

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane mira Bejaia



Faculté de la technologie

Département Génie électrique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master en électromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

**Estimation de la durée de vie résiduelle des
structures soumises à la dégradation par
corrosion**

Réalisé par :

Yettou Anis

Amari Celia

Encadré par :

Ait Mokhtar Elhassene

***Promotion
2020/2021***

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu Tout Puissant et aussi nous remercions notre encadreur Ait mokhtar Hassene pour sa disponibilité et ses efforts incessants pour rendre ce travail complet.

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

Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

**Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères à mes
yeux :**

**A ma chère mère, à mon cher père, qui m'ont soutenus et encouragés durant toute
ma carrière d'étude, rien ne peut récompenser leurs sacrifices. Que Dieu les garde
pour moi.**

**A mes chères frères Racim et Rayane, à mes chères sœurs Katia et Amel. Que Dieu
plus puissant garde notre fraternité et veille à qu'on soit bien soudés entre nous
pour le bonheur de nos parents.**

**A ma famille entière sans exception, qui m'ont beaucoup encouragé dans mes
études, à mes chères amis et camarades de la promotion maintenance industrielle
ainsi que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce
travail.**

Yettou Anis

Dédicace

Je dédie ce modeste à ma chère maman, à mon cher papa, qui m'ont soutenus et encouragés durant toutes ma carrière d'étude, rien puisse récompensera leurs sacrifices. Que dieu les garde pour moi.

A mes chers frères Yougurtha , Ilas et Imad. Que dieu plus puissant garde notre fraternité et veille à qu'on soit bien soudés entre nous pour le bonheur de nos parent.

A ma famille entière sans exceptions, qui m'ont beaucoup encouragé dans mes études, à mes chères amis et camarades de la promotion maintenance industrielle ainsi que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Amari Celia

Table des matières

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

Chapitre I : Généralité sur la durée de vie résiduelle

I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition de la durée de vie résiduelle	2
I.3. Estimation de la durée de vie résiduelle (Pronostic).....	2
I.3.1. Le pronostic basé sur les modèles physiques	4
I.3.2. Le pronostic guidé par les données statistiques.....	6
I.3.3. Le pronostic basé sur l'expérience	9
I.4. Conclusion	11

Chapitre II : modélisation du phénomène de corrosion

II.1. Introduction.....	12
II.2. La Corrosion.....	12
II.3. Modèles prédictifs de corrosion.....	13
II.3.1. Modèles empiriques.....	13
II.3.2. Modèles physico-chimiques.....	13
II.3.3. Modèles phénoménologique.....	14
II.3.1.1 Modèles de Guedes Soares et Gorbato.....	14
II.3.1.2 Modèles de Paik.....	16
II.3.1.3. Modèles de Qin et Cui.....	18
II.4. Conclusion.....	22

Chapitre III : Estimation de la durée de vie résiduelle d'un pipeline corrodé

III.1. Introduction.....	23
III.2. Description de la démarche.....	23
III.2.1 Application.....	23

III.2.2 Estimation de la dégradation à un instant (t)	23
III.2.3 Estimation de la durée de vie résiduelle à partir de l'instant (t).....	24
III.3 Application pour le modèle Guedes Soares.....	24
III.3.1 Estimation de la dégradation à l'instant d'inspection $t=25$ an.....	24
III.3.2 Estimation de la durée de vie résiduelle à partir de l'instant d'inspection.....	27
III.4 Application pour le modèle Paik.....	28
III.4.1 Estimation d'une perte d'épaisseur à l'instant $t=40$ ans.....	28
III.4.2 Estimation de la durée de vie résiduelle.....	30
III.5 Application pour le modèle de Qin et Cui.....	32
III.5.1 Estimation de la dégradation à l'instant $t=40$ ans.....	32
III.5.2 Estimation de la durée de vie résiduelle.....	34
III.5 Synthèse.....	35
III.6 Conclusion.....	37
Conclusion générale.....	38
Références bibliographiques.....	39

Liste des figures

Figure I.1 - Estimation de la durée de vie résiduelle moyenne du système après 90 jours de fonctionnement et intervalles de confiance à 95%.....	3
Figure I.2 - Classification des approches techniques pour le pronostic.....	4
Figure II.1 - Perte de métal dû à une corrosion profonde (interne/externe).....	13
Figure II.2 – évaluation de la dégradation selon le modèle de Guêdes Soares.....	16
Figure II.3 - évolution de la dégradation par corrosion selon le modèle de Paik.....	18
Figure II.4 - modélisation de la perte d'épaisseur selon le modèle de Qin et Cui.....	20
Figure II.5 - Illustration qui regroupe la modélisation de corrosion selon les trois modèles.....	21
Figure III.1 - Estimation de la perte d'épaisseur selon le modèle Guêdes Soares.....	25
Figure III.2 - La distribution aléatoire de l'échantillon (d) selon le modèle de Guêdes Soares.....	26
Figure III.3 - Illustration du seuil de défaillance selon le modèle Guêdes Soares.....	27
Figure III.4 - Distributions aléatoires de l'échantillon des instants d'apparition de défaillance selon le modèle de Guedes Soares	28
Figure III.5 - Illustration d'évolution de la corrosion selon le modèle de Paik.....	29
Figure III.6 - Distribution aléatoire de la variable (d) selon le modèle de Paik.....	30
Figure III.7 - Illustration du seuil de défaillance selon Paik.....	31
Figure III.8 - Distributions aléatoires des instants d'apparition de défaillance selon le modèle de Paik.....	32
Figure III.9 - Illustration d'évolution de corrosion selon le modèle de Qin et Cui.....	33
Figure III.10 - Répartition empirique de perte d'épaisseur selon le modèle de Qin et Cui.....	34
Figure III.11 - illustration du seuil de défaillance selon le modèle de Qin et Cui.....	35

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau III.1 paramètres du modèle de Guèdes Soares et Gorbatov.....	24
Tableau III.2 coefficient du modèle de Paik.....	29
Tableau III.3 paramètres relatifs au model de Qin et Cui.....	33
Tableau III.4 Comparaison entre les résultats obtenus selon chaque modèle.....	34

Introduction générale

Dans le domaine industriel, la maîtrise des coûts de production tout en assurant un niveau de qualité désiré constitue un défi clé dans ce domaine. L'un des objectifs majeurs des industriels est de minimiser au maximum les coûts élevés induits par les inconvénients de la maintenance corrective (arrêt de la production pendant une période indéfinie, remplacement inutile de pièces de rechange, dégâts matériels et humains imprévus, etc.) qui peuvent générer des pertes considérables.

Afin de remédier aux problèmes, nous passons à la maintenance prédictive. Cette maintenance est basée principalement sur le pronostic qui est l'estimation du temps de fonctionnement avant défaillance (durée de vie résiduelle) d'un équipement.

Dans ce cadre, ce travail a pour objectif de développer une procédure complète pour la modélisation prédictive de dégradation par des modèles empirique, avec estimation de l'instant de défaillance.

Le premier chapitre donne une généralité sur la durée de vie résiduelle, ainsi que les approches principales pour l'estimation de la durée de vie. Le deuxième chapitre détaille les modèles prédictifs de corrosion existants, le troisième chapitre est une application pour les modèles prédictifs de la corrosion afin d'évaluer la dégradation d'un pipeline par corrosion, et estimer la durée de vie résiduelle du pipeline.

I.1. Introduction

Dans les années précédentes, le concept de maintenance se traduisait par diagnostic après panne, c'est ce qu'on appelle actuellement la maintenance curative. L'application en situation imprévue de cette politique de maintenance faisait remarquer aux industries d'importants surcoûts en terme de finance, qui sont dues aux longs arrêts de production causés par l'incapacité de planification d'un bon plan de maintenance au moment de défaillance. Afin de pouvoir minimiser ces surcoûts et maximiser la disponibilité des équipements au sein des chaînes de production, les fiabilistes ont pensé à l'amélioration d'une nouvelle stratégie de maintenance permettant de planifier des plans de maintenance avant l'apparition de défaillance et avec un pouvoir de prédire l'instant d'apparition de la défaillance. Cela a mené à l'apparition de la maintenance préventive (systématique, conditionnelle, prévisionnelle).

Dans ce premier chapitre, nous effectuons une étude sur les trois modèles les plus utiles dans l'application d'une politique de maintenance prévisionnelle.

I.2. Définition de la durée de vie résiduelle

Remaining Useful Life (RUL) en anglais, 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 [1].

I.3. Estimation de la durée de vie résiduelle (Pronostic)

Afin de pouvoir réaliser l'objectif d'application d'une stratégie de maintenance prévisionnelle, qui est basée sur la surveillance d'état de dégradation d'un système, ou l'un de ses composants avec prédiction des anomalies, il est indispensable de pronostiquer l'état futur de ce système qui est une étape essentielle et nécessaire en maintenance prévisionnelle. D'après [2] « le Pronostic est l'analyse des symptômes des défauts dans l'intention de prédire l'état futur et la survie en fonction des paramètres de conception », ça signifie que le pronostic consiste en une supposition sur le futur d'un système à partir d'une information passée, présente et future, en but d'estimer la durée de vie résiduelle (RUL) des composants ou sous-composants sélectionnés, c'est-à-dire le temps de fonctionnement restant avant que le composant tombe en panne. Comme il a été expliqué dans [1], il est nécessaire de répondre à de nombreuses questions bien précises pour pouvoir estimer la durée de vie résiduelle, et qui sont comme suit :

- Le composant est-il dans un état dégradé ?
- Quel mode de défaillance a initié la dégradation ?
- Quel est l'état d'avancement de cette dégradation ?
- A quelle vitesse évolue la dégradation et combien de temps reste-t-il avant d'atteindre la défaillance ?
- Quels nouveaux événements peuvent modifier l'évolution de la dégradation (par exemple ralentir ou accélérer le processus) ?
- Quels autres facteurs peuvent affecter l'estimation de la RUL et comment (par exemple : le type de modèle, le bruit dans les données, les incertitudes) ?

La figure I.1 représente un exemple sur l'estimation de la durée de vie résiduelle [3].

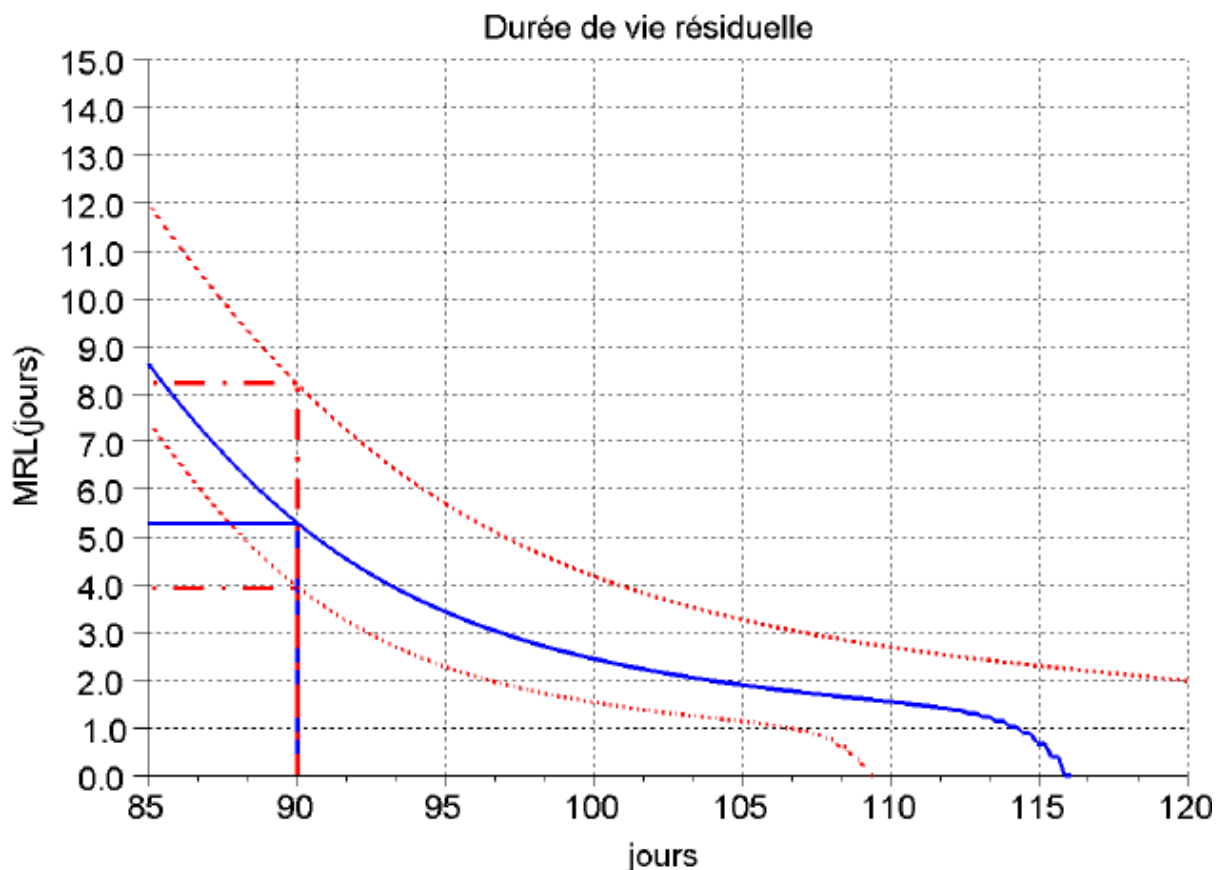


Figure I.1 - Estimation de la durée de vie résiduelle moyenne (MRL) du système après 90 jours de fonctionnement et intervalles de confiance à 95%.

Depuis des dizaines d'années des études qui ne cessent pas de développer des méthodes testées et améliorées au fil des avancées technologiques pour un meilleur pronostic [1], ce qui induit à distinguer les trois approches principales pour l'estimation de la durée de vie résiduelle ou méthodes de pronostic [4] que nous détaillerons plus tard :

- 1- Approche basée sur la modélisation physique des processus de défaillance.
- 2- Approche basée sur les données ou la surveillance d'indicateur d'état.
- 3- Approches basées sur l'expérience.

La figure I.2 présente l'étendue des approches de pronostic en fonction de leur applicabilité à différents systèmes [15]:

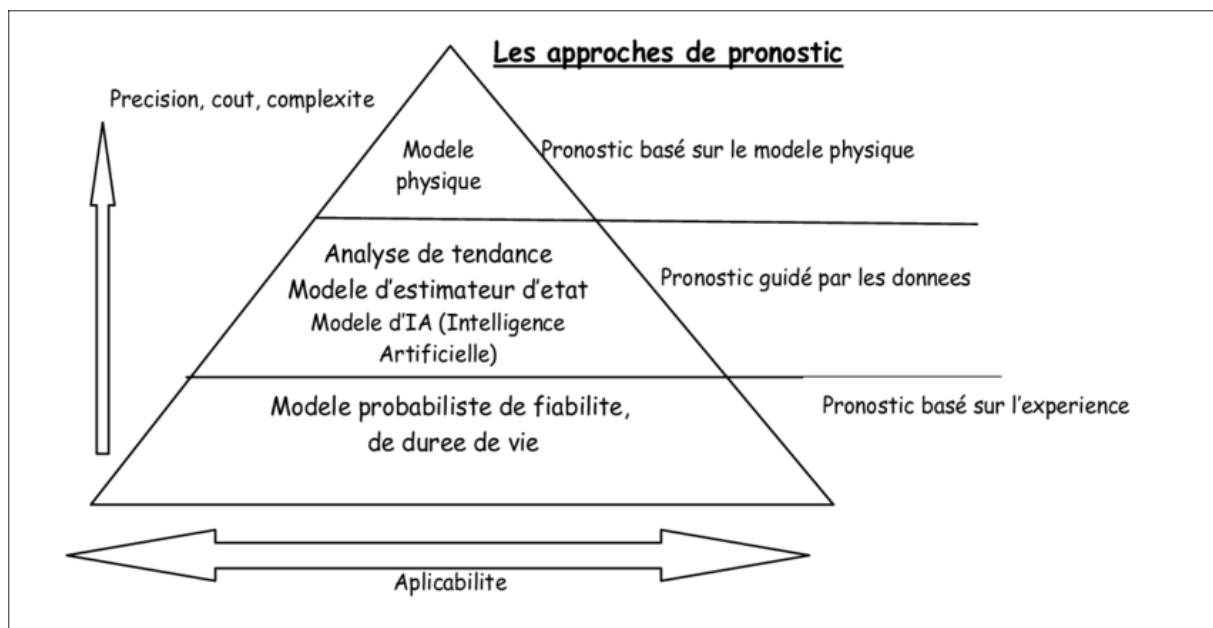


Figure I.2 - Classification des approches techniques pour le pronostic

Dans la suite, nous détaillerons plus précisément chacune de ces 3 approches, avec quelques exemples.

I.3.1. Le pronostic basé sur les modèles physiques

Les modèles physiques sont des méthodes de pronostic qui sont conçues pour la modélisation des mécanismes de défaillance des équipements, et la physique de dégradation des systèmes moins complexes [1], qui s'appuient sur des modèles issues des lois physiques ou des modèles de simulation (représentation mathématique d'un mécanisme de dégradation construit par expérimentation) [5]. Le but est pouvoir tracer l'ensemble des processus de dégradation des composants et mettre à jour les paramètres du modèle grâce au données récoltées par mesurage.

Ce basé sur un model, les méthodes pourraient intégrer à la fois des connaissances d'experts et informations provenant des tests expérimentaux. Par avantage, leur fonctionnement est favorable dans l'estimation de la durée de vie résiduelle, et nécessitent également moins de données historiques ce qui est avantageux dans leur utilisation [7].

Leur application nécessite d'avoir une connaissance du phénomène de dégradation (de son évolution et du seuil critique) [4], et une compréhension du mode de fonctionnement du système à analyser, et ses modes de défaillances. Après avoir obtenu des modèles bien pertinents, on les exploite pour décrire et suivre au cours du temps, le comportement du système et l'évolution de sa dégradation qui est représenté par un ou plusieurs paramètres, dont leur variation affecte la dynamique et le comportement global du système [6]. Ces modèles de dégradation, sont des modèles mathématiques qui décrivent l'évolution de la dégradation au cours de temps, pour un système fonctionnel, et qui permettent aussi de modéliser l'état dans lequel peut se trouver un système de production. Cette dégradation conduit dans la plupart du temps à la diminution de la performance du système, et quand son niveau atteint un certain seuil, cela provoque la défaillance du système [8]. D'après la littérature, pour modéliser un processus de dégradation au cours du temps, deux mécanismes sont nécessaires : le premier consiste à utiliser une distribution existante des durées de vie du système, alors que le deuxième mécanisme consiste à contrôler le phénomène physique (corrosion, érosion, etc.) qui provoque la défaillance [8]. Chaque discipline scientifique possède ses propres mécanismes de dégradations et donc ses propres modèles.

En général, la construction d'un modèle de dégradation, exige l'identification d'un ou plusieurs paramètres qui sont spécifiques au système, et qui permettent de le décrire. Après avoir construit ce modèle, ces paramètres sont mesurés au cours de l'utilisation du système, et sont comparés aux sorties du modèles. Les différences entre les données réelles et les sorties du modèles permettent de détecter une panne : une faible différence indique un état de fonctionnement normal, tandis qu'une grande différence indique l'apparition prochaine d'une panne. Le principal avantage du pronostique basée sur les modèles physiques, est la possibilité d'incorporer directement la compréhension de phénomène physique responsable de la dégradation [1]. Mais par contre l'un des inconvénients de ce modèle, réside dans ses limitations face aux systèmes complexes, on a bien vu avant que pour utiliser les méthodes

des modèles physiques, une compréhension globale du comportement du système est nécessaire plus sa modélisation, alors que plus le système est complexe, plus il est compliqué d'avoir une compréhension physique des phénomènes qui entrent en jeu lors de sa dégradation, par exemple les méthodes basées sur les modèles peuvent ne pas convenir pour traiter les pronostics des machines rotatives dans les scénario suivant : (1) modèles de défaut machines varient selon les conditions de fonctionnement, (2) le système mécanique est si complexe que la compréhension des principes de fonctionnement du système n'est pas simple et développer un modèle précis est d'un coût prohibitif [7]. Donc le pronostic basé sur les modèles dans la plupart des cas est utilisé que pour des cas bien spécifiques, et pour des défaillances bien connus et dans des systèmes relativement simples [1].

A titre d'exemple pour l'application de ce type de technique, on peut citer le pronostic basé sur un modèle physique appliqué pour un problème de corrosion. Malgré l'évolution des moyens de protection pour les matériaux contre ce problème. La corrosion est la cause de nombreuses dégradations. Il existe une loi générale permettant de modéliser le taux d'usure par corrosion :

$$D(t) = Ct^n \quad (I.1)$$

Avec $D(t)$ la profondeur d'usure en fonction du temps, C le taux effectif de corrosion, et n un coefficient dépendant des propriétés du matériau et du milieu.

Pour estimer la durée de vie résiduelle du système dégradé par corrosion, il est nécessaire de calculer sa durée de vie résiduelle par la loi suivante [9]:

$$MLR(t) = \frac{1}{R(t)} \int_t^\infty R(t) dt \quad (I.2)$$

Où $R(t)$ est la fonction de fiabilité. Soit $f(t)$ fonction de la densité de probabilité, alors

$$R(t) = \int_t^\infty f(t) dt \quad (I.3)$$

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (I.4)$$

I.3.2. Le pronostic guidé par les données statistiques

Le pronostic guidé par les données (ou « data-driven » en anglais), est l'une des approches de pronostic les plus appliquées dans les actions de maintenance prédictive, c'est pour une raison de leur simplicité d'exploitation, et leurs faibles couts d'implémentation et le peu de connaissances intrinsèques de l'équipement qu'elles requièrent, par rapport aux approches basées sur les modèles physiques qui exigent une connaissance profonde de la physique du phénomène de dégradation, et ce n'est le cas pour cette approche [1]. En effet cette méthode est basée sur un processus de surveillance des données, pour construire des indicateurs d'états qui permettent de suivre l'état d'avancement d'une dégradation, dont l'évolution futur est déterminée soit par une méthode d'analyse de tendance, soit par une méthode d'apprentissage.

La méthode consiste à évaluer l'état de santé d'un système et l'estimation de sa durée de vie résiduelle à partir des données disponibles, en plus toutes les informations disponibles sur le système, peuvent aider à décrire facilement les mécanismes de dégradation qui font sujet de la problématique. Pour l'indicateur comme est défini dans [1] « est une grandeur reflétant une caractéristique de la santé, qu'elle soit de performance ou de dégradation. Il permet de quantifier la déviation par rapport au mode de fonctionnement nominal ».

Ce type de pronostique se fonde sur l'hypothèse que les caractéristiques statistiques des données sont relativement invariables, à moins qu'un dysfonctionnement ne se produise dans le système, et permet de redonner sens aux données bruitées par des informations claires et précises, reflétant l'état réel du système pour une bonne prise des décisions en pronostic [10].

Les approches basées sur les données sont favorisées en grande partie, pour des équipements qui offrent une grande disponibilité de leurs données historiques, mais au même temps qui sont limités dans leur capacité de connaître leur physique de dégradation. Il peut aussi être préférable d'utiliser ce type d'approche lorsque la physique de dégradation est complexe, comme le cas où la propagation des mécanismes de défaillances menant au mode de défaillance est fortement corrélée [5]. Son principe repose sur l'idée de se concentrer à la collecte des informations et des données sur le système, puis les projeter afin d'envisager une évolution future de certains paramètres descripteurs ou caractéristiques, donc de prévoir les éventuelles erreurs probables.

D'après [1] le pronostic guidé par les données peut être divisé en deux catégories : les modèles statistiques et stochastiques, et les réseaux de neurones artificiels

A) Les modèles statistiques et stochastiques :

Dans ces modèles, on peut représenter mathématiquement les temps avant défaillances, par un calcul de la densité de probabilité à raison que ces modèles, soient basées sur l'hypothèse que ces temps avant défaillances des composant non distinct, peuvent être considéré comme des variables aléatoires identique et non relatives. On peut décrire par un ou plusieurs indicateurs de dégradation, l'état de santé du composant à étudié, et on peut considérer cette notion comme l'aspect principal de ces modèles.

Après un processus de surveillance, on a pu sélectionner quelques données pour les analyser, afin de pouvoir estimer ou déterminer l'état de santé actuel du composant. L'estimation de l'état de santé repose sur deux phase : une phase d'apprentissage qui nécessite de préciser le point centrale des classes, et construire un modèle qui peut modéliser le cycle de vie d'un système, à partir des résidus sur des cycles complets de dégradation, et une phase d'exploitation qui dépend de la phase d'apprentissage, c'est-à-dire elle exploite le modèle construit et les points centrales des classes [1]. L'estimation est réalisé par la recherche de la séquence d'états, à l'aide de l'algorithme de viterbi [6]. La dégradation du composant est considéré dans ce modèle, comme un enchainement successive d'états, depuis sa mise en service jusqu'à son état de panne, et cela nécessite de décrire les lois de passages d'un état à l'autre, alors on distingue 2 classes de modèles : ceux qui décrivent une dégradation et ceux qui décrivent une dégradation discrète.

B) Les réseaux de neurones artificiels :

Un réseau de neurone artificiel (ANN) est un traitement de l'information paradigme, inspiré de la manière dont le cerveau humain traite une information. L'efficacité capacitaire d'un ANN à l'apprentissage, et à la généralisation des relations non linéaires entre les données d'entrées et les données de sorties, leur permet de fournir un mécanisme flexible d'apprentissage, et reconnaître les défauts du système [7], sont aussi efficace à modéliser des systèmes complexes, ce qui est comme leur principal avantage, même avec une limitation de jeux de données peuvent adapter de bonne solution [1]. Ils ont été établis comme une puissante technique d'intelligence dans le diagnostic des défauts rotation machinerie.

Le diagnostic des pannes à l'aide des classificateurs ANN, peut largement augmenter la fiabilité des méthodes de diagnostic des pannes. L'ANN est organisé par des multicouche (MLP) qui est composé des unités (nous les appelons aussi neurones), qui sont connectés les une aux autres à l'aide de bords dirigés (appelés aussi synapses), chaque couche reçoit les informations issues de la couche suivante, pour plus de détail consulter ce livre [7].

En fin l'avantage des modèles guidés par les données est qu'ils sont applicables à un grand nombre de systèmes, surtout pour des systèmes complexes comme le moteur d'avion, et leur inconvénient principal est que leur efficacité dépend de la qualité et la quantité des données disponibles.

I.3.3. Le pronostic basé sur l'expérience

La fiabilité statistique est la troisième approche du pronostic, appelée aussi pronostic basé sur l'expérience ou basé sur la probabilité, qui est aussi importante à appliquer pour l'estimation de la RUL dans des situations bien précises, la preuve malgré l'utilité efficace des deux méthodes précédentes (Modèles basés sur la physique de dégradation, et les modèles basés sur les données), il s'avère que dans des situations où c'est impossible, de modéliser physiquement le phénomène de dégradation d'un système, ou quand c'est compliqué de procéder à un processus de surveillance du système, par installation des capteurs pour l'estimation de la dégradation, alors dans ces cas un pronostic basé sur le retour d'expérience est bien recommandé.

Cependant, cette approche est la mieux adaptée aux systèmes complexes difficiles à modéliser par des modèles physiques, ou lorsque les données de surveillance sont moins fiables. La condition de cette forme de pronostic est dans sa nécessité de données historiques de défaillances, une base de connaissance ou données issues d'expertise sur le composant étudié. La modélisation de dégradation dans cette approche se fait d'une manière stochastique ou probabiliste, ou sur base de modèles fiabilistes [10]. Cette forme est préconisée pour des équipements dont la probabilité d'atteinte d'une défaillance est très élevée, avec un manque de moyens préventifs. Son principe consiste à mettre en place des modèles probabilistes, ou stochastiques construits : à base des données de retour d'expérience, l'ensemble de connaissances accumulées pendant l'expertise pendant le long cycle de vie de l'équipement, c'est-à-dire la période de son exploitation. Le but c'est d'estimer la fiabilité du système par l'analyse de retour d'expérience sur un ensemble de composants identiques.

Grâce à leur expérience sur la connaissance des modes de défaillances et leurs causes, ce type de pronostic permet une prise de décision immédiate en cas de changement inattendu du système étudié [1, 5, 10]. Les modèles probabilistes peuvent venir sous forme de processus stochastiques, qui peuvent être markovien ou semi-markovien, ou sous forme de fonctions de probabilités. Pour le cas des fonctions, celles plus utilisées sont la loi Exponentielle et la loi Weibull.

La loi exponentielle est utilisée spécifiquement lorsque le taux de défaillance est supposé constant, ce qui nous fait comprendre que la dégradation du système est très faible ou presque nulle. Donc la probabilité de défaillance est indépendante du temps de fonctionnements déjà écoulé, alors la loi de fiabilité suit la forme suivante :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (I.5)$$

Où le taux de défaillance λ constant. La RUL est estimée par cette forme :

$$R(t) = \frac{\int_t^{\infty} R(t) d(x)}{R(t)} = \frac{\int_t^{\infty} e^{-\lambda x} d(x)}{e^{-\lambda t}} = \frac{1}{\lambda} \quad (I.6)$$

La simplicité de ce modèle permet aux experts de simplifier les calculs de fiabilité. Si on veut focaliser sur le vieillissement du système étudié, on s'appuie sur un modèle à base de loi de Weibull ou la loi Gamma.

L'avantage principal des approches basées sur l'expérience est leur facilité d'application dans une politique de maintenance prévisionnelle, tellement elles n'exigent pas des conditions nuisibles telles que l'installation des capteurs, ou la connaissance de la physique de dégradation, ce qui fait que sont moins coûteuses en terme de finance. Leur inconvénient c'est qu'elles nécessitent une quantité considérable de données d'historique de pannes, pour estimer les paramètres des lois utilisées, par conséquent ce type d'approche ne peut être appliqué sur de nouveaux systèmes qui n'offre pas de données issues, et l'autre inconvénient est que leurs résultats offrent que des estimations globales sur l'ensemble des composants identiques, et pas de vrai RUL. Donc on voit que ces modèles manquent de précision par rapport aux autres modèles présentés dans ce chapitre.

I.4. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons donnée une idée générale sur la durée de vie résiduelle, où nous avons expliqué son estimation par des moyens de pronostics. Pour pouvoir estimer cette durée de vie résiduelle, faut mettre quelques points essentiels en considération comme : la dégradation, l'état d'avancement dans un composant et la vitesse d'évolution de cette dégradation. Alors pour de bonne solution, il est nécessaire de répondre à de nombreuses questions qui sont précisés dans ce chapitre.

Ce chapitre présente les trois méthodes pour la réalisation d'un pronostic, qui sont classée comme suit : - le pronostic basé sur les modèles physique, qui nécessite une connaissance parfaite de la physique de phénomène de dégradation – le pronostic basé sur les données, qui s'appuie sur une surveillance de cycle de vie d'un système par installations des capteurs - le pronostic basé sur l'expérience qui s'applique uniquement sur des systèmes ayant des données issues d'un historique de panne.

II.1 Introduction

Le phénomène de dégradation est l'une des contraintes les plus nuisibles pour les secteurs industriels, qui en implique de forte perte sur plusieurs plans, que ce soit sur le plan financier, matériel ou de main d'œuvre...etc. La corrosion est l'une des causes de nombreuses dégradations, surtout dans des systèmes de transport souterrain des matières fluides (pipelines), et malgré l'évolution des moyens de protection pour les matériaux contre ce problème, mais il est toujours présent en tant que phénomènes de dégradation au point où les spécialistes comme Guedes Soares, Paik et Qin et Cui, pensaient strictement à de véritables solutions permettant de minimiser les conséquences dévastatrices de ce phénomènes, des conséquences qui se voyait comme un obstacle majeur pour l'évolution des entreprises. Malgré la perfection des études et de recherches, la corrosion reste impossible à en débarrasser définitivement, alors nous recourons la modélisation prédictive par des méthodes d'évaluation de la dégradation par corrosion [9,11].

Dans ce chapitre, nous allons expliquer les trois modèles prédictifs les plus utiles pour la modélisation du phénomène de dégradation par corrosion.

II.2 La Corrosion

Dans les domaines industriels, la corrosion est considérée comme un phénomène de dégradation important, qui se manifeste par oxydation du métal ou perte de matière comme c'est le cas dans les pipelines. La norme ISO 8044 définit la corrosion comme suit : « La corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs ... ».

La figure II.1 montre un pipeline sous à la corrosion :



Figure II.1 - Perte de métal dû à une corrosion profonde (interne/externe)

Pour les types de corrosion y a : la corrosion chimique, la corrosion électrochimique et la corrosion bactérienne. Le processus de corrosion se fait par deux réactions : zone de réaction cathodique avec réduction, zone de réaction anodique avec oxydation.

II.3 Modèles prédictifs de corrosion

Dans cette partie, nous expliquerons les trois modèles les plus utiles pour décrire la progression de la corrosion et qui sont classée en trois groupes [11]:

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

Dans la suite de cette partie, nous concentrerons sur les modèles empiriques en détaillant trois sous modèles de ce dernier avec exemples.

II.3.1 Modèles empiriques

Les modèles empiriques sont des modèles basés uniquement sur l'observation, l'exploitation de l'expérience et des contestations qui en découlent. La principale qualité de ces modèles réside dans sa facilité de formulation, à l'inverse leur défaut principal est qu'ils sont valables que dans le cadre strict où ils ont été établis. Ces modèles comprennent plusieurs types, mais dans notre cas, nous nous concentrerons sur les trois modèles suivants : les modèles de Guèdes Soares et Gorbatoov – modèles de Paik – modèles de Qin et Cui.

II.3.2 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 :

$$k - \frac{P}{V_P} \left(1 - \exp \left(-\frac{V_P k}{P} \right) \right) = V_P \tau \quad (\text{II.1})$$

Avec :

K : perte d'épaisseur de métal (pm)

τ : Temps d'exposition (année)

P : coefficient caractérisant les propriétés protectrices de la couche de produit de corrosion (pm²/an)

V_P : vitesse de corrosion à long terme (pm/an)[11].

II.3.3 Modèles phénoménologiques

Melcher a montré qu'il existe des différences de comportements, entre l'évolution de la perte d'épaisseur selon l'observation, et la perte obtenu à l'aide des modèles prédictifs. Ceci explique la réalité du non pris en compte de certains mécanismes dans les modèles de corrosion, comme c'est le cas pour la corrosion bactérienne

Un modèle phénoménologique était proposé par Melcher, qui s'inscrit dans un contexte probabiliste, dans le but de considérer des principaux mécanismes de corrosions de l'acier, en fonction de la durée d'exposition et d'insérer les variables de la perte d'épaisseur à la surface corrodé [11].

$$C(t, E) = b(t, E) \cdot f_n(t, E) + \mathcal{E}(t, E) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$C(t, E)$: Perte d'épaisseur en fonction du temps et du vecteur E qui contient les facteurs environnementaux de corrosion (mm)

$f_n(t, E)$: Perte d'épaisseur moyenne (mm)

$\mathcal{E}(t, E)$: Variabilité de la perte d'épaisseur (mm)

$b(t, E)$: Biais (erreur de modèle)

t : Temps (année)

E : Vecteur des facteurs environnementaux de corrosion (facteur physique, chimique et biologique)

II.3.1.1 Modèles de Guedes Soares et Gorbatov

Ce type de modèle comprend trois phases [13] :

-La première phase correspond à l'absence de corrosion, qui est due à l'efficacité du système de protection.

-La deuxième phase débute au moment de perte d'efficacité du système de protection, et correspond à la perte de matière (métal) dans le temps.

-La troisième phase correspond à une variation de l'état de corrosion, d'un ralentissement à une stabilisation totale. La formation des produits de corrosion au niveau de la surface du métal, offre une protection contre l'agressivité du milieu environnant, cela permet à la vitesse de corrosion d'aller vers zéro [11,12].

Ce modèle prend la forme générale suivante

$$d(t) = d_{\infty} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - T_{st}}{\eta} \right) \right] \right\} = d_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_t}} \right) \quad (\text{II.3})$$

La solution particulière s'écrit :

$$d(t) = 0 \quad t \leq \tau_c$$

$$d(t) = d_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{t}{\tau_c}\right)}{\tau_t}} \right) \quad t > \tau_c$$

Avec :

τ_c : le temps de transition, définit à partir de la forme suivante

$$\tau_t = \frac{d_{\infty}}{\tan \alpha} ; \text{ Avec } \alpha \text{ angle défini}$$

$d(t)$: 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) [12].

Exemple :

La figure II.2, montre l'évolution de la dégradation en fonction du temps, décrit par le modèle de guêdes Soares et Gorbato

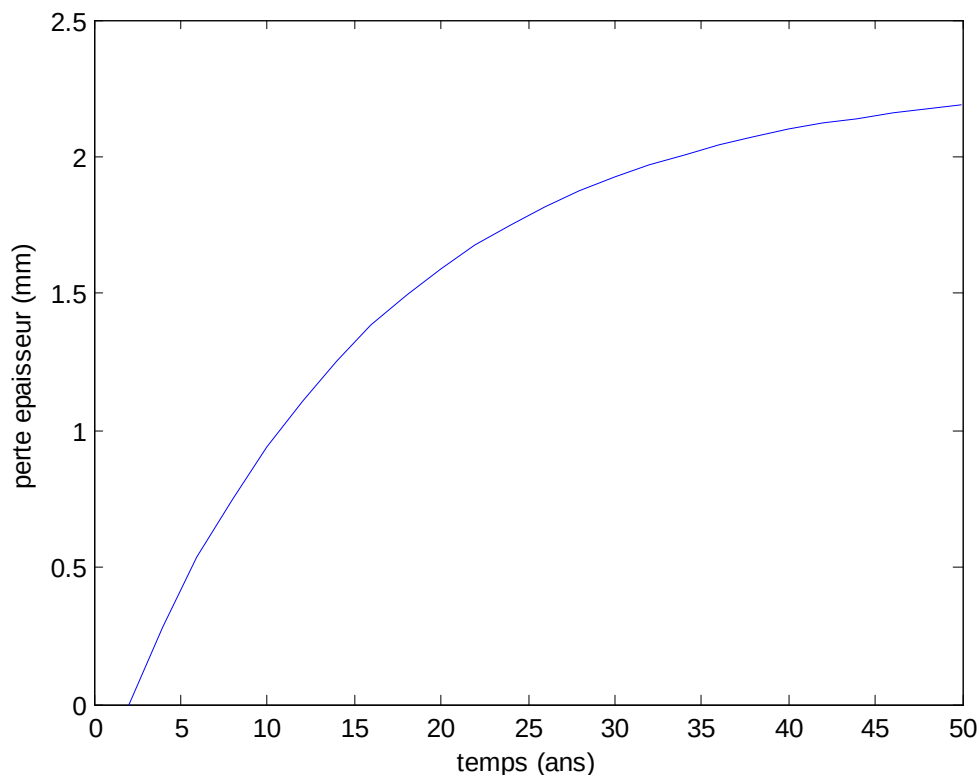


Figure II.2 – Evaluation de la dégradation selon le modèle de Guèdes Soares

Nous voyons bien, la courbe commence à s'accroître à la période T_{st} d'une manière agressive, cela est dû à la perte d'efficacité du système de protection, ce qui explique une perte de matière importante. À partir de 25 ans la fréquence de croissance de la courbe va commencer à se ralentir puis se stabiliser totalement, ce qui nous fait comprendre que la corrosion cesse d'évoluer à cette phase.

II.3.1.2 Modèles de Paik

Afin de prendre en compte les facteurs affectant la corrosion structurelle (entretien, Fréquence de nettoyage, température, humidité, gaz dissous, etc.), Paik a proposé un modèle tenant compte de l'emplacement et du type de corrosion des éléments structurels des navires. Le modèle de Paik comporte trois phases [14,11] :

- La première étape correspond à la durée de validité du système de protection ;
- La deuxième étape est la période où la transition ou la corrosion commence ;
- La troisième étape représente la progression de la corrosion.

La durée de vie des revêtements est généralement probabiliste à l'aide d'une loi log normale [11] :

$$f(T_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_c} \cdot \exp\left\{-\frac{(\ln T_c - \mu_c)^2}{2\delta_c^2}\right\} \quad (\text{II.4})$$

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)

δ_c : Écart type de $\ln T_c$ (année)

Lorsque l'efficacité du revêtement est nulle, la phase de transition commence. Temps écoulé

La transition peut être considérée comme une variable aléatoire qui suit une distribution

Indice. Au début, Paik a supposé que la corrosion avait commencé immédiatement après l'échec du revêtement de la même manière que le modèle Guedes Soares et Gorbatoov.

La phase de progression de la corrosion s'exprime par [13]:

$$d(t) = C_1(T - T_c - T_t)^{C_2} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$d(t)$: perte d'épaisseur (mm)

T : âge de navire (année)

T_c : Durée de vie du système de protection (année)

T_t : Durée de transition

C_1, C_2 : Coefficient déterminés à partir d'une analyse statistique des données de corrosion collectées sur les navires.

Lors des applications de son modèle, Paik prend un coefficient $C_2 = 1$, $T_t = 0$, ce qui revient à un model linéaire avec une vitesse constante dans le temps[11,13] :

$$d(t) = C_1(T - T_c) \quad (\text{II.6})$$

Exemple : La figure II.3 montre la modélisation faite par Paik, appliqué sur un cas de corrosion.

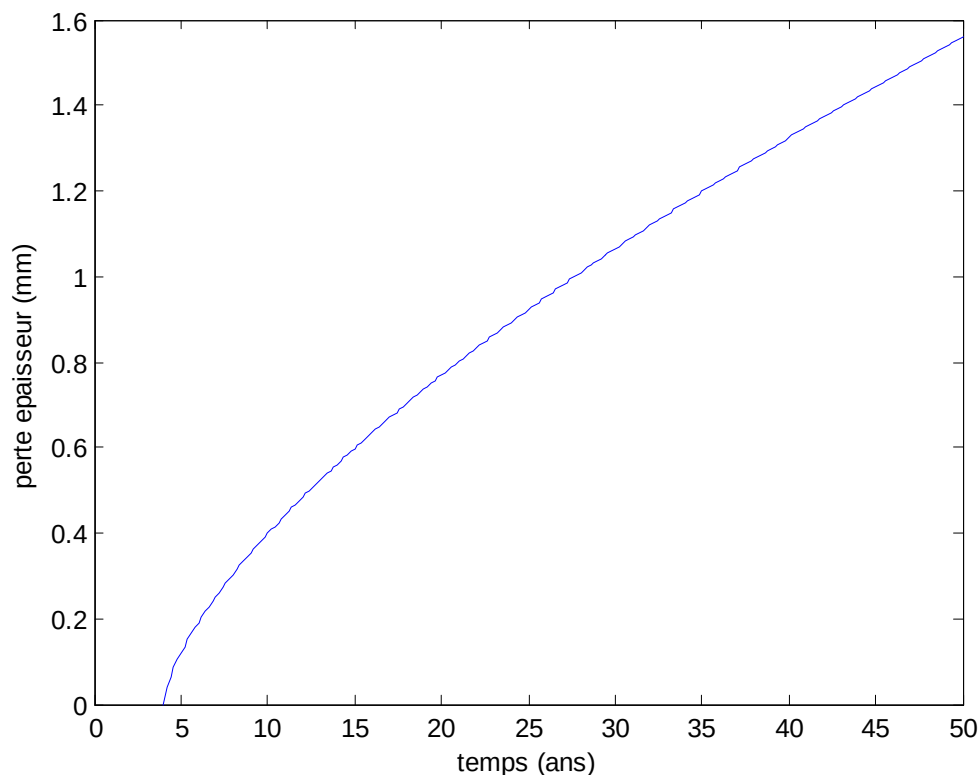


Figure II.3 - évolution de la dégradation par corrosion selon le modèle de Paik

Grace à la validité de système de protection et son efficacité, la perte d'épaisseur est quasiment nulle dans la période [0 ; 4ans], mais après cette période la courbe commence à s'accroître, cela nous permet de constater que le système de protection commence à perdre son efficacité, ce qui engendre l'apparition de la corrosion, puis nous voyons que cette corrosion s'évolue d'une manière progressif dans la troisième phase.

II.3.1.3 Modèles de Qin et Cui

Le modèle empirique développé par Southwell et Melchers n'a pas pris en compte d'envisager des systèmes de protection contre la corrosion, contrairement à ceux fournis par Guedes Soares et Paik. Cependant, ces modèles sont basés sur l'hypothèse de corrosion. Il ne peut être démarré qu'une fois que l'efficacité du système est complètement perdue. Modèle développé par Qin Et Cui suppose que le système commence à se corroder sous forme de piqûres, une fois le revêtement a commencé à dégénérer.

Lorsque le système perd complètement son efficacité, la corrosion sera généralisée. Qin et Cui proposent de décrire l'évolution de la vitesse de corrosion dans le temps à l'aide d'une loi de Weibull [11,12].

$$r(t) = 0 \quad 0 \leq t \leq T_{st} \quad (II.7)$$

$$r(t) = d_{\infty} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-T_{st}}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t-T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} \right\} \quad T_{st} \leq t \leq T_l$$

Avec :

T : 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

$$T_A = T_{cl} = T_{st} + \eta \left(\frac{\beta-1}{\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad \text{pour} \quad \beta > 1$$

$$T_A = T_{st} \quad \text{pour} \quad \beta < 1$$

Sa valeur est donnée par :

$$r_{max} = d_{\infty} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{\beta-1}{\beta} \right)^{(\beta-1)/\beta} \exp \left(\frac{\beta-1}{\beta} \right) \quad \text{pour} \quad \beta = 1$$

$$r_{max} = d_{\infty} \frac{\beta}{\eta} \quad \text{pour} \quad \beta = 1$$

$$r_{max} \rightarrow \infty \quad \beta < 1$$

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

$$d(t) = 0 \quad 0 < t < T_{st} \quad (II.8)$$

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

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

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

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 :

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

Lorsque $d_{\infty} = 0.1207$, $T_{st} = 0$, $\eta = 0.6257$, alors le modèle correspond au modèle puissance proposé par Melchers [11,12].

Exemple :

La figure II.4 montre l'évolution du phénomène de la corrosion d'un pipeline, modélisé par le modèle de Qin et Cui

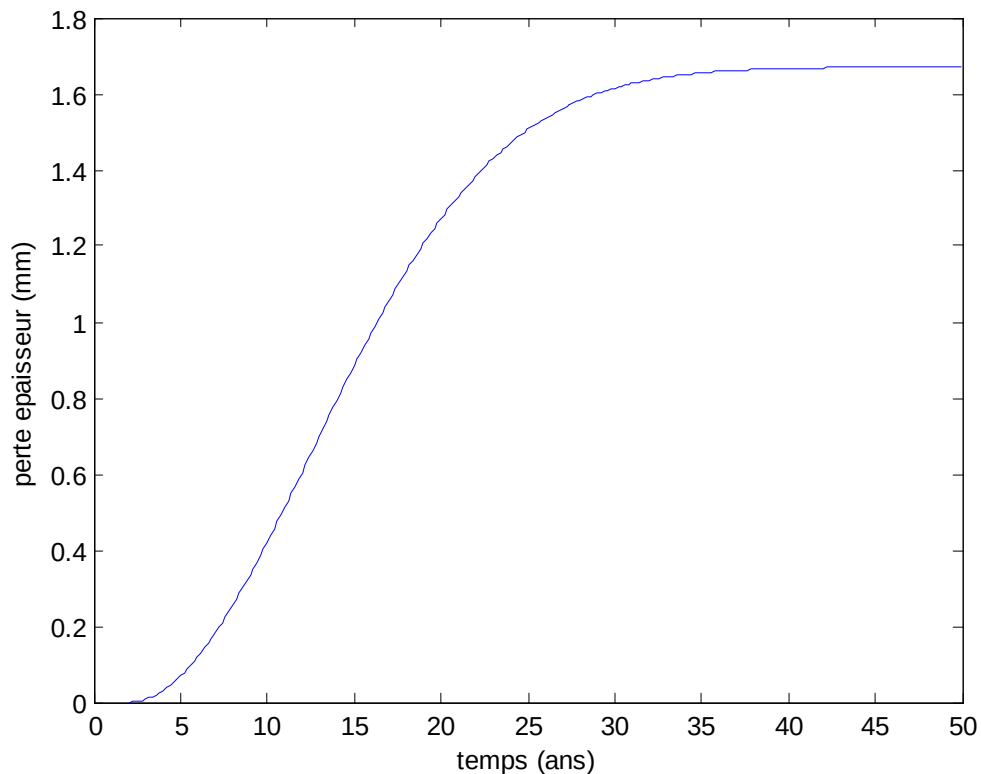


Figure II.4 - modélisation de la perte d'épaisseur selon le modèle de Qin et Cui

Nous voyons que la courbe est strictement croissante, après l'inexistence de la corrosion pendant la période [0,3ans]. Cela revient à l'absence de système de protection, que ce dernier

à engendré une apparition soudaine de la corrosion qui s'évolue progressivement dans le temps,

La figure suivante, représente les trois modèles précédent (Guèdes Soares et Gorbatoov, Paik model, Qin and Cui) dans un même graphe, dans le but de faire une comparaison graphiques entre ces modèles, afin de pouvoir constater l'état réel de la dégradation, et pour une bonne prise de décision sur un plan de maintenance.

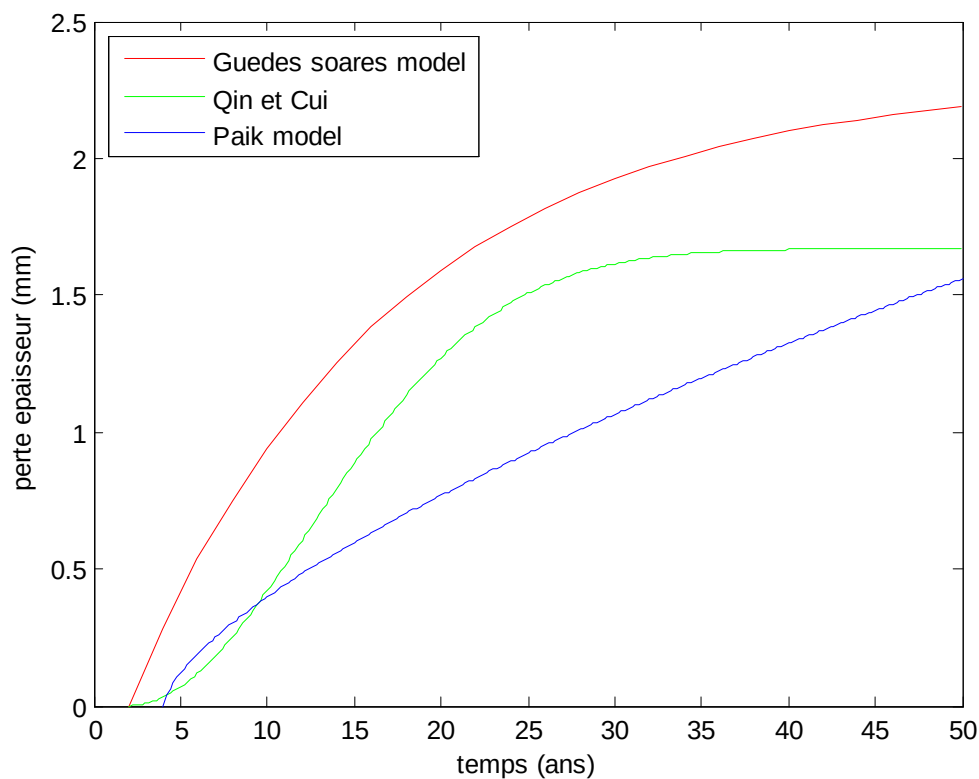


Figure II.5 - Illustration qui regroupe la modélisation de corrosion selon les trois modèles

Nous voyons bien que ya une différence bien claire entre l'allure de chacune des trois courbe, ce qui signifie que les trois modèles ne reposent pas sur la même vision de modélisation. Nous remarquons bien que le model Guedes Soares, a modélisé la corrosion d'une manière à ce qu'on voit une perte d'épaisseur au début de perte d'efficacité de système de protection (deuxième phase) à une fréquence élevée, et ce n'est pas le cas pour le modèle de Paik , ou la corrosion s'intègre d'une façon un peu lente à uniquement lorsque l'efficacité de système de protection est nulle. Et comme nous l'avons déjà mentionné, les modèles de Qin et Cui ne prennent pas en considération les systèmes de protection, et supposent que la corrosion

démarre une fois ce dernier est nulle, elle se s'initie sous forme de piqures et ce qu'on peut voir dans la courbe en vert.

II.4 Conclusion

Nous avons bien vu dans ce chapitre, une explication générale sur le phénomène de dégradation causé par une corrosion, et l'importance de sa considération dans les études de fiabilités afin de l'éviter dans le futur.

C'est bien clair que nous avons basé sur les modèles physiques en générale, qui sont bien utiles dans la modélisation de l'état de corrosion, que nous citons ici :

- les modèles empiriques ;
- les modèles physique-chimique ;
- les modèles phénoménologiques ;

L'approfondissement sur les modèles empiriques, nous a permis de comprendre le principe des modèles prédictifs de corrosion (modèles de Guedes Soares et Gorbato, modèle de Paik, modèles de Qin et Cui), et leur l'efficacité dans les plans de maintenances prévisionnelle.

.

III.1 Introduction

Les pipelines tiennent une place importante dans les industries gazière et pétrolière, et contribuent pleinement à son développement durable en assurant leur fonction de production, de transport et de distribution. Mais parfois des conditions de service s'avèrent plus sévèrement à celle prévues à la conception, ce qui mène à la corrosion du pipeline.

Dans ce chapitre, nous appliquons les modèles prédictifs de maintenance (détaillé dans chapitre 2) sur un cas réel de corrosion d'un pipeline, et c'est dans le but d'évaluer la dégradation de ce dernier, afin de pouvoir estimer la durée de vie résiduelle (Remaining Useful Life en anglais), c'est-à-dire le temps de fonctionnement restant au pipeline avant qu'il soit défaillant et qui est un point essentiel dans les études de fiabilités.

III.2 Description de la démarche

III.2.1 Application

Nous allons appliquer les modèles prédictifs (détaillés dans le chapitre 2) pour évaluer la dégradation d'un pipeline exposé au risque de corrosion durant son service. L'épaisseur initiale du pipeline est de **10mm**.

III.2.2 Estimation de la dégradation à un instant (t)

Cette procédure a pour objet l'évaluation de la dégradation des pipelines soumis à la corrosion, dans le but de garantir une meilleure disponibilité au moindre coût d'intervention. Au même temps c'est un moyen qui permet de diminuer la probabilité d'apparition de défaillances imprévues.

- générer **n (effectif)** paramètres à partir de la loi Normale pour chaque modèle. Les paramètres sont déterminés à partir d'une analyse statistique de données de corrosion, collectés suite à une expérience établie par [12].
- Evaluer de la perte d'épaisseur selon chaque modèle, par modélisation d'évolution de la dégradation.
- extraire les valeurs de perte d'épaisseur à l'instant choisie (**t**).
- Déterminer la moyenne et l'écart type de l'échantillon.

III.2.3 Estimation de la durée de vie résiduelle à partir de l'instant (t)

Cette procédure est dans le but de faciliter aux ingénieurs, l'opération du remplacement du pipeline, une fois l'instant de défaillance préalablement estimé est atteint.

- Pour un seuil de défaillance fixé à **20%** de perte de l'épaisseur initiale, nous allons extraire les valeurs des instants d'apparitions de la défaillance.
- Déterminer la moyenne et l'écart type de l'échantillon.

III.3 Application pour le modèle Guèdes Soares et Gorbato

III.3.1 Estimation de la dégradation à l'instant t=25ans

Le tableau III1 montre les valeurs des paramètres du modèle de Guèdes Soares et Gorbato issue de [12] :

Tableau III.1 - paramètres du modèle de Guèdes Soares et Gorbato

Paramètres	Moyenne	Ecart type	n
d_{∞}	2.28	0.0940	100
T_{st}	1.99	0.0001	100
η	15	0.0001	100

Selon l'équation (II.3) du modèle de guèdes, nous avons obtenu la figure III.1 suivante qui montre l'évolution de la dégradation en fonction du temps.

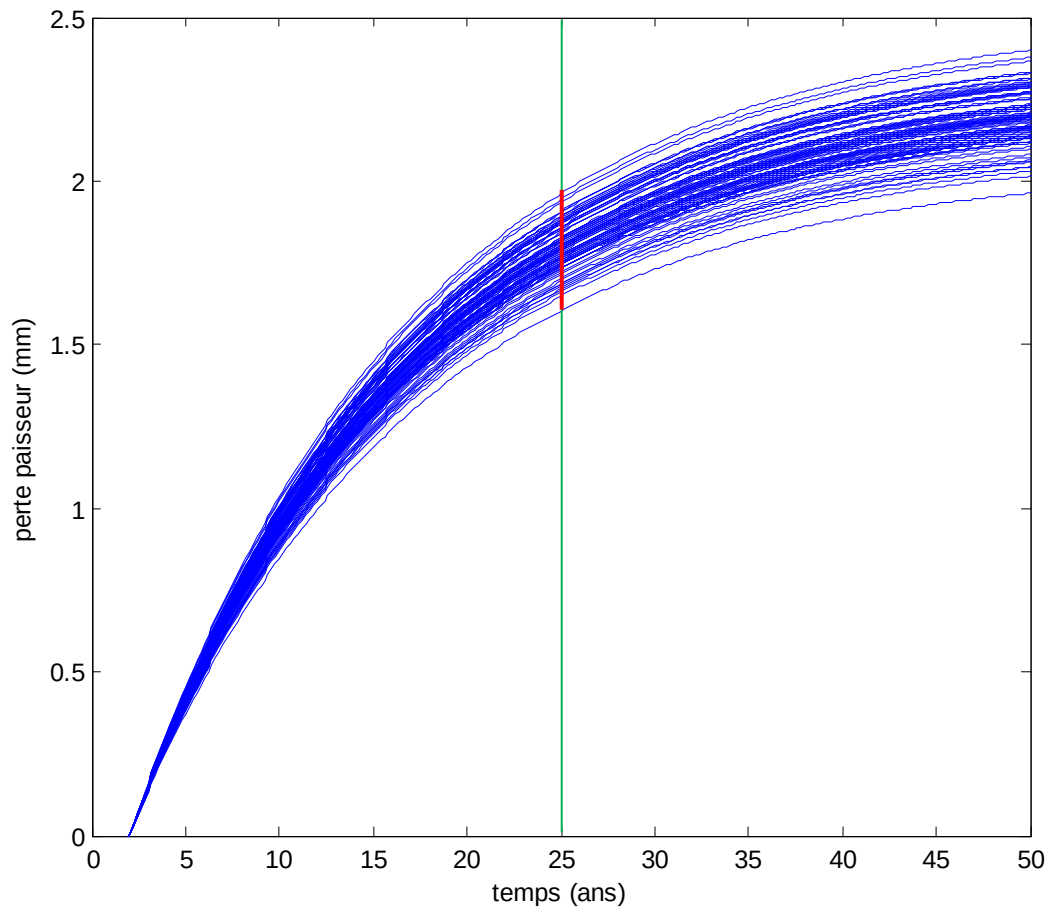


Figure III.1 – Estimation de la perte d'épaisseur selon le modèle Guèdes Soares

Nous remarquons que l'écart de l'échantillon est très faible au début, cela se traduit par une initiation de la corrosion d'une manière respectueuse sur tous les points du métal, puis l'écart commence à s'allonger au bout de 15 ans, ce qui explique la continuité de la variation du phénomène de dégradations, avec ralentissement de la vitesse de corrosion.

Après avoir extrait les valeurs de perte d'épaisseur à **t=25ans**, nous allons tracer l'histogramme pour la figure III.1 qui nous permettra d'évaluer l'état de dégradation du pipeline.

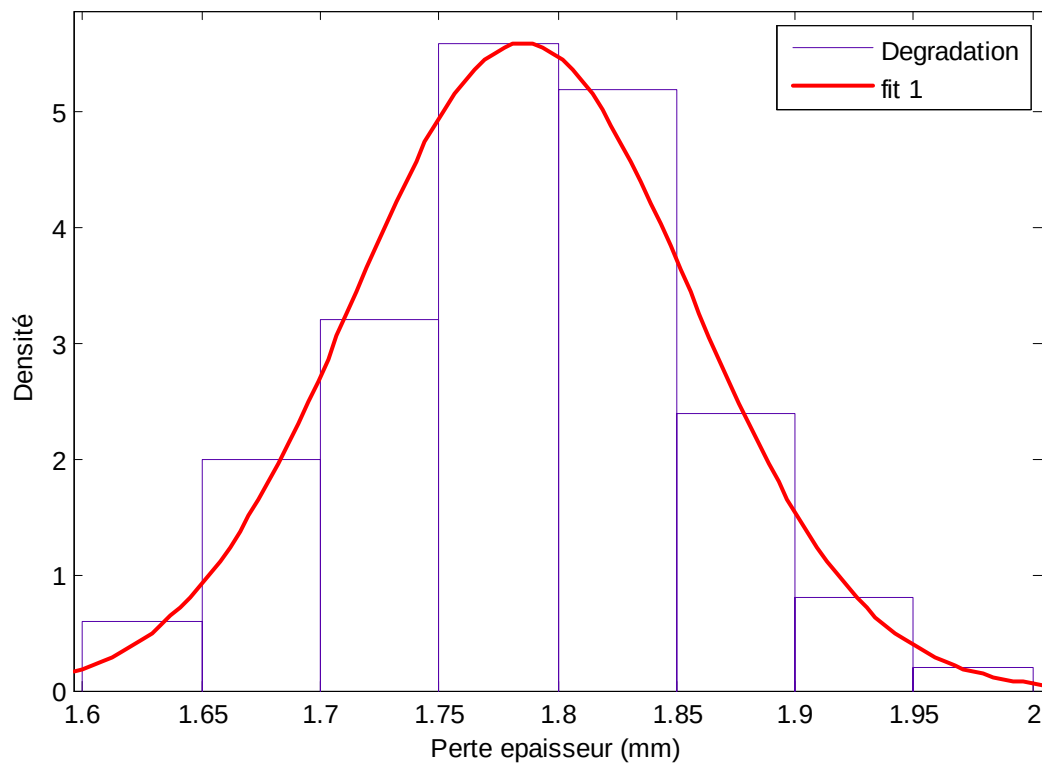


Figure III.2 – La distribution aléatoire de l'échantillon (d) selon le modèle de Guêdes Soares

Selon la courbe en cloche nous avons pour la perte d'épaisseur :

Moyenne = **1.7855 mm** ; Ecart type = **0.0713**

La dispersion des données s'étend de 1,6 à 2mm avec des valeurs d'observation distribués d'une manière aléatoire, l'histogramme couvre l'ensemble des valeurs, avec des pics important surviennent au bout de 1.75mm et 1.85mm.

Pour les valeurs 1.6 à 1.7mm, ne peuvent pas être considérable dans l'évaluation de la dégradation, vu la faible densité de probabilité qui leur correspond.

Pour une évaluation mieux adaptée dans ce cas, nous considérons la moyenne de perte d'épaisseur comme une valeur réelle de la dégradation du pipeline, et la programmation des inspections et plans de maintenance se procède selon cette valeur (1.7973mm).

III.3.2 Estimation de la durée de vie résiduelle à partir de l'instant (25ans)

La figure III.3 montre les instants correspond au seuil de défaillance.

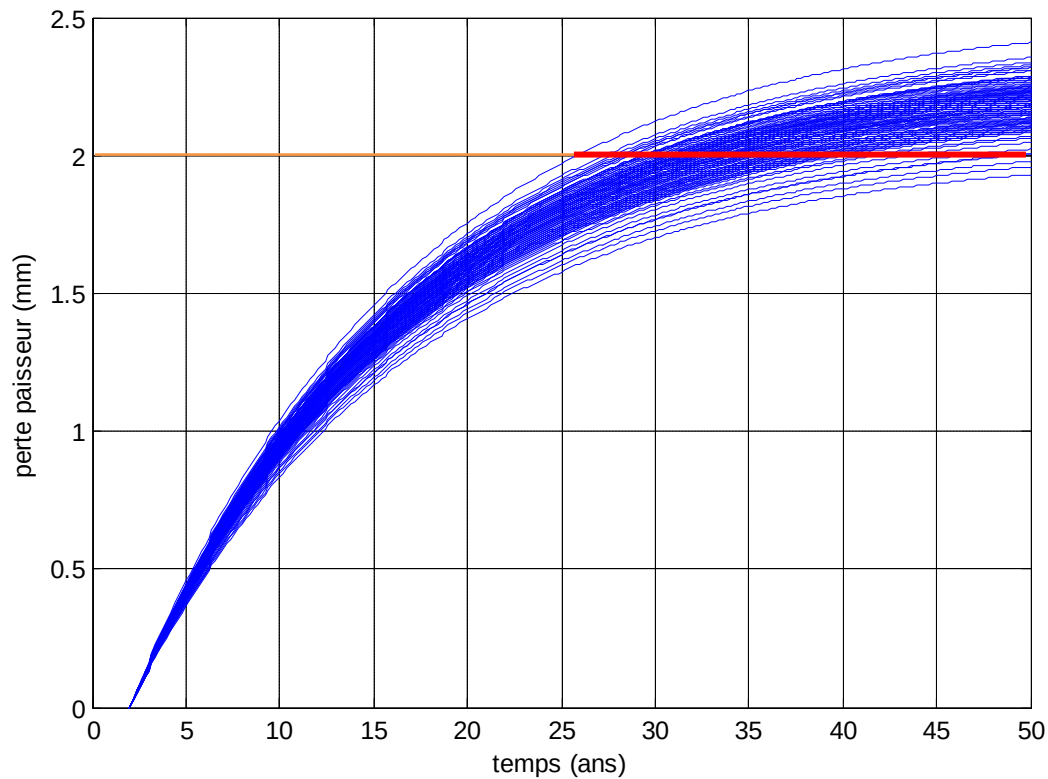


Figure III.3 Illustration du seuil de défaillance selon le modèle Guèdes Soares

Nous remarquons bien les instants de défaillance commence à apparaître à partir de **27 ans**, avec un écart court par rapport à l'instant **25ans**, et continue d'apparaître jusqu'à **50ans**.

Nous procédons à extraire toutes les valeurs des instants de défaillance pour tracer l'histogramme de la figure III.3 qui va nous aider à déterminer l'instant moyen de défaillance.

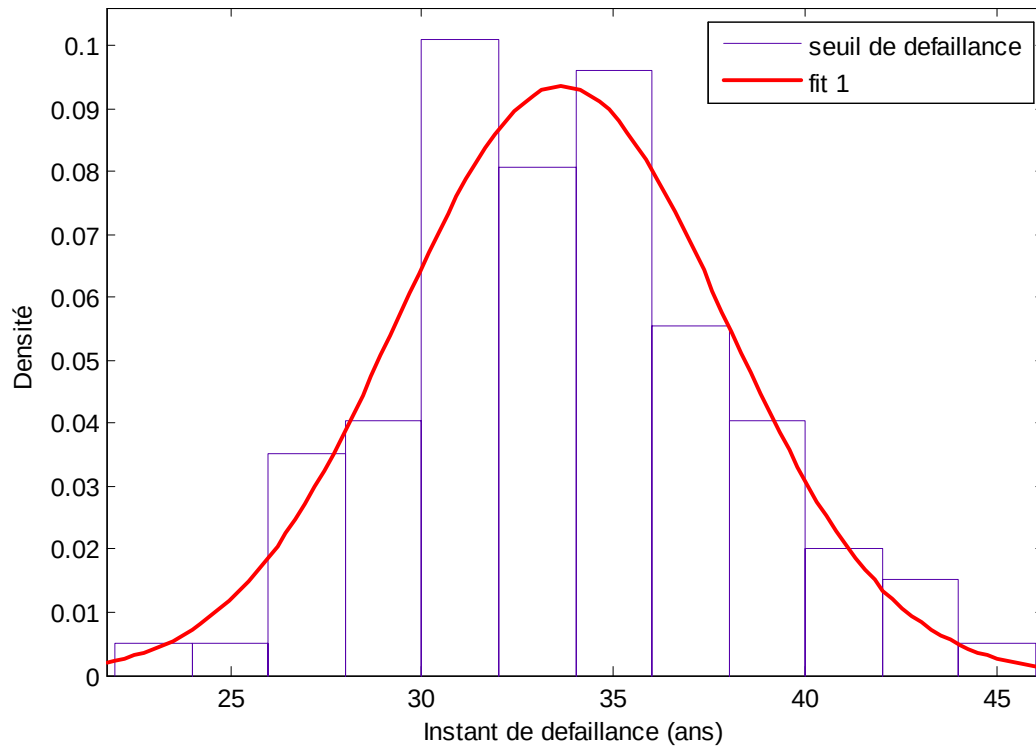


Figure III.4. Distributions aléatoires de l'échantillon des instants d'apparition de défaillance selon le modèle de Guedes Soares

L'histogramme illustre la probabilité d'apparition des défaillances en fonction des instants de défaillance, des pics importants surviennent au bout des valeurs allant de (30 à 35 ans), la courbe en cloche indique un instant moyen eux environ de 35 ans, alors : Instant moyen d'apparition de défaillance est de **33.6465ans**, avec un écart type de **4.2650ans**

La durée de vie résiduelle est environ 8.6465 ans, avec un écart type de 4.2650ans

III.4 Application pour le modèle Paik

III.4.1 Estimation d'une perte d'épaisseur à l'instant $t=40$ ans

Le tableau III.2 montre les valeurs des coefficients du modèle de Paik, issue de [12] :

Tableau III.2 - coefficients du modèle de Paik

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

L'application de l'équation (II.5) du modèle de Paik, donne la figure III.5 qui montre selon l'échantillon de n paramètres la variation d'écart des courbes au cours du temps.

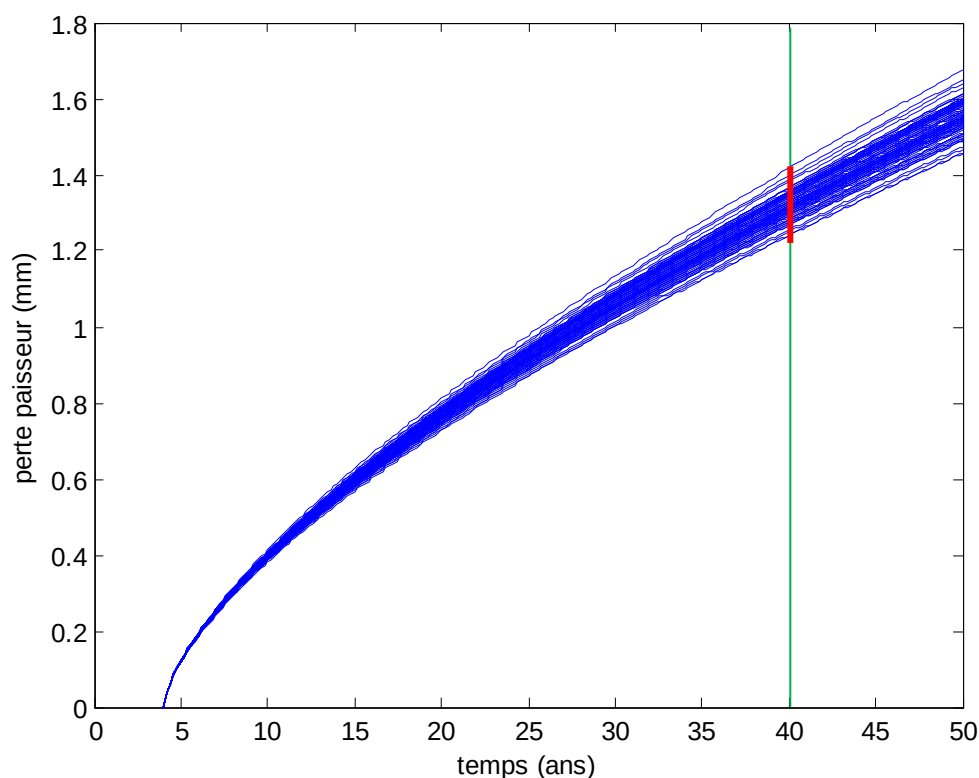


Figure III.5 – Illustration d'évolution de la corrosion selon le modèle de Paik

L'écart entre les courbes se varie respectivement d'une manière croissante, à l'instant 40ans un écart étendu, se traduit par le comportement aléatoire de la corrosion.

Pour toutes les valeurs de perte d'épaisseur à l'instant (40ans), l'histogramme de la figure III.5 représente la distribution de ces dernières en fonction de la densité de probabilité.

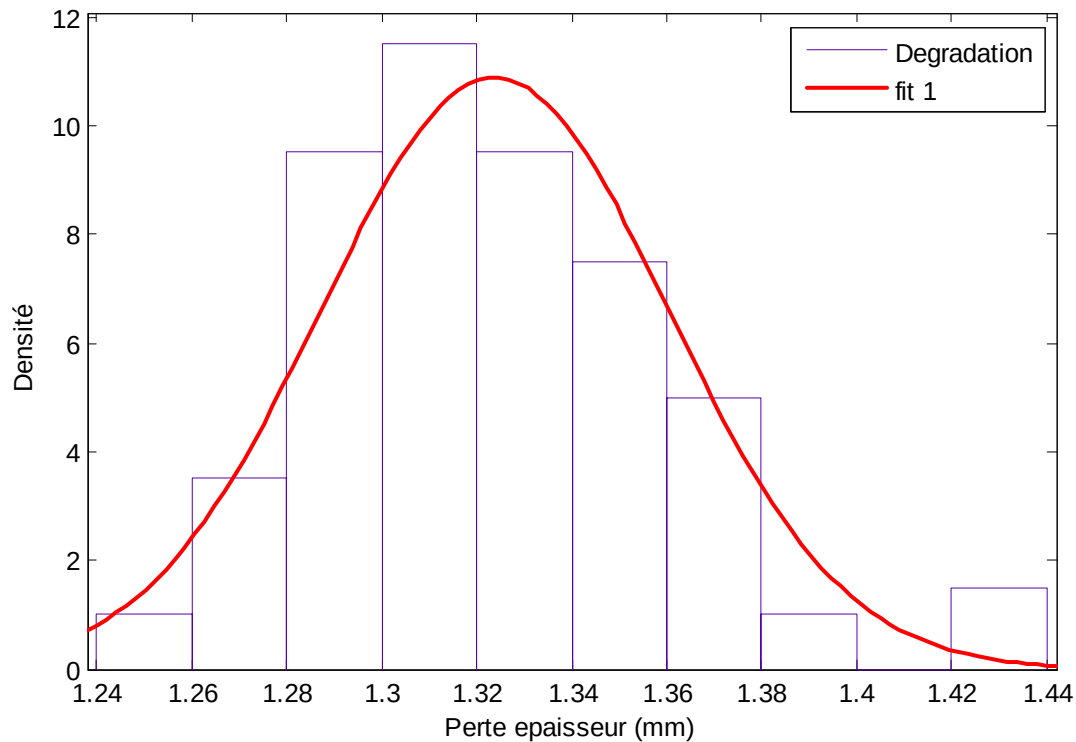


Figure III.6 – Distribution aléatoire de la variable (d) selon le modèle de Paik

Les données sont dispersées d'une manière aléatoire, des valeurs très peu observés, à des valeurs très observés.

Pour plus de sureté durant cette évaluation, nous estimons la Moyenne de perte d'épaisseur à **1.3281 mm** avec un Ecart type de **0.0367mm**.

Dans ce cas, le pipeline va continuer d'assurer sa fonction requise tant que la valeur estimé ne correspond pas au seuil de défaillance, et les inspections peuvent se programmer dans les meilleurs délais possibles.

III.4.2 Estimation de la durée de vie résiduelle

La figure III.7 indique les instants d'apparition de la défaillance

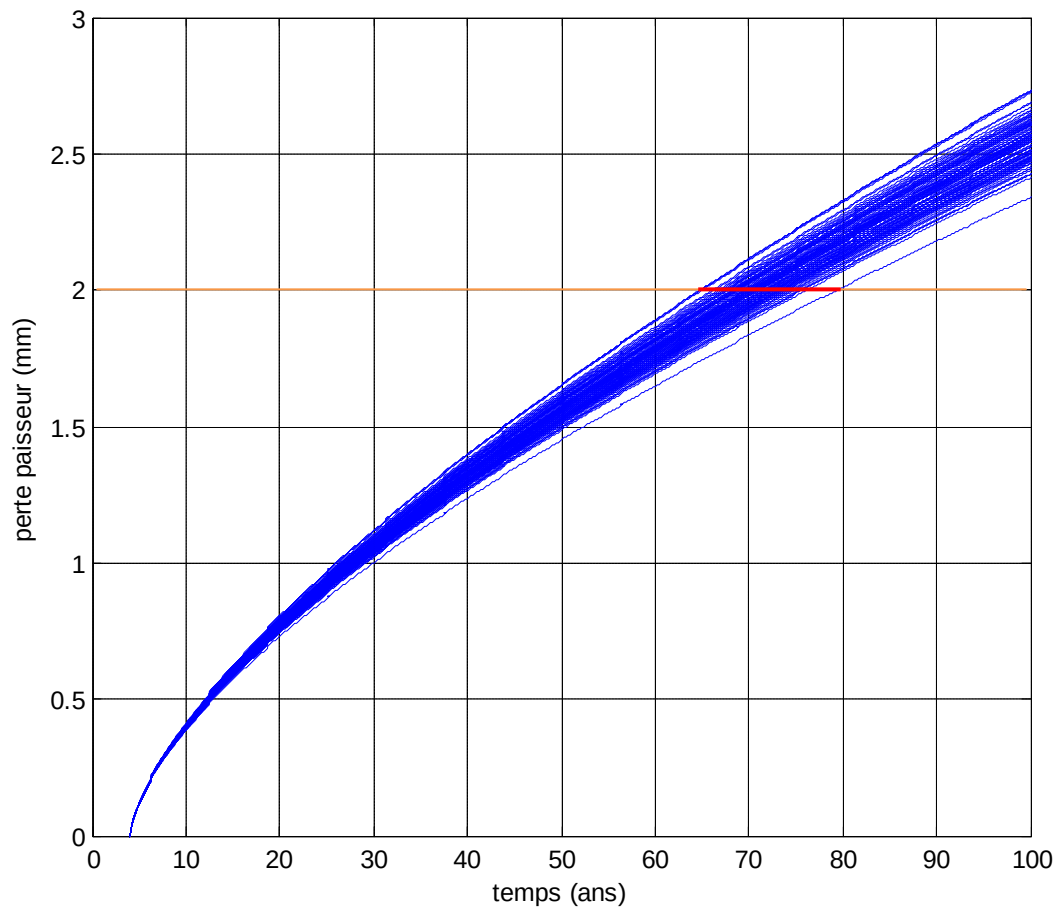


Figure III.7. Illustration du seuil de défaillance selon le modèle de Paik

Un écart visible entre les courbes au point du seuil de défaillance, c'est donc la nécessité d'estimer l'instant de défaillance moyen correspondons, pour ce faire, l'histogramme de la figure III.7 nous montre une distribution aléatoire de toutes les valeurs des instants de défaillances probables indiqués dans la courbe ci-dessus.

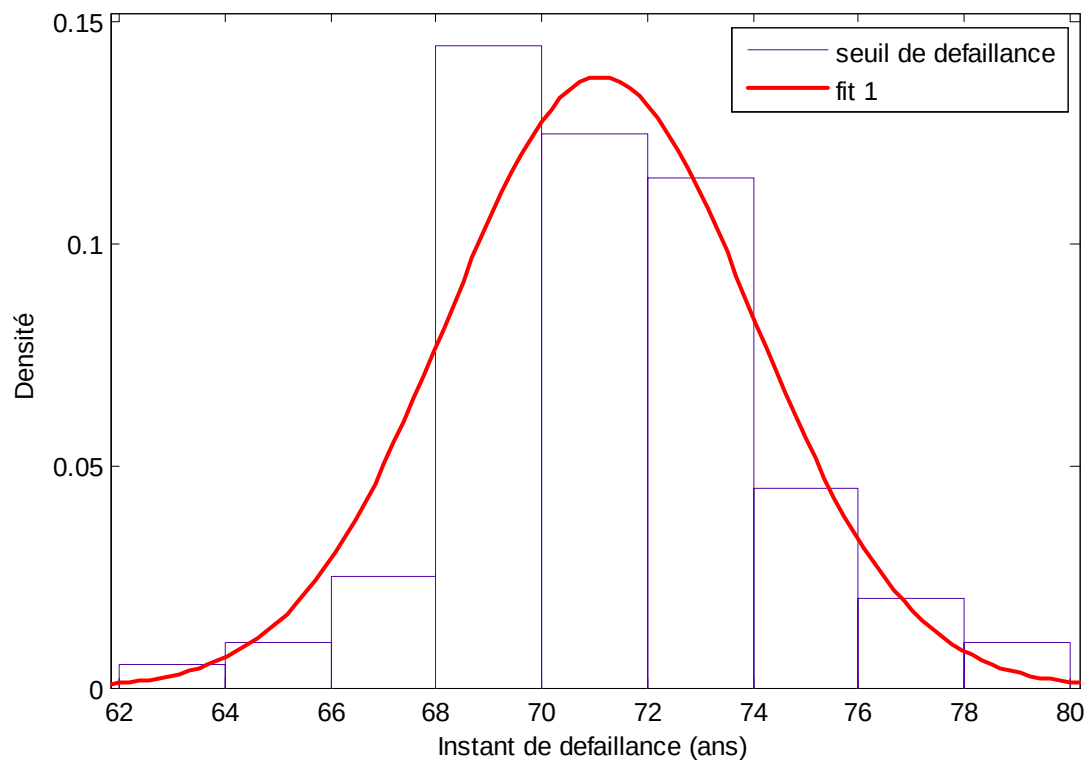


Figure III.8. Distributions aléatoires des instants d'apparition de défaillance selon le modèle de Paik

D'après la courbe en cloche, l'instant de défaillance moyen est estimé à **71.1160 ans**, avec un écart type de **2.8969 ans**

La durée de vie résiduelle est environ de 31.116 ans, avec un écart type 2.8969ans

III.5 Application pour le modèle de Qin et Cui

III.5.1 Estimation de la dégradation à l'instant $t=40$ ans

Le tableau III.3 montre les valeurs des paramètres des modèles de Qin et Cui issue de [12]

Tableau III.3 - paramètres relatifs au model de Qin et Cui

paramètres	Moyenne	Ecart type	n
d_{∞}	1.67	0.0674	100
T_{st}	1.99	0.0001	100
β	1.97	0.0294	100
η	15	0.0181	100

La figure III.9, une modélisation d'évolution de la perte d'épaisseur selon les paramètres ci-dessus avec n effectif (n=100), obtenue suite à l'application de l'équation (II.8) du modèle

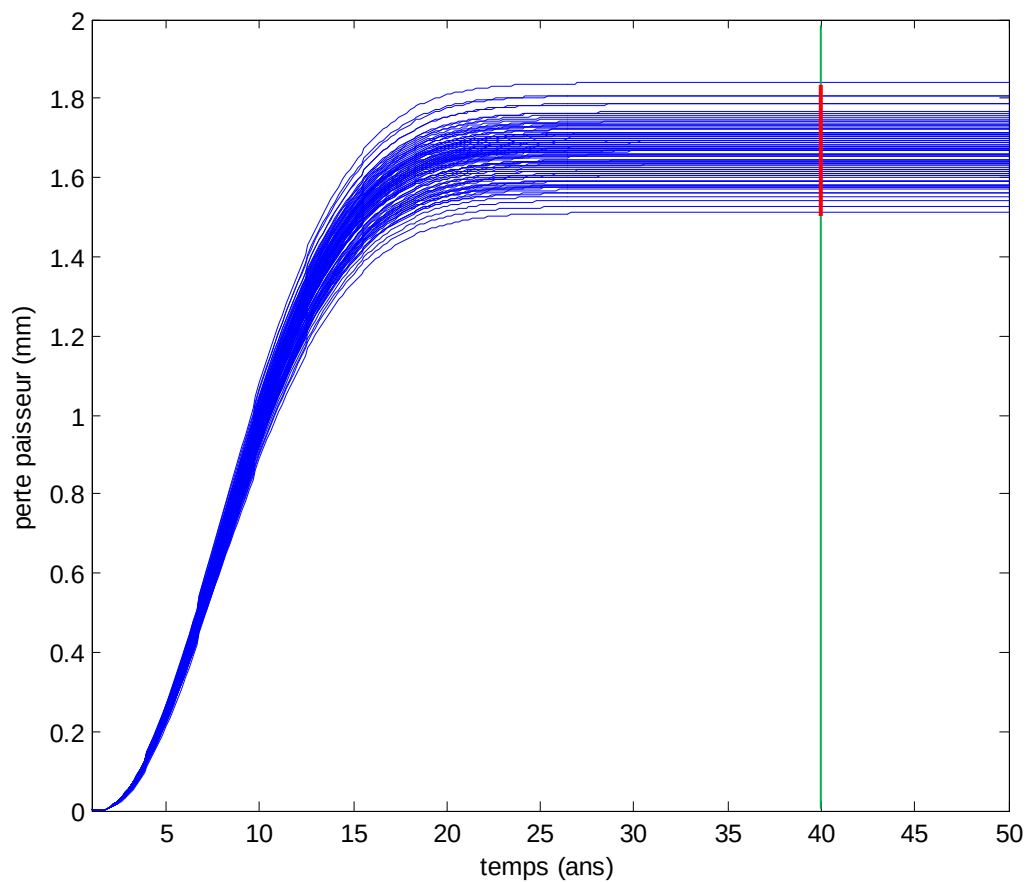


Figure III.9 – Illustration d'évolution de corrosion selon le modèle de Qin et Cui

Les n courbes sont décalées entre elle d'un écart très court au début, à partir de 20ans l'écart atteint son maximal d'une façon constante à des valeurs de perte d'épaisseur comprise dans [1,5 ; 1,8mm].

Pour une meilleure évaluation de la dégradation, nous estimons la valeur moyenne de perte d'épaisseur du pipeline à l'instant ($t=40ans$), l'histogramme de la figure III.9 permet de distribuer aléatoirement l'ensemble des valeurs de perte d'épaisseur à l'instant prélevé .

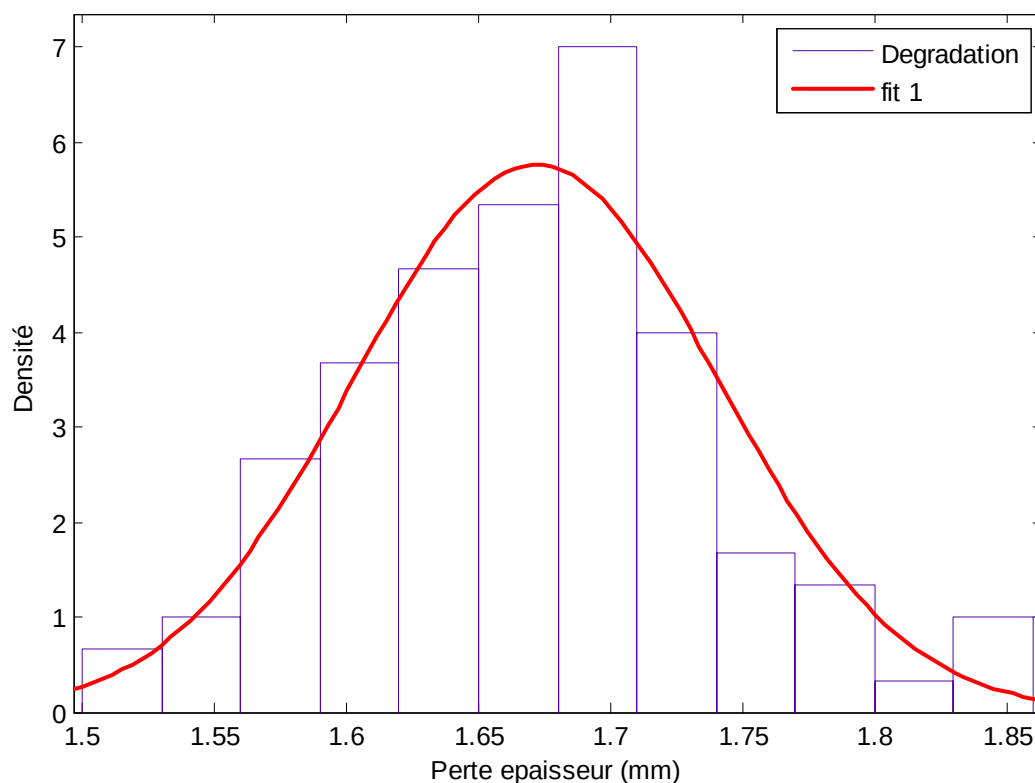


Figure III.10 – Répartition empirique de perte d'épaisseur selon le modèle de Qin et Cui

La courbe en cloche indique une moyenne entre [1.65 ; 1.7mm], nous avons estimé la valeur moyenne à **1.6717 mm** avec un écart type de **0.0692mm**.

III.5.2 Estimation de la durée de vie résiduelle

La courbe III.11 représente l'écart entre le seuil de défaillance (2mm), et la valeur maximale la moins probable de perte d'épaisseur puisse atteindre.

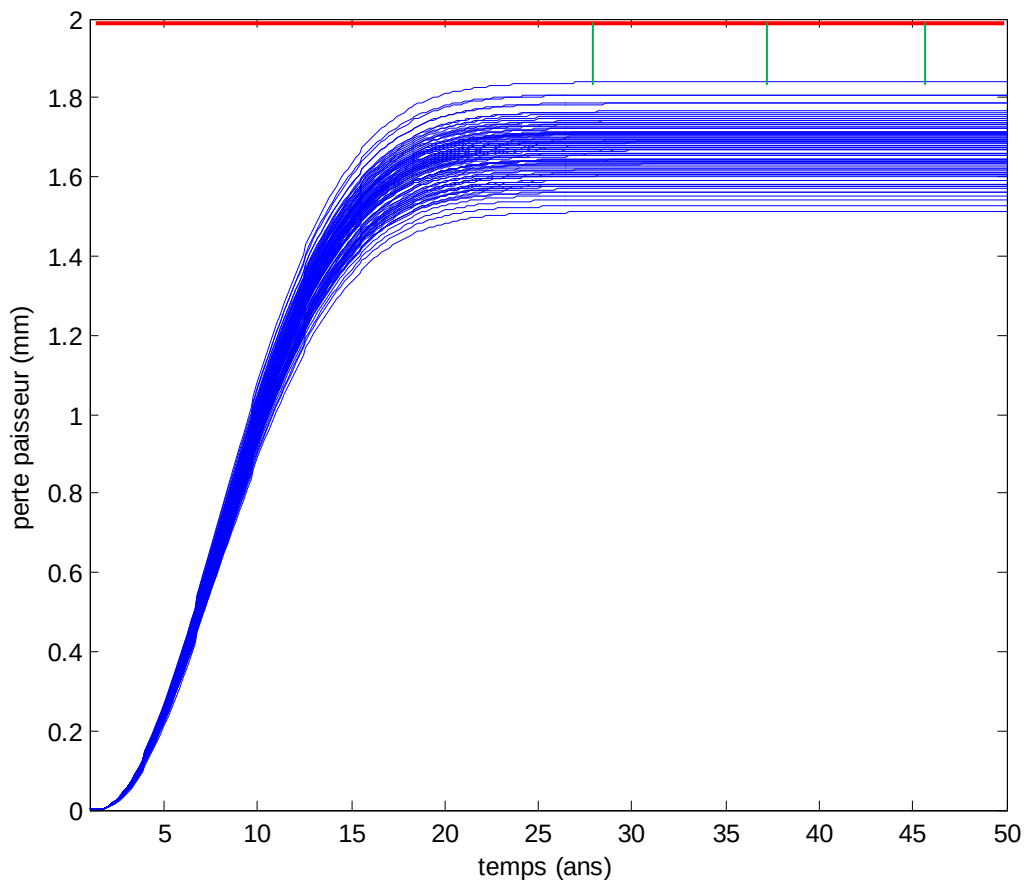


Figure III.11 – illustration du seuil de défaillance selon le modèle de Qin et Cui

Les courbes stabilisent à une valeur moyenne de 1.6mm pour tous les points du temps à partir de 20ans, ce qui exclut l'atteinte de la défaillance dans ce cas.

Selon les valeurs des paramètres que nous avons pris, la probabilité de défaillance est quasiment nulle, or qu'en réalité le pipeline se corrode jusqu'à atteindre sa durée de vie qui se manifeste par une corrosion sévère. De ce fait, La durée de vie résiduelle ne peut être estimée dans ce cas tant que les valeurs des paramètres ne sont pas les mieux adaptés.

III.5 Synthèse

Le tableau III.4 regroupe l'ensemble des résultats obtenus selon chaque modèle prédictif de corrosion, dans le but de faire une comparaison.

Tableau III.4 – comparaison entre les résultats obtenus selon chaque modèle

Evaluation de la Modèles dégradation prédictifs de corrosion	Estimation de la perte d'épaisseur (mm)		Estimation de la durée de vie résiduelle (année)	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Modèle de Guêdes Soares et Gorbato	1.7855	0.0713	8.6465	4.2664
Modèle de Paik	1.3281	0.0367	31.116	2.8969
Modèle de Qin et Cui	1.6717	0.0692	/	/

- Estimation de perte d'épaisseur : Une légère différence entre les résultats obtenues selon chaque modèle, les valeurs de perte d'épaisseur tourne en moyenne à environ 1.5mm. Pour un choix mieux adapté, nous tenons compte de la valeur de l'écart type qu'elle soit la plus basse possible par rapport à sa moyenne, dans ce cas les trois modèle sont efficace.
- Estimation de la durée de vie résiduelle (RUL) : pour une meilleure fiabilité dans nos choix, le modèle de Paik est le plus convenable dans ce cas, vu la moyenne de la RUL qui est de 31.116 ans avec un écart type de 2.8969ans, contrairement au modèle de Guêdes Soares et Gorbato, l'écart type fait la moitié de sa moyenne de RUL.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué en premier lieu le cas d'application des modèles prédictifs étudié dans le chapitre deux, un pipeline soumis à une dégradation par corrosion. Puis une explication sur la démarche d'estimation de la durée de vie résiduelle, qui se déroule de la manière suivante :

- Estimation d'une perte d'épaisseur à l'instant d'inspection, par évaluation de la dégradation en fonction du temps.
- Estimation de la durée de vie résiduelle à partir de l'instant d'inspection.

Les résultats obtenus permet aux ingénieurs de maintenance de :

- Programmer les inspections dans les meilleures conditions, et aux moindres couts d'interventions.
- Préparer le moment du remplacement du pipeline, une fois ce dernier atteint sa durée de vie.

Conclusion générale

Cette étude a mis au point une méthodologie pour l'évaluation de la dégradation des structures soumises à la corrosion, et l'estimation de la durée de vie résiduelle de ces structures. L'approche proposée intègre dans la méthodologie des modèles prédictifs de corrosion, qui conduisent à une relation entre la perte d'épaisseur et le temps, d'une manière à modéliser l'évolution de la dégradation (perte d'épaisseur) en fonction du temps.

La méthodologie est dans l'objectif d'optimiser la programmation des inspections dans le temps, et la détermination des instants du remplacement des systèmes défaillants.

Bibliographie

- [1] 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).
- [2] ISO 13172 :2012, 1.15
- [3] https://www.researchgate.net/figure/Estimation-de-la-duree-de-vie-residuelle-moyenne-du-systeme-apres-90-jours-de_fig7_259639225
- [4] C, Letot. Pierre, Dehombreux. Modèles de dégradation pour l'estimation de la fiabilité et de la durée de vie résiduelle : applications à la fissuration. 18 pages. Page 3. (2009)
- [5] O, Blancke. Développement d'une approche de pronostic pour mes équipements complexes permettant l'application de la maintenance prévisionnelle. Thèse de doctorat. Ecole de Technologie Supérieure Université de Québec, (2020).
- [6] T, Aggab. Pronostic des systèmes complexes par l'utilisation conjointe de modèle de Markov caché et d'observateur. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, (2016).
- [7] Y, Lei. Intelligent Fault Diagnosis and Remaining Useful life Prediction of Rotating machinery. USA. Joe Hayton, (2007).
- [8] H, Chouikhi. Optimisation des stratégies de maintenance verte pour les systèmes de productions de bien et de services. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, (2012).
- [9] K .K. Govil & K. K. Aggarwal. Mean residual life function for normal gamma and lognormal densities. Reliability engineering, 5, 47,51, (1982).
- [10] Z, Bouzidi. Pronostic des systèmes industriels basé sur l'intelligence artificielle Maintenance prédictive. Thèse de doctorat, Université de Mohamed Khider-Biskra, (2019).
- [11] S, Yacine. Optimisation des méthodes d'inspection des pipes. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, (2014).
- [12] 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).
- [13] **Guedes Soares, C. and Garbatov, Y.** Reliability of maintained, corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads. *Mar. Struct.*, 1999, **12**, 425–445.

Bibliographie

- [14] **Paik, J. K., Kim, S. K. and Lee, S. K.** Probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of bulk carriers. *Ocean Engng*, 1998, **25**(10), 837–860
- [15] https://www.researchgate.net/figure/Classification-des-approches-de-pronostic-dapres-Byington-et-al-2004_fig4_30514116