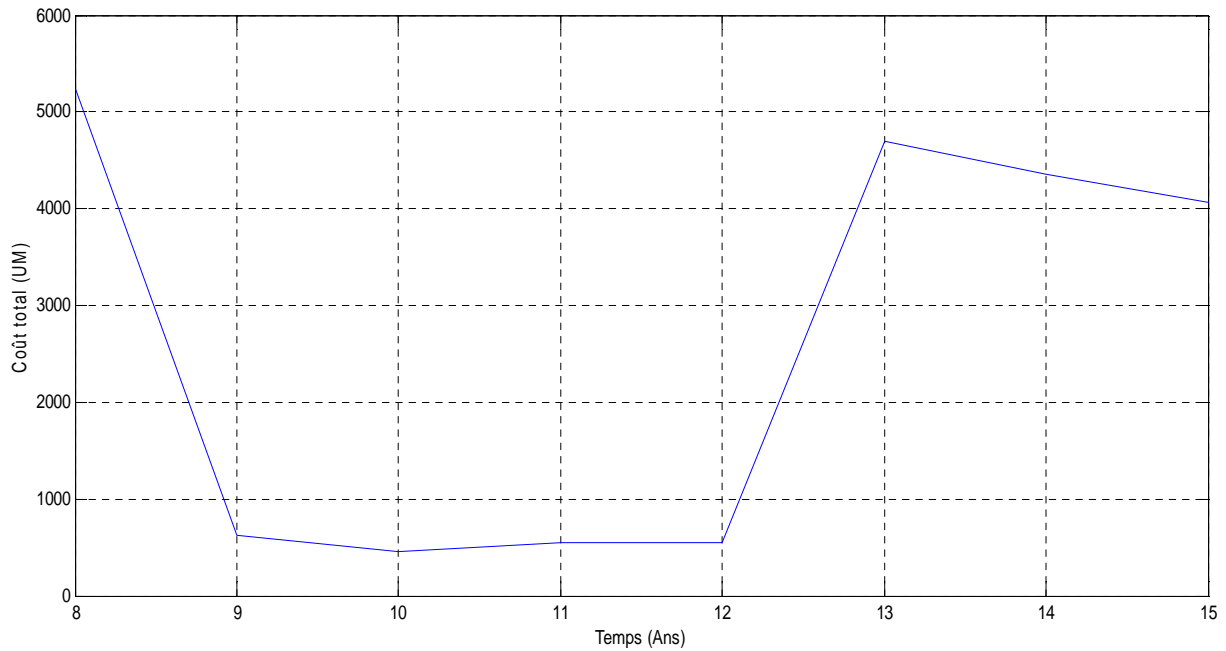


Figure III.3 La Courbe des couts totales en fonction de temps d'inspection.

On remarque que à $\Delta T = 8$ ans, les coûts de défaillances sont potentiellement très élevés (environ 5229 UM). à partir de $\Delta T = 8$ ans la courbe diminue progressivement pour atteindre son seuil optimale, à $\Delta T = 10$ ans un coût 498.57UM puis elle remonte graduellement.

- Les résultats représentés dans la figures III.3 et le Tableau III.3 montrent que l'intervalle d'inspection $\Delta T = 10$ ans est l'optimum ; son coût total $C_T = 498.57$ UM.

III.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté la politique de maintenance adoptée pour déterminer l'intervalle d'inspection optimale et le coût minimale d'un pipeline soumis à une dégradation par corrosion. L'optimisation de ΔT est basée sur les résultats d'inspection, la RUL estimée et les coûts associés à la décision de maintenance.

La RUL nous a permis de savoir quelles sont les actions de maintenance futures qui sont adéquates et appropriés pour qu'en suite calculer les coûts qui s'en suivent et retrouver l'intervalle d'inspection optimale.

Les résultats obtenue dans cette étude montrent que l'intervalle d'inspection $\Delta T = 10$ ans est l'intervalle d'inspection optimale avec coût total $C_T = 498.57$ UM.

Conclusion générale

Conclusion générale

De nos jours, la maintenance préventive est un sujet d'intérêt pour de nombreux travaux de recherche, de fait qu'elle permet d'élaborer des solutions pour pouvoir réduire considérablement les coûts de maintenance.

La planification des inspections joue un rôle fondamental dans l'élaboration d'une stratégie optimale de maintenance, car une mauvaise planification conduit à des erreurs de coût total et l'intervalle optimal entre inspections.

L'objectif de cette étude s'agit de proposer une politique de maintenance avec un intervalle d'inspection optimisé d'un pipeline se dégradant sous l'effet de la corrosion, pour cela nous avons exploité les modèles de la maintenance prédictive basés sur le pronostic dans modélisation et la simulation de la perte d'épaisseur en fonction de temps.

Les résultats obtenus constituent une aide à la décision pour la planification des prochaines opérations de maintenance avec un intervalle d'inspection optimale.

Dans cette étude nous avons proposé une politique de maintenance préventive basée sur le pronostic pour un pipeline se dégradant, comme perspective, il est jugé intéressant de rajouté un seuil correctif dans le but de prévenir les défaillances avant qu'elle se produise et ainsi remplacer définitivement la maintenance corrective qui engendre des pertes de temps, de production et de coût, par une maintenance préventive optimale.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] AFNOR NF EN 13306, Terminologie de la maintenance, Norme européenne, ISSN 0335-3931, juin 2001.
- [2] Dieter Landolt, Corrosion et chimie de surfaces des métaux, traiter des matériaux 1993.
- [3] L. Saghi, «Etude des paramètres de revêtement des aciers à chaud par le Zinc», Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2010.
- [4] D. Amoura, «Utilisation de couches de polymères, de copolymères et de terpolymères conducteurs (poly (3,4-éthylènedioxythiophène), poly (N-méthylpyrrole) et polyaciline) pour les super condensateurs et la protection contre la corrosion de l'acier», Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2017.
- [5] S.Sehaki et S.zaydi, «propriétés inhibitrice de l'extrait de la plante d'avoine vis-à-vis de la corrosion de l'acier au carbone en milieu NaCl 3 % », Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2012.
- [6] Y.SAHRAOUI, Optimisation des méthodes d'inspection des pipes. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2014.
- [7] R.E Melchers, 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.
- [8] C. Guedes Soares, Y. Garbatov, Reliability of maintained corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads. Marine Structures, 12 (6), 425-445, 1999.
- [9] J.K. Paik, J.M. Lee, Y.I. Park, J.S. Hwang, C.W. Kim, Time-variant ultimate longitudinal strength of corroded bulk carriers, Marine Structures, 16, 567-600, 2003.
- [10] J.K. Paik, A.K.Thayamballi, Y.I. Park, J.S. Hwang, A time-dependent corrosion wastage model for seawater ballast tank structures of ships. Corrosion Science, 46, 471-486, 2004.
- [11] 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.
- [12] A, Delmas. Contribution à l'estimation de la durée de vie résiduelle des systèmes en présence d'incertitude. Thèse de doctorat. Université de technologie de Compiègne, 2019.

Références bibliographiques

- [13] M. El Koujok. Contribution au pronostic industriel : intégration de la confiance à un modèle prédictif neuro-flou. PhD thesis, Université de Franche-Comté, France, 2010.
- [14] K. le Son. Modélisation probabiliste du pronostic - Application à un cas d'étude et à la prise de décision en maintenance. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, France, 2012.
- [15] E. Deloux. Politique de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant. PhD thesis, Université de Nantes, 2008.
- [16] R. Lesobre. Modélisation et optimisation de la maintenance et de la surveillance des systèmes multi-composants - Applications à la maintenance et à la conception de véhicules industriels. PhD thesis, Université de Grenoble, France, 2015.
- [17] S-P Qin, WC Cui. A discussion of the ultimate strength of ageing ships, with particular reference to the corrosion model, 216, 155, 160, 2002.
- [18] J. Heng. Pratique de la maintenance préventive (Mécanique, Pneumatique, Hydraulique, Electricité, Froid), Dunod, Paris. 2002.
- [19] L. Benali, Maintenance industrielle, 4860, OPU, septembre 2006.
- [20] X. Jia and A.H. Christer, A prototype cost model of functional check decisions in reliability-centred maintenance, Journal Operation Research Sociality 53 2002.
- [21] B. Castanier, C. Bérenguer, and A. Grall., A sequential condition based repair / replacement policy with non-periodic inspections for a system subject to continuous wear, Applied Stochastic Models Business and Industry 19, 327–347, 2003.
- [22] Remaining Useful Life Based Maintenance Policy for Deteriorating Systems Subject to Continuous Degradation and Shock 2018.
- [23] Remaining useful life based maintenance decision making for deteriorating systems with both perfect and imperfect maintenance actions 2013.

Résumé

Les pipelines sont un réseau de conduites conçu pour transporter des matériaux fluides tels que le gaz et le pétrole sur de longues distances. Cependant, dans des environnements défavorables, les tuyaux peuvent se dégrader en raison de la corrosion.

Afin de formuler une stratégie de maintenance stricte, la modélisation du processus de dégradation ainsi que les opérations d'inspection deviennent critiques. Dans ce travail, nous proposons une stratégie de maintenance basée sur la prédiction de la détérioration des canalisations sous l'action de la corrosion, dont l'objectif principal est d'optimiser l'intervalle entre les inspections pour réduire le coût total de maintenance.

Mots clés : Inspection, pipeline, corrosion, optimisation, dégradation, RUL.

ملخص

خطوط الأنابيب عبارة عن شبكة من الأنابيب مصممة لنقل المواد السائلة مثل الغاز الطبيعي والنفط لمسافات طويلة. ومع ذلك، في البيئات غير المواتية، يمكن أن تتدهور الأنابيب بسبب التآكل. من أجل تطوير استراتيجية صيانة صارمة، فإن نمذجة عمليات التدهور وتدابير التفتيش أمر ضروري. في هذا العمل، نقترح استراتيجية صيانة تستند إلى توقع تدهور تآكل خط الأنابيب. الهدف الرئيسي من هذه السياسة هو تحسين فترات الفحص لتقليل تكاليف الصيانة.

الكلمات المفتاحية: التفتيش، خط الأنابيب، التآكل، التحسين، التدهور.

Abstract

Pipelines are a network of pipes designed to transport liquid materials such as natural gas and oil over long distances. However, in unfavorable environments, pipes can deteriorate due to corrosion.

In order to develop a rigorous maintenance strategy, the modeling of degradation processes and inspection measures is essential. In this work, we propose a maintenance strategy based on the prediction of pipeline corrosion deterioration. The main goal of this policy is to optimize inspection intervals to reduce the maintenance costs.

Keywords: inspection, piping, corrosion, optimization, degradation, RUL.