

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l' Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université A.MIRA-BEJAIA**



**جامعة بجاية**  
**Tasdawit n Bgayet**  
**Université de Béjaïa**

**Faculté : Technologie**  
**Département : Génie électrique**

# **Mémoire**

**Présenté par :**  
**-Bouadjenk Hamid**  
**-Fezzoui Omar**  
**-Yahiaoui Islem**

**Encadré par :**

**-Mr AIT MOKHTAR El Hassene**

**Pour l' obtention du diplôme de Master**

**Filière : Electromécanique**  
**Spécialité : Maintenance industrielle**

**Thème**

**Maintenance prédictive des systèmes sujets à la dégradation par  
corrosion**

**Année Universitaire : 2019/2020**

## *Remerciement :*

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire plus particulièrement notre encadreur Mr Ait Mokhtar, nos familles, ainsi que tous les enseignants qui nous ont donnés de leurs temps.

## Table des matières

Table des matières .....	1
Liste des figures .....	3
Liste des tableaux.....	4
Introduction générale .....	5
Chapitre I : .....	6
Modèles de dégradation par corrosion .....	6
I. Introduction.....	7
II. Généralités sur le phénomène de corrosion .....	7
II.1 Définition.....	7
II.2 Classification de la corrosion .....	7
II.2.1 Corrosion chimique .....	7
II.2.2 Corrosion électrochimique .....	8
II.3 Les différentes formes de corrosion .....	8
II.3.1 La corrosion uniforme .....	8
II.3.2 La corrosion localisée.....	9
II.4 Le processus de corrosion sur une structure .....	12
III. Revue des Modèles prédictifs de corrosion .....	13
III.1 Modèles empirique et autres modèles notable.....	13
III.2 Modèles Guedes Soares .....	15
III.3 Modèles de Paik.....	16
III.4 Modèles de Qin & Cui.....	19
Chapitre II : .....	23
I. Introduction.....	24
II. Fiabilité mécanique .....	24

II.1	Les variables de conception.....	24
II.2	Fonction d'état limite.....	25
II.3	Probabilité de défaillance .....	25
II.4	Indices de fiabilité .....	26
II.4.1	Notion d'indice de fiabilité.....	26
II.4.2	Indice de Cornell .....	26
II.4.3	Indice de Hasofer et Lind .....	27
III.	Méthodes de fiabilité.....	28
III.1	Méthodes d'approximation FORM/SORM.....	28
III.1.1	Dans le cas FORM .....	30
III.1.2	Dans le cas SORM .....	31
III.2	Méthode de simulation de Monte-Carlo.....	32
IV.	Estimation de la fiabilité .....	34
IV.1	Conclusion .....	38
Chapitre III :.....		39
Optimisation de la maintenance des pipelines corrodés .....		39
I.	Introduction.....	40
II.	Objectif de la maintenance.....	40
III.	Evolution des politiques de maintenance.....	41
IV.	Politique de maintenance basée sur l'âge.....	44
IV.1	Critère de coût .....	44
IV.2	Critère de disponibilité .....	45
V.	Optimisation de la maintenance.....	47
V.1	Conclusion .....	49
Conclusion générale.....		50

## Liste des figures

**Figure I.1-** Morphologie de la corrosion.

**Figure I.2-** Corrosion uniforme d'un métal a l'échelle microscopique.

**Figure I.3-** Corrosion sous contrainte d'un acier inoxydable.

**Figure I.4-** Corrosion par piqûres de l'aluminium.

**Figure I.5-** Une caverne de corrosion.

**Figure I.6-** Corrosion intergranulaire d'un métal.

**Figure I.7-** Mécanisme de corrosion des aciers ordinaires en présence de chlorure.

**Figure I.8-** Courbe représentant la perte d'épaisseurs du métal fonction du temps.

**Figure I.9-** Courbe représentant la perte d'épaisseurs du métal fonction du temps.

**Figure I.10-** Courbe représentant la perte d'épaisseurs du métal fonction du temps.

**Figure II.1-** Interprétation géométrique de l'indice de fiabilité de Hasofer et Lind.

**Figure II.2-** Recherche de l'indice de fiabilité  $\beta$  et du point de conception  $P^*$  dans l'espace standard pour deux variables aléatoires  $\{U\} = \{U_1, U_2\}$ .

**Figure II.3-** Approximation FORM pour deux variables aléatoires  $\{U\} = \{U_1, U_2\}$  dans l'espace standard.

**Figure II.4-** Approximation SORM pour deux variables aléatoires  $\{U\} = \{U_1, U_2\}$  dans l'espace standard.

**Figure II.5-** Probabilité de défaillance du pipeline.

**Figure III.1-** Schéma représentant l'implantation des différentes politiques de maintenances a traves le temps.

**Figure III.2-** Principe de la politique de maintenance selon l'âge.

**Figure III.3-** l'espérance du cout total.

**Figure III.4-** taux de disponibilité.

## **Liste des tableaux**

**Tableau II.1-** Dimensions et caractéristiques des pipelines.

**Tableau II.2-** Paramètres de corrosion du pipeline.

**Tableau III.1-** Paramètres de couts

## **Introduction générale**

Les industries gazières et pétrolières ont une place importante dans l'économie d'un pays et les pipelines contribuent au développement de ces industries en assurant leur fonction de transport et de distribution. Dans une société en pleine croissance et sous une pression économique continue ces ouvrages sont parfois soumis a des conditions de services plus dures que celles prévus a la conception.

Pour faire face a une demande et une compétitivité en perpétuelle augmentation il est impératif de proposer des solutions pour satisfaire la demande tout en assurant la fiabilité d'un réseau, et cela en rénovant des conduites existantes, en remplaçant certaines par de nouvelles ou en installant de nouvelles conduites.

Dans notre présent travail nous nous sommes intéressés uniquement aux tuyaux d'hydrocarbures soumis a la corrosion, en effet la corrosion est le phénomène qui affecte le plus ces ouvrages et engendre des pertes d'argent et de temps, pour cela plusieurs spécialistes ont proposé des modèles prédictif de corrosion afin de planifier la maintenance. Pour pouvoir anticiper la défaillance la fiabilité mécanique a été mise en place, grâce a laquelle on est en mesure de concevoir des actions préventives pour maximiser le rendement d'un pipeline malgré l'incertitude des phénomènes appliqué sur ce dernier. Une défaillance qui survient sur ce genre de structure peut rapidement engendrer des dégâts matériels, humains et écologiques, une stratégie de maintenance optimale est alors nécessaire, plusieurs auteurs se sont penché sur l'élaboration de diverses politique de maintenances pour maximiser la rentabilité et la disponibilité tout en réduisant les coûts.

Le premier chapitre aborde d'abord des généralités sur le phénomène de corrosion puis présente les modèles de corrosion sélectionnés pour notre étude. Le second chapitre commence par définir la fiabilité mécanique puis présente différentes méthodes d'estimation de la probabilité de défaillance pour finir par une application faite sur un pipeline. Le dernier chapitre sera consacré à l'optimisation de la maintenance et se basera essentiellement sur la politique de maintenance selon l'âge.

# Chapitre I :

Modèles de dégradation par  
corrosion

## I. Introduction

De nos jours la corrosion est un phénomène naturel qui dérange tout secteur susceptible d'y faire face à cause de la perte d'argent et de temps qu'il peut engendrer, pour cela plusieurs auteurs se sont penché sur le problème et ont proposé des modèles prédictif de corrosion afin de planifier la maintenance dans le temps et pour interpréter les mesures réalisées en vue de réévaluer le niveau de performance des structures.

Dans ce chapitre nous aborderons d'abord des généralités sur le phénomène de corrosion puis présenterons les modèles de corrosion sélectionnés pour notre étude.

## II. Généralités sur le phénomène de corrosion

### II.1 Définition

La corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par interaction chimique avec le milieu environnant. C'est un phénomène nuisible qui détruit le matériau et réduit ses propriétés [1].

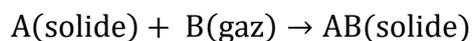
### II.2 Classification de la corrosion

Selon la nature du milieu avec lequel le matériau rentre en interaction, la corrosion peut être classée en deux grandes classes : chimique et électrochimique.

#### II.2.1 Corrosion chimique

C'est une réaction entre le métal et une phase gazeuse. Si cette corrosion se produit à haute température elle est alors appelée « corrosion sèche », en d'autre terme c'est une oxydation du métal par un gaz à haute température.

La réaction qui se produit est sous la forme :



## II.2.2 Corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique, appelée aussi corrosion humide, est le mode de corrosion le plus important et le plus fréquent. C'est une réaction entre le métal et l'environnement humide.

La corrosion humide fait appelle à la fois à une réaction chimique et un transfert de charges électriques (circulation d'un courant), c'est à dire une oxydation du métal sous forme d'ions ou d'oxydes et une réduction d'un agent oxydant qui appartient au milieu environnant. La corrosion électrochimique d'un matériau correspond à une réaction d'oxydoréduction [1], dont :

- la réaction d'oxydation d'un métal est appelée réaction «anodique»,
- la réaction de réduction d'un agent oxydant est appelée réaction «cathodique».

## II.3 Les différentes formes de corrosion

En tenant compte de la forme et des sites de l'attaque, les principaux types de corrosion sont regroupés en deux grandes familles : la corrosion généralisée et la corrosion localisée.

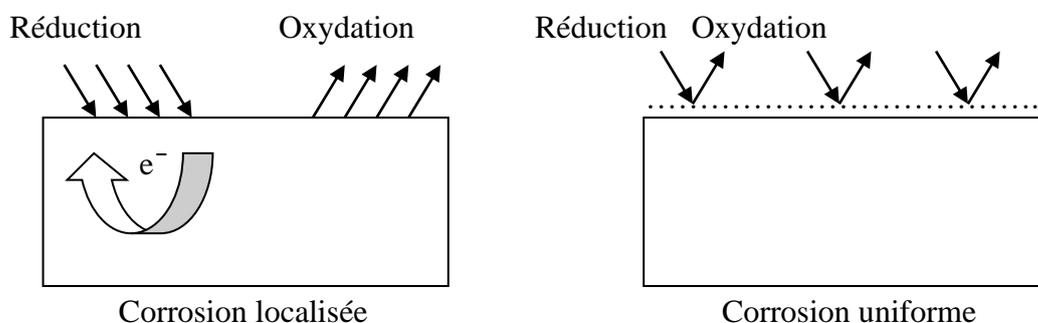


Figure I.1-Morphologie de la corrosion [2].

### II.3.1 La corrosion uniforme

La corrosion uniforme est considérée comme une attaque uniforme sur la surface d'un matériau et constitue le type de corrosion le plus courant. C'est aussi le plus bénin car l'étendue de l'attaque est relativement facile à juger, et l'impact qui en résulte sur les performances du matériau est assez facilement évalué en raison d'une capacité à reproduire et tester de manière cohérente le phénomène.

## Chapitre 1 : modèles de dégradation par corrosion

---

Ce type de corrosion se produit généralement sur des zones relativement grandes de la surface d'un matériau. La surface entière du métal sert à l'oxydation et à la réduction, sans distinction de sites anodiques et cathodiques.



**Figure I.2-**Corrosion uniforme d'un pipeline.

### **II.3.2 La corrosion localisée**

Ce mode de corrosion est le mode le plus fréquent et le plus dangereux car il vise uniquement certaines zones bien distinct du matériau.

La corrosion localisée apparaît lorsque le matériau ou l'environnement ne sont pas homogène et souvent elle pose beaucoup de problèmes, on distingue plusieurs types, à savoir:

#### **II.3.2.1 Corrosion sous contrainte**

Ce type de corrosion est causé par l'action conjuguée d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif. Dans ce cas, la corrosion est localisée et apparaît sous forme de fissures. Les fissures ont typiquement un aspect cassant et se forment et s'étalent dans une direction perpendiculaire à l'emplacement de la contrainte.



**Figure I.3-**Corrosion sous contrainte d'un acier inoxydable [3].

### II.3.2.2 Corrosion par piqûres

Les piqûres sont l'un des types de corrosion les plus destructeurs, car ils peuvent être difficiles à prévoir, à détecter et à caractériser.

La corrosion par piqûres peut être causée par une rupture locale ou par un endommagement du film d'oxyde protecteur ou d'un revêtement protecteur en présence des chlorures. La surface externe est affectée sur une faible surface mais l'attaque se prolonge en profondeur en formant un trou ou une cavité et cela affecte la résistance mécanique du matériau.



**Figure I.4-**Corrosion par piqûres d'un pipeline[2].

### II.3.2.3 Corrosion caverneuse

C'est une forme de corrosion qui peut affecter tout les types d'aciers inoxydables.

Cette forme d'attaque est généralement associée à la présence de petits volumes de solution stagnante dans des interstices, sous des dépôts et des joints, ou dans des cavernes ou crevasses, où l'oxygène est restreint.



**Figure I.5-** Corrosion caverneuse d'un acier [3].

### II.3.2.4 Corrosion intergranulaire

Cette forme de corrosion se manifeste par une attaque localisée aux joints de grains du matériau. La corrosion intergranulaire peut être provoquée par des impuretés présentes à ces joints de grains ou par l'appauvrissement ou l'enrichissement d'un élément d'alliage aux joints de grains.

Cette manifestation est quasiment invisible à l'œil nu mais affecte considérablement la résistance mécanique du métal [1,4].

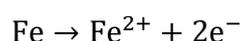


**Figure I.6**-Corrosion intergranulaire d'un pipeline [3].

### II.4 Le processus de corrosion sur une structure

Le phénomène de corrosion débute avec la création d'une pile électrochimique qui se forme lorsque deux parties d'une structure possèdent un potentiel électrique différent. La différence de potentiel résulte souvent des hétérogénéités du matériau ou du milieu environnant. La surface de l'acier est alors constituée d'une multitude de micro-piles, elles-mêmes constituées de zones dites anodiques où les électrons sont libérés et de zones cathodiques où les électrons sont consommés.

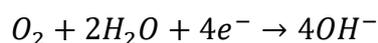
-La réaction anodique est représentée par:



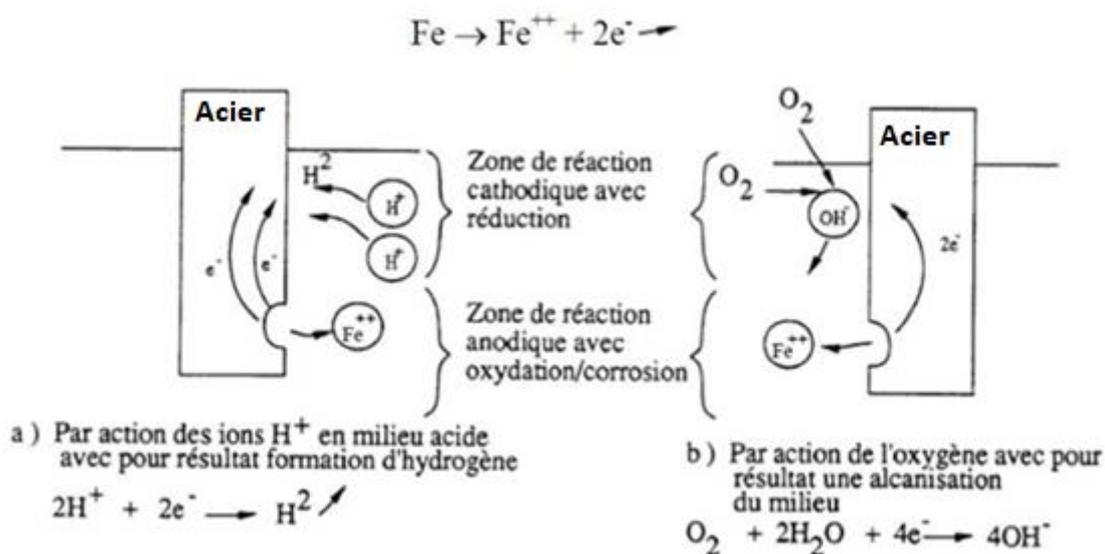
-La réaction cathodique est dépendante de l'environnement. À titre d'exemple, le dégagement d'hydrogène est caractérisé par:



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



Généralement les pipelines sont enterrés entre 0.75m et 1.20m de profondeur ce qui les expose à la corrosion interne et externe et réduit ainsi leur durée de vie [5].



**Figure I.7-**Mécanisme de corrosion des aciers ordinaires en présence de chlorure [6].

### III.Revue des Modèles prédictifs de corrosion

Aujourd'hui pour avoir une bonne conception des différentes structures en acier ou pour leurs gestions dans le temps, les modèles prédictifs de corrosion nous sont d'une grande aide.

Un recensement non exhaustif de certains de ces modèles est présenté ci-après :

#### III.1 Modèles empirique et autres modèles notable

Dans la plupart des études sur la fiabilité (en fonction du temps) des structures en acier, l'effet de la corrosion a toujours été représenté par un taux de corrosion incertain mais constant, qui entraînait avec le temps une perte linéaire de l'épaisseur du métal. Cependant, après plusieurs études menées par divers auteurs, on arrive à conclure qu'un modèle non linéaire est plus approprié. Southwell [5] a proposé un modèle linéaire qui est représenté par :

$$d(t) = 0.076 + 0.038t$$

Et un modèle bilinéaire :

$$d(t) = 0.09t \quad 0 \leq t \leq 1.46ans \quad d(t) = 0.076 + 0.038t \quad 1.46 \leq t \leq 16ans$$

## Chapitre 1 : modèles de dégradation par corrosion

---

Ces deux modèles ont également été améliorés par Melchers [7], en intégrant l'aspect probabiliste.

Plusieurs auteurs se sont mis à utiliser d'autres modèles comme les modèles de puissance pour représenter l'évolution de la perte d'épaisseur due à la corrosion dans le temps, Melchers et Southwell ont en proposé un ou les résultats démontrent qu'après 2 à 5 années d'exposition, la vitesse de corrosion diminue. Contrairement à la variabilité du phénomène qui augmente avec le temps.

Quand il s'agit de la corrosion généralisée du métal enfoui dans l'eau de mer Chernove et Ponomarenko [5] ont proposé un modèle **physico-chimique** qui décrit la perte d'épaisseur de métal en prenant compte du temps d'exposition, des propriétés protectrices de la couche de produit anti corrosion et la vitesse de corrosion a long terme, la relation a été simplifiée comme suit :

$$K = (2P\tau)^{0.5}$$

Ou :

K : perte d'épaisseur de métal ( $\mu\text{m}$ )

$\tau$  : temps d'exposition (année)

P : coefficient caractérisant les propriétés protectrices de la couche de produit de corrosion ( $\mu\text{m}^2/\text{an}$ ).

-En ce qui concerne certains mécanismes comme les corrosions bactériennes, Melchers a montré que ne pas les avoir pris en compte dans les modèles prédictifs était la cause des différences de comportement existants entre l'évolution empirique de la perte d'épaisseur dans le temps et celle obtenue par ces modèles.

Pour remédier à cela, Melchers a suggéré un **modèle phénoménologique** supposé probabiliste en prenant compte les principaux mécanismes de corrosion de l'acier en fonction de la durée d'exposition et d'introduire les variables de la perte d'épaisseur à la surface corrodée.

## Chapitre 1 : modèles de dégradation par corrosion

---

Quant à l'influence des différents facteurs environnementaux sur les mécanismes de corrosion étudié par Melchers sont issues à partir d'études expérimentales menées sur plusieurs sites le long de la côte Est de l'Australie.

### III.2 Modèles Guedes Soares

Le modèle proposé par Guedes Soares et Garbatov [8] est dérivé de la solution de l'équation différentielle de la perte d'épaisseur par corrosion

$$\tau_t r(t) + d(t) = d_\infty$$

Où  $d_\infty$  est la perte d'épaisseur à long terme,  $d(t)$  est la perte d'épaisseur à l'instant 't', et  $R(t)$  est le taux de corrosion, et  $\tau_t$  est le temps de transition, qui peut être calculé comme suit :

$$\tau_t = \frac{d_\infty}{tg\alpha}$$

Où  $\alpha$  est l'angle défini par AB et AC dans la (Figure I.8)

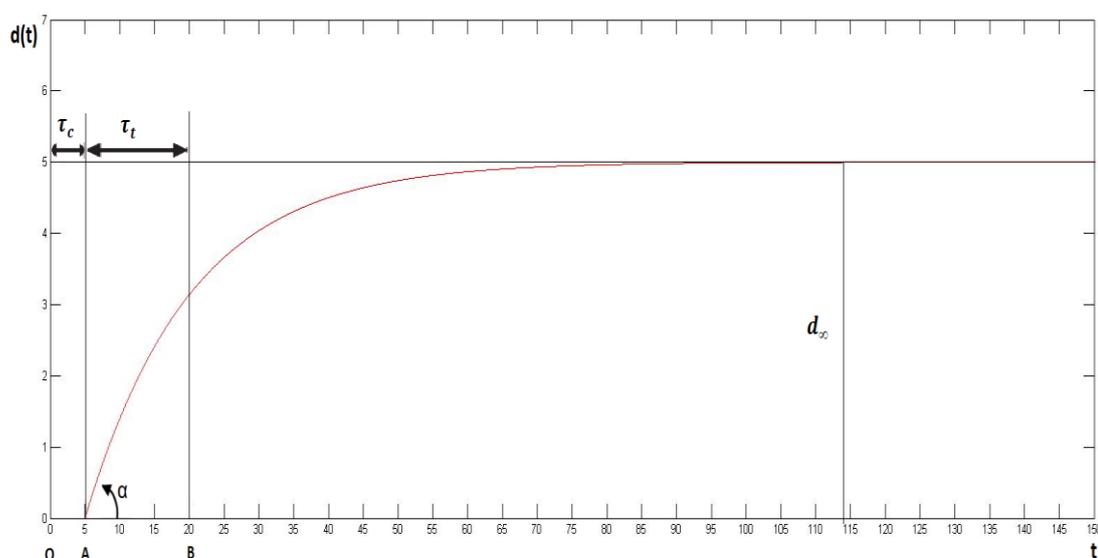
La solution de l'Eq est :

$$d(t) = \begin{cases} 0, & t \leq \tau_c \\ d_\infty(1 - e^{-(t-\tau_t)/\tau_t}) & t > \tau_c \end{cases}$$

Où  $\tau_c$  est la durée de vie du revêtement, qui est égale à l'intervalle de temps entre la mise en place de la peinture sur la surface et le moment où son efficacité est perdue.

Dans ce modèle trois paramètres  $\tau_c$ ,  $\tau_t$  et  $d_\infty$  sont utilisés pour décrire le processus de corrosion.

Guedes Soares et Garbatov ont proposé un modèle de corrosion non linéaire entre les pertes d'épaisseur du métal et le temps. Ce modèle se distingue en trois phases. (Figure I.8)



**Figure I.8**-Courbe représentant la perte d'épaisseurs du métal en fonction du temps. (modèle de Guedes Soares) avec  $[\tau_c = 5 \text{ ans} , \tau_t = 15.2 \text{ ans} , d_\infty = 5 \text{ mm}]$ .

Dans la première phase **[O, A]** on considère qu'il n'y a pas de corrosion car les protections anti corrosion sont encore fonctionnelles.

La deuxième phase **[A, B]** est déclenchée lorsque la protection contre la corrosion est endommagée et c'est ce qui correspond à l'existence d'une corrosion, ce qui diminue l'épaisseur du métal dans le temps.

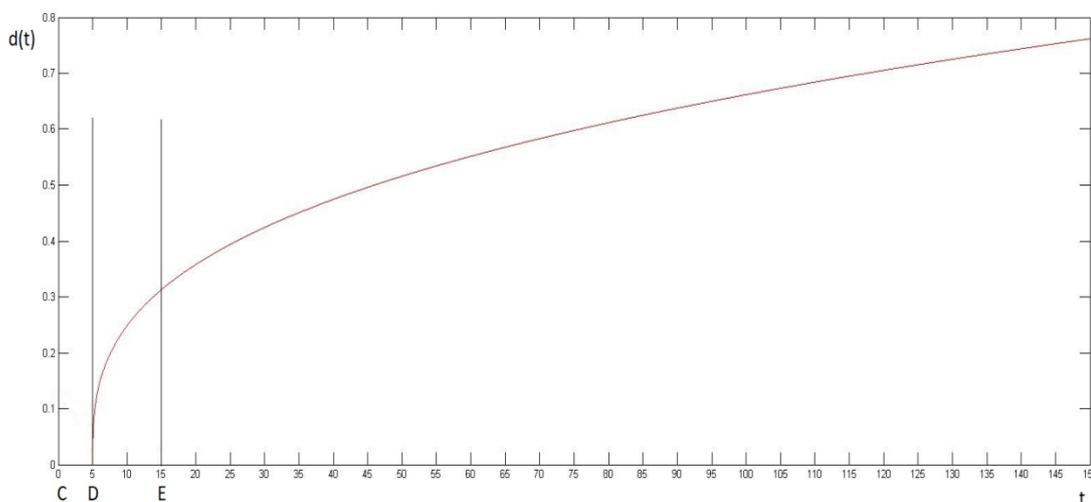
La troisième phase **[B, ∞]** correspond à une croissance lente du processus de corrosion puis à sa stagnation ce qui résulte à une vitesse de corrosion nulle et cela est possible car le matériau corrodé reste sur la surface du métal, la protégeant du contact avec l'environnement corrosif ce qui pousse le processus de corrosion à s'arrêter. Le nettoyage de la surface ou toute action involontaire qui enlèvera ce matériau de cette surface sera à l'origine d'un nouveau départ du processus de corrosion. Cette hypothèse n'est pas prise en compte dans l'étude.

### III.3 Modèles de Paik

Pour pouvoir réagir aux différents éléments qui affectent la corrosion des structures, Paik [6] proposa un modèle de corrosion qui prend en compte l'environnement et la catégorie des éléments structurel du navire, grâce à la courbe (Figure I.9) qui représente la perte

## Chapitre 1 : modèles de dégradation par corrosion

d'épaisseur du métal en fonction du temps nous pouvons déduire que le modèle proposé comporte trois phases :



**Figure I.9**-Courbe représentant la perte d'épaisseur du métal en fonction du temps (modèle de Paik) [ $T_c= 5$ ans,  $T_t=0$ ,  $C_1=0.145$ ,  $C_2=1/3$ ].

Avec:

T : âge du navire (années)

$T_c$  : durée de vie du système de protection (années)

$T_t$  : durée de transition (année). L'hypothèse la plus pessimiste consiste à prendre  $T_t$  égale à 0.

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

-la première phase [**C,D**]correspond à la période d'efficacité du système de protection ce qui résulte a une perte d'épaisseur nul. La durée de vie des revêtements correspond au temps écoulé entre sa mise en place et le moment de l'amorçage de la corrosion, cette durée de vie s'appuie généralement sur la probabilité à l'aide d'une loi log-normale :

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

Avec :

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

$\mu_c$  : Moyenne de  $\ln T_c$  (année)

$\sigma_c$  : Écart type de  $\ln T_c$  (année)

## Chapitre 1 : modèles de dégradation par corrosion

- La deuxième phase [D,E] correspond a une période de transition ou d'amorçage de la corrosion elle survient lorsque le système de protection n'est plus efficace, tout comme Guedes Soares, Paik considère dans son étude que la corrosion démarre immédiatement après la perte d'efficacité du revêtement, en ce qui concerne la période de transition elle est généralement considéré comme une variable qui tend a avoir une allure exponentiel.

-la troisième et dernière phase [E, ∞] représente quant a elle la progression de la corrosion elle s'exprime par une fonction dépendante du temps :

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

Avec :

$d(t)$  : perte d'épaisseur (mm)

En se basant sur le modèle probabiliste, Paik [9] a supposé que la densité de probabilité de la vitesse de corrosion suit la distribution de Weibull. Par conséquent, la fonction de réparation et la Densité de probabilité du coefficient  $c_1$  sont données par :

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{w}\right)^k\right]$$
$$f_{c_1}(x) = \frac{k}{w} \left(\frac{x}{w}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{w}\right)^k\right]$$

Où ' $w$ ' est le paramètre d'échelle inconnu, ' $k$ ' est le paramètre de forme inconnu. En utilisant la méthode des moindres carrés, les paramètres inconnus ' $w$ ' et ' $k$ ' peuvent être déterminés à partir des données de corrosion collectées. Une fois les paramètres d'échelle et de forme ' $w$ ' et ' $k$ ' obtenus, la moyenne et l'écart type du coefficient ' $c_1$ ' peuvent être calculés en fonction de la fonction Gamma comme suit:

$$\mu_{c_1} = \int_0^{\infty} x f_{c_1}(x) dx = w \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

# Chapitre 1 : modèles de dégradation par corrosion

$$\sigma^2_{c_1} = \int_0^{\infty} (x - \mu_{c_1})^2 f_{c_1}(x) dx = w^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - r^2 \left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$$

En appliquant les données de corrosion pour chaque type d'élément primaire, les paramètres probabilistes, c'est-à-dire la moyenne et l'écart type de la vitesse de corrosion des éléments primaires des vraquiers, sont donnés dans Paik et al [6].

## III.4 Modèles de Qin & Cui

Dans les modèles de Southwellet de Melchers on remarque que les systèmes de protection contre la corrosion ne sont pas pris en considération, contrairement au modèles de Guedes Soares et de Paik ou ces systèmes font partie de l'étude. Néanmoins, dans ces études on suppose que la corrosion s'amorce seulement lorsque les systèmes de protection soient complètement inefficace. En d'autres termes, ce modèle considère que le moment de l'amorçage de la corrosion représente la fin de vie ou la perte total de l'efficacité des systèmes de protection. Le modèle développé par Qin et Cui [8] intègre une initiation de la corrosion sous forme de piquûre dès que le système de protection commence à se dégrader. Lorsque le système perd totalement son efficacité, la corrosion devient alors 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.

$$r(t) = 0 \quad 0 \leq t \leq T_{st}$$
$$r(t) = d_{\infty} \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left\{ - \left( \frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} \right\} \quad T_{st} \leq t \leq T_L$$

Avec :

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

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

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

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

# Chapitre 1 : modèles de dégradation par corrosion

---

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

$d_{\infty}, b, h, T_{st}$ : paramètres du modèle à déterminer

La vitesse de corrosion est maximale au temps  $T_A$  :

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

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

Sa valeur est donnée par:

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

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

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

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

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

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

L'avantage avec ce modèle proposé est qu'il est flexible, il peut décrire différents modèles de corrosion en utilisant un format unique. 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 :

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

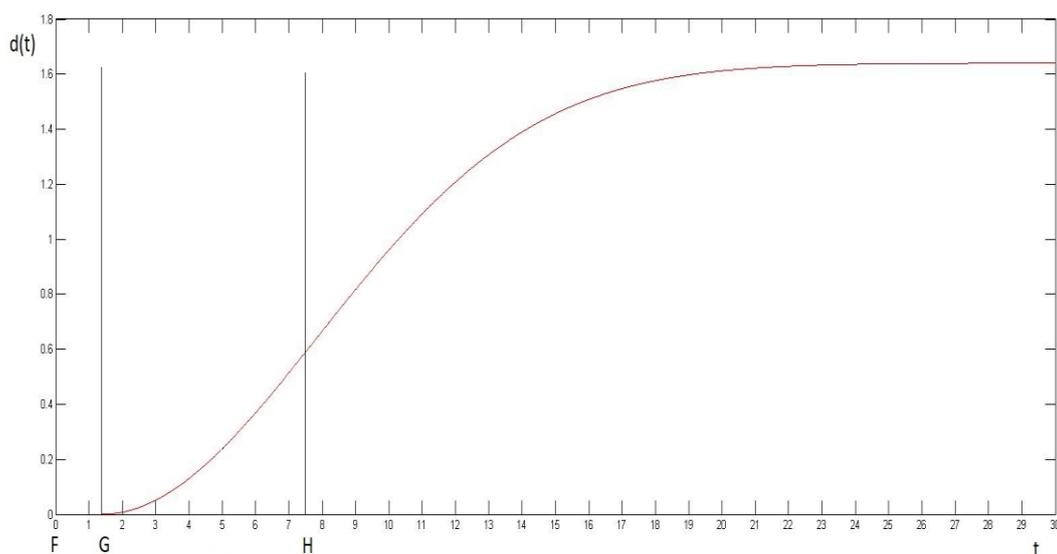
## Chapitre 1 : modèles de dégradation par corrosion

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 :

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

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

Par conséquent, l'ensemble du processus de corrosion peut être divisé en trois étapes représenté dans la (Figure I.10) :



**Figure I.10**-Courbe représentant la perte d'épaisseur du métal en fonction du temps. (modèle Qin & Cui) avec [ $T_{st}=1:38$ ,  $\eta =9:19$ ,  $\beta =1:99$ ;  $d_{\infty} =1:64$  mm].

-La première étape **[F,G]** ou les systèmes de protection sont à 100% efficace ce qui se traduit par une perte d'épaisseur nulle due à l'absence de toute corrosion.

-La deuxième étape **[G,H]** se traduit par une accélération de la corrosion lorsque la corrosion par piqûres s'amorce, résultant d'une perte d'épaisseur rapide.

## Chapitre 1 : modèles de dégradation par corrosion

---

-la troisième et dernière étape [**H**,**T<sub>L</sub>**]ou la phénomène de corrosion décélère ce qui résulte a une décélération de la perte d'épaisseur (ou  $T_L$  est le temps de fin de vie de la structure ou temps au-delà duquel les actions de maintenance ne sont plus programmées).

# Chapitre II :

## Fiabilité mécanique des systèmes corrodés

### I. Introduction

Pour pouvoir anticiper la défaillance des structures mécaniques, la fiabilité mécanique a été mise en place par de nombreux spécialistes, bien que l'incertitude des phénomènes appliqués sur la structure (imprécision géométrique, environnement, variabilité des propriétés des matériaux,...) rendent cela difficile, néanmoins grâce à la fiabilité on est en mesure de concevoir des actions préventives pour maximiser le rendement de ces structures.

Dans ce chapitre nous allons définir la fiabilité mécanique, puis présenter différentes méthodes d'estimation de la probabilité de défaillance, et cela pour finir par une application faite sur un pipeline.

### II. Fiabilité mécanique

La définition de la fiabilité selon l'AFNOR : « *aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant une durée donnée...le terme est aussi utilisé comme caractéristique désignant une probabilité de succès ou un pourcentage de succès* ». Cette définition nous amène à associer la maîtrise de l'incertain à une modélisation probabiliste.

Ainsi le calcul de fiabilité se décline en trois étapes essentielles :

- la sélection des variables aléatoires de base.
- le choix d'une fonction de performance (ou d'état limite).
- le calcul des indicateurs de fiabilité.

#### II.1 Les variables de conception

En fiabilité mécanique il est nécessaire de connaître la nature des paramètres incertains. Les variables de base (appelée aussi variables de conception) sont généralement divisées en deux catégories :

-variabilités externes : qui n'a aucun effet sur l'état interne de la structure (température, séisme, vent...).

-variabilités internes : modifie l'état de la structure (module d'élasticité, coefficient de poisson, coefficient de dilatation thermique,...) [10].

## Chapitre 2 : Fiabilité mécanique des systèmes corrodés

Ces variables de base sont des variables d'entrée dans un calcul de fiabilité, elles sont caractérisées par une loi de densité conjointe de probabilité  $f_{X_1, \dots, X_n}(X_1, \dots, X_n)$

Ou :  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$

$X$  : Est le vecteur des réalisations des variables aléatoires  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ .

Cette information est souvent indisponible, elle est limitée à la connaissance des deux propriétés suivantes :

-la loi marginale de chaque variable  $X_i$  :  $f_{X_i}(X_i)$  ;

-la corrélation entre chaque couple de variables  $(X_i, X_j)$  :  $\rho_{ij}(X_i, X_j)$  [11].

### II.2 Fonction d'état limite

Toute structure est sujette à la défaillance, pour cela il est important de préciser l'état limite au delà duquel cette dernière n'est plus apte à accomplir sa fonction de service en toute sécurité et n'est donc plus considérée comme fiable.

On note  $G$  la fonction d'état limite et qui dépend des variables aléatoires du model :

Ou :

$$G = P_r - P_a$$

$$D_s = \{ \{X\} \in R^k, G(\{X\}) > 0 \}$$

$$D_f = \{ \{X\} \in R^k, G(\{X\}) \leq 0 \}$$

$P_a$  est la pression appliquée.

$P_r$  est la résistance du pipeline.

$D_s$  est le domaine de sureté.

$D_f$  est le domaine de défaillance.

$\{ \{X\} \in R^k, G(\{X\}) = 0 \}$  Est la frontière de la surface d'état limite.

### II.3 Probabilité de défaillance

La probabilité de défaillance  $P_f$  correspond à la probabilité de l'événement  $G(\{X\}) \leq 0$

$$P_f = P(G(\{X\}) \leq 0)$$

## Chapitre 2 : Fiabilité mécanique des systèmes corrodés

---

En introduisant la densité de probabilité conjointe  $f_{\{X\}}$  des variables aléatoires  $\{X\}$  du modèle, la probabilité de défaillance devient :

$$P_f = \int_{R^k}^P f_{\{X\}}(\{X\}) \prod_{i=1}^k dx_i$$

Mais dans la pratique il est rare que cette intégrale puisse être étudiée, ainsi différentes techniques permettent d'estimer la probabilité de défaillance. Elle peut être déterminée par des méthodes directes de simulation ou par l'intermédiaire de l'indice de fiabilité [12].

### II.4 Indices de fiabilité

#### II.4.1 Notion d'indice de fiabilité

Le concept de base de l'indice de fiabilité consiste à déterminer une grandeur associée à un événement (défaillance de structure), qui mesure la fiabilité d'une structure. Plus l'indice de fiabilité est élevé, plus la structure est fiable. Il est ainsi possible de comparer les structures entre elles. De plus la notion d'indice de fiabilité est optimiste il est plus rassurant de dire indice de fiabilité que probabilité de défaillance. L'indice de fiabilité est généralement noté B.

Deux principales propositions d'indices de fiabilité ont été faites :

#### II.4.2 Indice de Cornell

La première proposition est celle de Rjanitzyne, mais reprise et popularisé par Cornell, l'indice est appelé indice de Cornell  $B_c$ . Il est défini comme le rapport entre la moyenne de la fonction d'état limite  $M = G(X)$  et l'écart-type de cette même fonction :

$$B_c = \frac{E(M)}{\sigma(M)}$$

Cet indice est le nombre d'écart-types entre le point moyen  $E(M)$  et l'état limite  $M=0$ . L'indice  $B_c$  est un nombre sans dimension.

Malheureusement, cet indice n'est pas invariant dans les différentes représentations de la fonction d'état-limite  $G(X)$ , ce qui en constitue une limite importante.

### II.4.3 Indice de Hasofer et Lind

Une alternative a donc été proposée pour résoudre Le problème d'invariance qui réside dans l'indice de cornell  $B_C$ . Hasofer et Lind sont à l'origine de cette proposition appelée indice d'Hasofer-Lind  $B_{HL}$ . Cet indice repose sur une transformation d'espace.

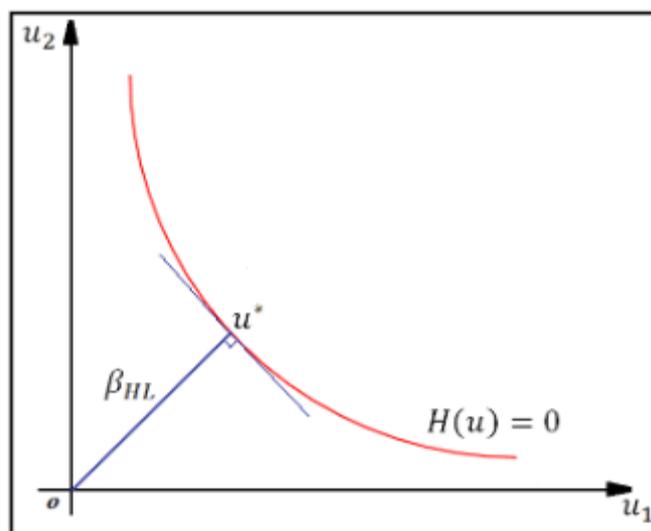
L'espace d'origine est celui des variables aléatoires d'entrée (espace physique) ou chaque variable constitue une dimension de cet espace. On effectue alors un changement de variable vers un nouvel espace de variables Gaussiennes notées  $U_i$  statistiquement indépendantes, de moyenne nulle  $\mu_{U_i} = 0$  et d'écart-type unitaire  $\sigma_{U_i} = 1$  :

$$X_i \rightarrow U_i \text{ Vecteur Gaussien } N(0, 1), \mu_{U_i} = 0, \sigma_{U_i} = 1$$

L'indice de Hasofer-Lind est considéré comme la plus petite distance de l'origine jusqu'à la surface de défaillance dans l'espace standard.

$$B = \min_{H(u)=0} \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}$$

Avec :  $H(u)$  : fonction d'état limite exprimée dans l'espace standard.



**Figure II. 1-** Interprétation géométrique de l'indice de fiabilité de Hasofer et Lind [6].

La valeur de  $B_{HL}$  coïncide avec l'indice Cornell quand la surface de défaillance est hyperplan.

## Chapitre 2 : Fiabilité mécanique des systèmes corrodés

---

L'indice de fiabilité  $B_{HL}$  est défini comme la distance de l'origine O au point  $U^*$  de la surface d'état-limite qui se trouve le plus proche de l'origine [6].

### III. Méthodes de fiabilité

#### III.1 Méthodes d'approximation FORM/SORM

La finalité recherchée par ces méthodes est l'approximation la plus proche de  $P_f$  et cela en passant préalablement par la détermination de l'indice de fiabilité  $B$ , et la définition la plus recommandée de cet indice est celle proposée par Hasofer et Lind.

Plusieurs auteurs dont Hasofer et Lind proposent que ces méthodes se basent sur les points suivant :

-La transformation de l'espace physique des variables de base  $x_i$  en un espace standard de variables aléatoires normales centrées réduites  $u_i$  et indépendantes.

$$\mathbf{T} : \mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$$

-l'expression de la fonction d'état limite  $G$  dans l'espace standard ce qui nous donne un passage de fonction  $G$  vers  $H$ .

L'indice de fiabilité Hasofer-Lind  $B$  est défini comme la distance minimale possible entre l'origine et la surface de l'état limite. Ainsi, la détermination de ce point a deux aspects importants :

-l'optimisation de la distance pour trouver le bon point de distance minimale, avec la contrainte que le point se trouve sur la surface de l'état limite. Ce point de distance minimale sur la surface de l'état limite est appelé «point de conception ( $P^*$ )», et ce point de conception représente le point de défaillance le plus probable.

Diverses approches ont été développées au cours des dernières décennies pour résoudre le problème d'optimisation sous contrainte, comme :

- la méthode de projection par gradient.
- la méthode lagrangienne augmentée.

## Chapitre 2 : Fiabilité mécanique des systèmes corrodés

-la programmation quadratique séquentielle.

Une autre classe de méthodes, qui est l'ensemble des algorithmes largement utilisés basés sur les algorithmes récursifs de Rackwitz Fiessler [10]. Bien que le problème du calcul des fiabilités avec FORM soit réduit à un problème d'optimisation, tout outil d'optimisation est théoriquement possible. Par exemple, des progiciels tels que EXCEL et MATLAB peuvent également être appliqués (voir par exemple Phoon 2008 [13]).

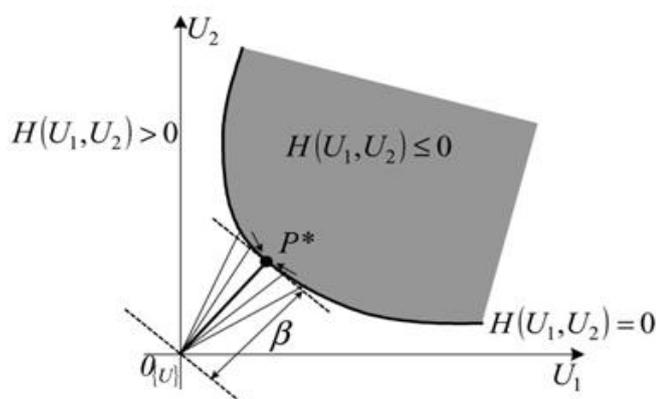
Pour pouvoir choisir la bonne méthode on doit se baser sur plusieurs critères [9] :

- Son efficacité, soit nombre d'appels à la fonction d'état limite.
- Son aptitude à trouver le bon point de conception.
- sa capacité à traiter un problème de taille éventuellement important.

Où la convergence vers  $P^*$  est conditionnée par la tolérance fixée sur le critère d'arrêt  $t$  que désignant la  $P^{eme}$  itération du vecteur  $\{U\}$  [10].

$$\text{minimiser } \|\{U\}\| \text{ tel que } H\{U\} \leq 0$$

$$\|\{U\}_{p+1} - \{U\}_p\| \leq t(\{U\})_p$$



**Figure II.2-**Recherche de l'indice de fiabilité  $\beta$  et du point de conception  $P^*$  dans l'espace standard pour deux variables aléatoires  $\{U\} = \{U_1, U_2\}$  [10].

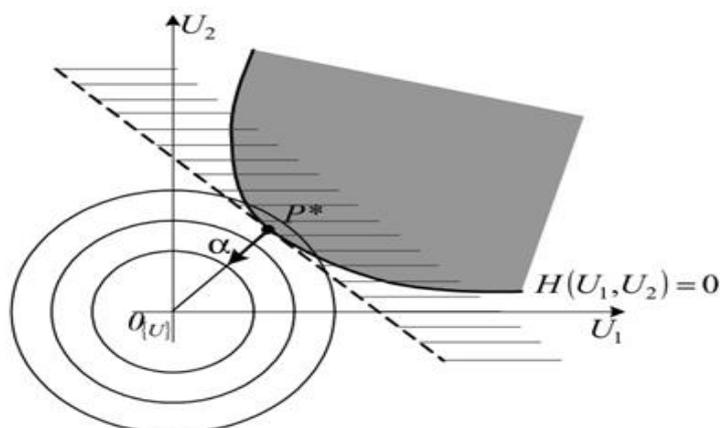
Les approximations du domaine de défaillance sont la base même des méthodes FORM (en anglais, First Order Reliability Method) et SORM (Second Order Reliability Method), après l'obtention de l'indice  $B$  et du point de conception  $P^*$  on peut passer au calcul analytique de l'intégrale.

### III.1.1 Dans le cas FORM

La probabilité de défaillance  $P_f$  s'obtient avec la fonction de répartition  $F$  de la loi normale centrée réduite et où la surface limite est approchée par l'hyper plan tangent au domaine de défaillance.

On aura alors :

$$P_f \approx F(-B)$$



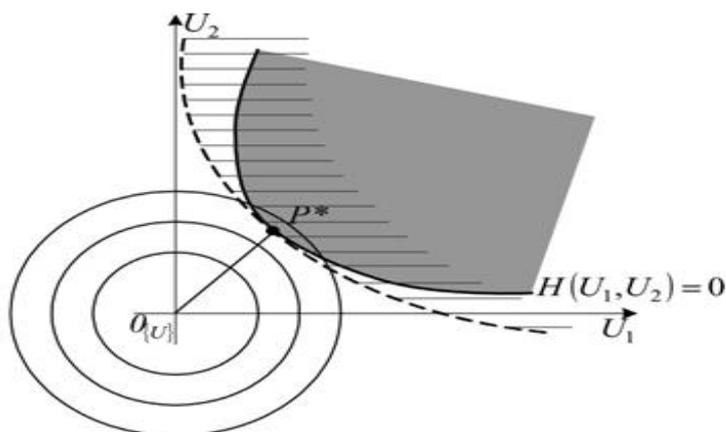
**Figure II.3-**Approximation FORM pour deux variables aléatoires  $\{U\}=\{U_1, U_2\}$  dans l'espace standard [10].

### III.1.2 Dans le cas SORM

Dans le cas d'une fonction d'état-limite qui est fortement non linéaire, l'approximation par la méthode FORM n'est plus adaptée, la solution à ce problème est d'utiliser la méthode de fiabilité du second ordre (SORM), qui implique une approximation du second ordre de la fonction à l'état limite au point de conception.

On démontre alors que la probabilité de défaillance est exprimée comme suit :

$$(P_f)_{SORM} = f(-B) \prod_{j=1}^{n-1} (1 - Bk_j)^{-1/2}$$



**Figure II.4-**Approximation SORM pour deux variables aléatoires  $\{U\} = \{U_1, U_2\}$  dans l'espace standard [10].

### III.2 Méthode de simulation de Monte-Carlo

La simulation de Monte Carlo (MC) est une méthode utilisée pour calculer numériquement les intégrales et l'espérance mathématique. Elle est donc adoptée dans les problèmes de fiabilité pour estimer la probabilité de défaillance. La base des techniques de simulation est illustrée en réécrivant l'intégrale de probabilité de défaillance. L'équation intégrale réécrite est donnée comme suit :

$$p_f = \int_{G(x) \leq 0} f_x(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \prod [G(x)] f_x(x) dx$$

Où  $\prod [G(x)]$  est une fonction caractéristique de la fonction de performance qui est définie comme suit :

$$\prod [G(x)] = \begin{cases} 1 & \rightarrow \text{si } G(x) \leq 0 \\ 0 & \rightarrow \text{si } G(x) > 0 \end{cases}$$

En utilisant la fonction caractéristique définie ci-dessus, le domaine d'intégration est remplacé du domaine de défaillance  $G(x) \leq 0$  à tout l'espace d'échantillonnage. À partir de l'équation précédente, nous pouvons voir que la probabilité de défaillance est la valeur attendue de  $\prod [G(x)]$ , c'est-à-dire que nous pouvons avoir :

$$p_f = \int_{-\infty}^{\infty} \prod [G(x)] f_x(x) dx = E \left( \prod [G(x)] \right)$$

Où E Dénote la valeur attendue. Par conséquent, nous pouvons estimer la probabilité de défaillance par la procédure suivante.

Premièrement, on effectue un grand nombre de tirage des variables aléatoires,  $x^{(i)}, i=1, \dots,$ , puis les fonctions de performance sont évaluées à ces valeurs d'entrée. Enfin, le nombre de tirages conduisant à la défaillance  $n_f$  Est divisé par le nombre total de tirage  $n$  [10], Par conséquent, nous avons :

$$\hat{p}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^1 \prod [G(x^{(i)})] = \frac{n_f}{n}$$

Le coefficient de variation de l'estimateur  $\hat{p}_f$  est :

$$Cov[\hat{p}_f] = \frac{\sigma_{\hat{p}_f}}{E[\hat{p}_f]} = \frac{\sqrt{Var[\hat{p}_f]}}{E[\hat{p}_f]} = \sqrt{\frac{1 - \hat{p}_f}{N \hat{p}_f}}$$

## Chapitre 2 : Fiabilité mécanique des systèmes corrodés

---

Ou  $\text{Var}[\hat{p}_f] = \hat{p}_f(1 - p_f)/N$  est la variance de  $\hat{p}_f$ .

Le coefficient de variation  $\text{Cov}[\hat{p}_f]$  mesure le taux de convergence des résultats de la simulation de Monte Carlo.

Selon l'équation précédente, pour que  $\text{Cov}[\hat{p}_f] = 0.1$  et pour une probabilité de

$p_f = 10^{-m}$ , on aura besoin que  $N = 10^{m+2}$  échantillons.

La MC est une méthode d'échantillonnage (simulation), simple à mettre en œuvre et pouvant être appliquée à presque tous les problèmes de fiabilité et à n'importe quelle précision souhaitée. Cependant, la fonction de performance doit être évaluée un grand nombre de fois avec des valeurs d'entrée échantillonnées pris au hasard, ce qui peut nous faire perdre du temps et de l'argent, pour des problèmes avec des fonctions de performance implicites ou (et) une fiabilité élevée (c'est-à-dire une faible probabilité de défaillance).

### IV. Estimation de la fiabilité

Pour pouvoir estimer et analyser la fiabilité liée aux pipelines sujets à la corrosion nous nous sommes penché sur l'étude d'un pipeline traversant l'Algérie du sud jusqu'à une ville côtière ce qui représente une longue distance avec différents environnements.

Pour atteindre notre but on a besoin de l'expression de l'indice de fiabilité exprimé en fonction de la pression appliquée  $P_a$  et de la résistance du pipeline  $P_r$ .

Ou :

$$G = P_r - P_a$$

$$P_r = \frac{f_y(d_0 - d(t))}{r}$$

Puis en remplaçant la perte d'épaisseur de l'équation de Paik dans l'équation précédente on aura :

$$P_r = \frac{f_y(d_0 - (C_1(t - T_c)^{C_2}))}{r}$$

Ce qui nous donnera un indice de fiabilité comme suit :

$$B = \frac{f_y(d_0 - \mu_{d(t)}) - r\mu_{P_a}}{\sqrt{(f_y\sigma_{d(t)})^2 + (r\sigma_{P_a})^2}}$$

Ou :

$\mu_{d(t)}$  : La moyenne de la perte d'épaisseur

$\sigma_{d(t)}$  : L'écart type de la perte d'épaisseur

Pour illustrer notre estimation de la fiabilité nous nous baserons sur l'**Algorithme I**

---

### Algorithme I : Algorithme pour l'estimation de la fiabilité

---

(1) Démarrer en posant  $t=T$

(2) Générer  $n$  paramètres pour :

$$C_1^{(i)} = W(B_{C_1}, \eta_{C_1})$$

$$C_2^{(i)} = N(\mu_{C_2}, \sigma_{C_2})$$

Ou  $W$  et  $N$ , sont respectivement les fonctions de densité de probabilité de la loi Weibull et la loi normale.

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

(4) Incrémenter et revenir a l'étape 2

(5) Calculer :  $\mu_d = \text{mean}(d)$   $\sigma_d = \sqrt{\text{Var}(d)}$

(6) Calculer

$$B(j) = \frac{f_y(d_0 - \mu_{d(t)}) - r\mu_{P_a}}{\sqrt{(f_y\sigma_{d(t)})^2 + (r\sigma_{P_a})^2}}$$

(7) Estimations de la fiabilité :  $p_f(j) = \Phi(-B(j))$

(8) Incrémentation  $t = t + \Delta t$

---

Dans les tableaux suivants sont regroupées les différentes dimensions et caractéristiques du pipeline en question ainsi que ses paramètres de corrosion utilisés qui seront générés  $n = 5000$  fois dans l'**Algorithme I** :

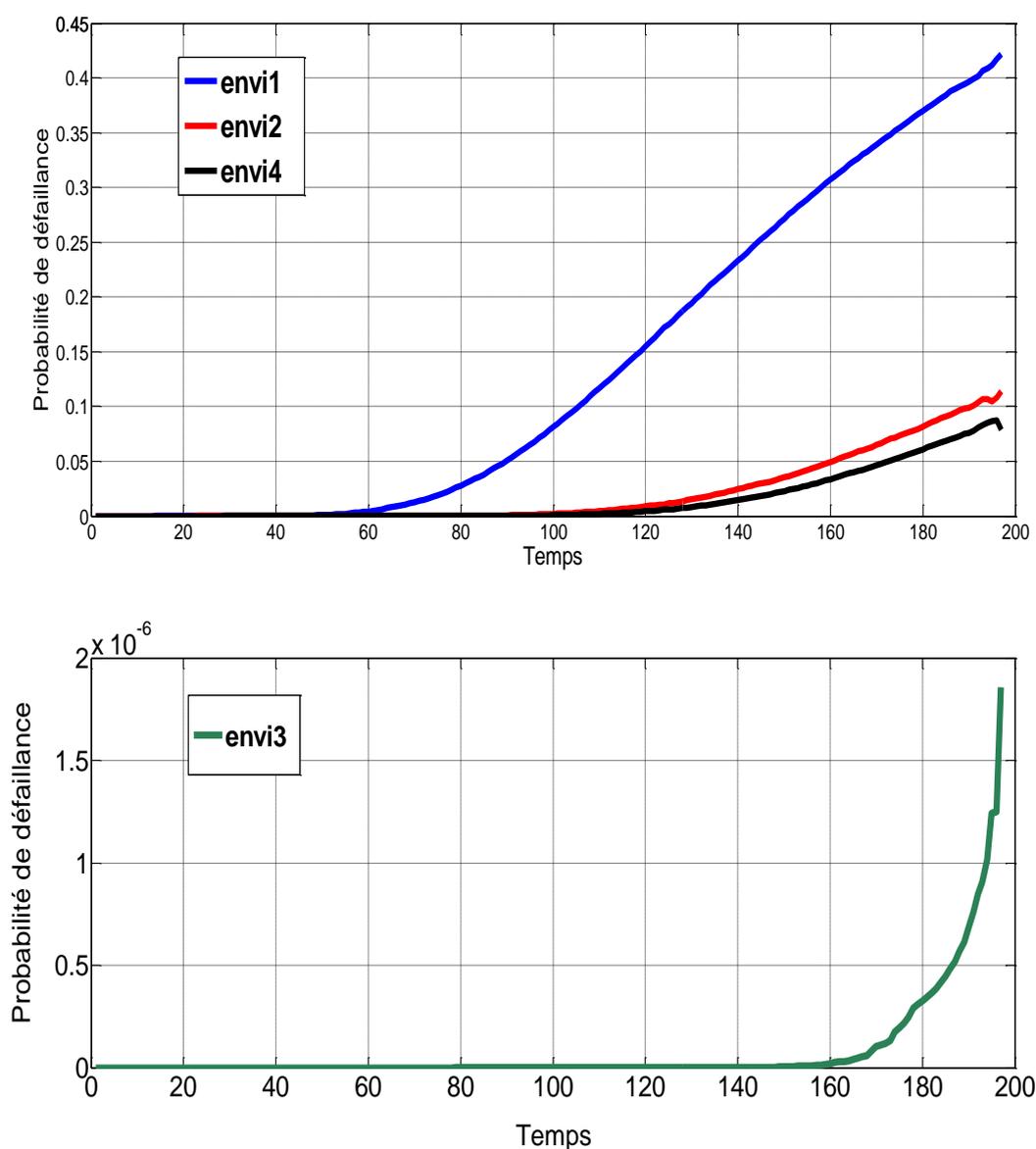
## Chapitre 2 : Fiabilité mécanique des systèmes corrodés

**Tableau II.1**– Dimensions et caractéristiques des pipelines [14].

Variabes	Symboles	Unités	Valeur
Épaisseur initiale	$d_0$	(mm)	10
Rayon intérieur	$r$	(mm)	97
Pression appliquée	$\mu P_a$	(MPa)	7
	$\sigma P_a$	(MPa)	0.1
Contrainte admissible	$f_y$	(MPa)	475

**Tableau II.2**– Paramètres de corrosion du pipeline [14].

Paramètres	Envi.1	Envi.2	Envi.3	Envi.4
$C_1$   $\beta$ $\eta$ $\mu_{C_1}$	1.588	1.278	1.974	1.593
	0.0926	0.0594	0.0438	0.0680
	0.083	0.055	0.043	0.061
$C_2$   $\mu_{C_2}$	0.829	0.793	0.734	0.780



**Figure II.5:**-Probabilité de défaillance du pipeline.

-Pour l'environnement 1, on contraste une probabilité de défaillance progressivement croissante à partir de la 50<sup>ème</sup> année de service, jusqu'à à atteindre un taux de 0.45 et cet important taux de probabilité de défaillance nous fait comprendre que cet environnement est très agressif de part un taux d'humidité très important, ou par une forte concentration d'éléments chimiques très corrosifs.

## Chapitre 2 : Fiabilité mécanique des systèmes corrodés

---

-En ce qui concerne l'environnement 2 et 4, on relève un retard d'amorçage de la probabilité de défaillance par rapport à l'environnement 1 et des valeurs très ressemblantes de moindre importance qui approche respectivement les 0.12 et 0.8, ce qui décrit des environnements plus appropriés pour le pipeline par rapport au précédent ou les éléments extérieurs sont bien moins agressifs.

-L'environnement 3 quant à lui possède une probabilité de défaillance qui ne s'amorce et ne commence à croître que très tardivement dans le temps à partir de la 150<sup>ème</sup> année. Bien qu'elle ait atteint sa valeur maximale très rapidement, elle reste néanmoins très faible (environs  $1.9 \times 10^{-6}$ ), et cela le pousse à être l'environnement le plus sûr de tous, ou l'agressivité des éléments extérieurs qui influent sur le taux de corrosion est très faible, ce qui se traduit par une probabilité de défaillance très faible sur la période étudiée.

### IV.1 Conclusion

Après analyse des résultats obtenus, on peut facilement dire que la probabilité de défaillance varie selon le type d'environnement où se situe le pipeline. Plus l'environnement est agressif (comme dans le numéro 1 ou par exemple le taux de corrosion annuel  $C_1$  est important par rapport aux autres), plus la probabilité de défaillance sera importante avec le temps. Et cela est principalement due à la différence qu'il y'a entre les différents sols des 4 environnements, ou les sols les plus agressifs comportent des facteurs spécifiques tel qu'un taux élevé d'humidité ou encore une forte concentration des éléments chimiques corrosifs.

# Chapitre III :

Optimisation de la  
maintenance des pipelines  
corrodés

## Chapitre 3 : Optimisation de la maintenance des pipelines corrodés

---

### **I. Introduction**

Les oléoducs et les gazoducs sont des systèmes très coûteux qui traversent à la fois des zones écologiquement sensibles ainsi que des zones urbaines avec une population à forte densité. S'ils ne sont pas bien entretenus, les pipelines peuvent à cause d'une défaillance engendrer des dégâts matériels et humains ainsi que des dégâts écologiques à long terme.

Pour cela une stratégie de maintenance optimale est nécessaire et obligatoire pour éviter au maximum les risques de défaillance.

Voyant cette nécessité grandir, beaucoup d'auteurs se sont penchés sur l'élaboration de diverses politiques de maintenances, l'objectif principal de ces dernières est de maximiser la rentabilité en réduisant les coûts et de maximiser la disponibilité.

Ce chapitre sera consacré aux modèles de maintenances et se basera surtout sur la politique de maintenance selon l'âge.

### **II. Objectif de la maintenance**

La maintenance peut être décrite comme « l'ensemble des activités ou des tâches utilisées pour restaurer un élément en un état dans lequel il peut exécuter ses fonctions ».

Les objectifs d'une politique de maintenance consistent à planifier efficacement les activités de maintenance, maximiser la disponibilité et l'efficacité des équipements, réduire au maximum la probabilité de défaillance, contrôler la détérioration, assurer un fonctionnement sûr et correct, et minimiser le coût de maintien d'une unité opérationnelle dans un niveau de sécurité acceptable.

## Chapitre 3 : Optimisation de la maintenance des pipelines corrodés

---

### III. Evolution des politiques de maintenance

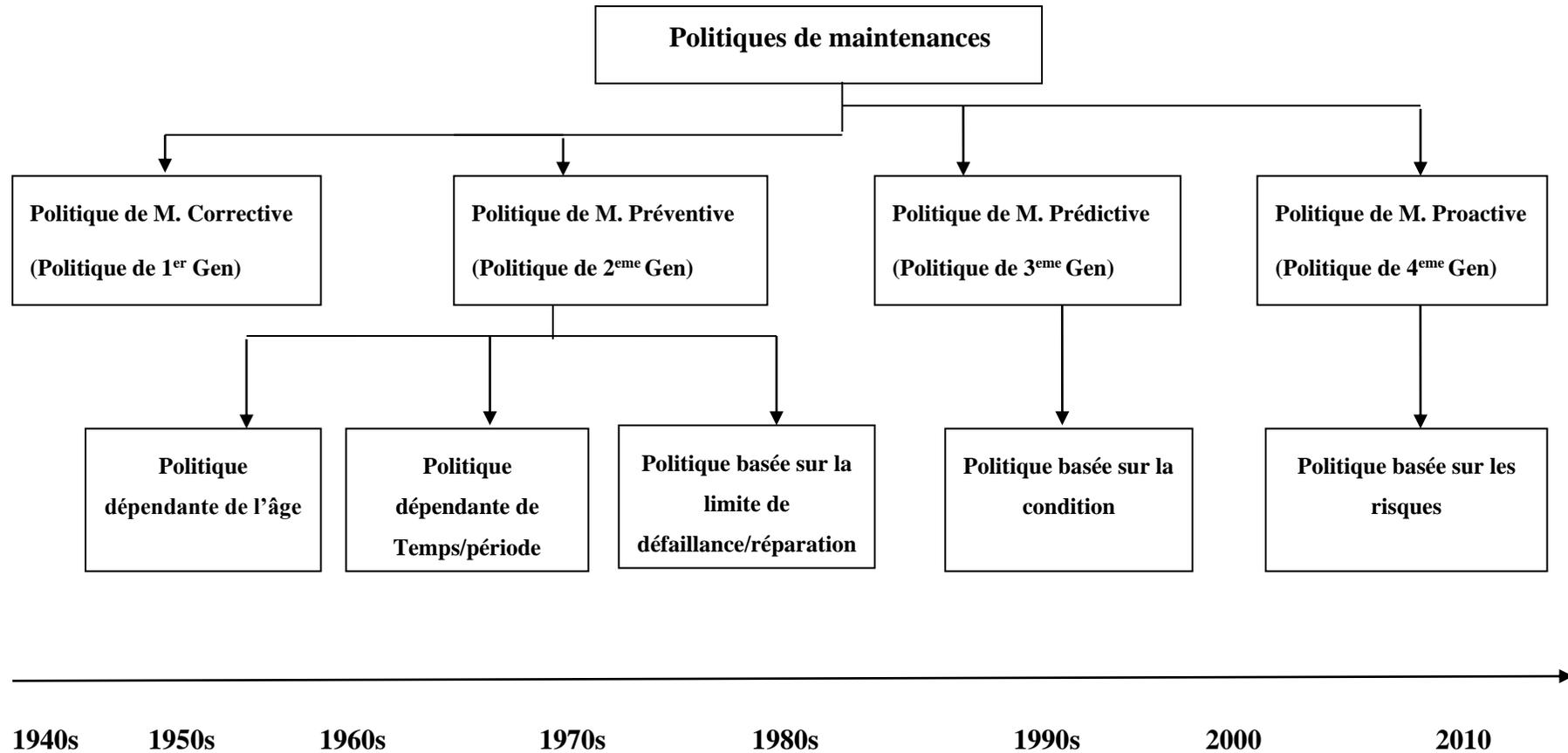
Les politiques de maintenance ont évolués avec le temps et peuvent être classés en se basant sur les zones géographiques et le temps, La **Figure III.1** décrit les différentes phases d'évolution des politiques de maintenance.

La première phase à commencé dans les années 40, lorsque les auteurs de politiques se sont appuyés sur une philosophie de maintenance corrective, «réparer en cas de panne». La politique peut également être reconnue comme étant réactive car les actions de réparation ou de remplacement sont effectuées uniquement en cas de panne d'équipement ou d'unité [15].

Dans la deuxième phase, au cours des années 1970, les politiques reposaient principalement sur l'approche de maintenance préventive. Dans cette génération de politiques de maintenance, l'objectif était axé sur des actions préventives pour réduire le taux de défaillance et les conséquences de la défaillance (par ex. temps d'arrêt long, perte de production et coût d'entretien important) [16].

Contrairement à la maintenance corrective les activités de maintenance ont été effectuées avant la défaillance de l'équipement ou de l'unité. La philosophie de la politique de la deuxième phase est basée sur les révisions, c'est-à-dire la réparation de l'équipement / de l'unité à des intervalles en fonction de l'âge ou du temps de service, ou de la limitation du nombre de pannes et de réparations.

## Chapitre 3 : Optimisation de la maintenance des pipelines corrodés



**Figure III.1** : Schéma représentant l'implantation des différentes politiques de maintenances a travers le temps [19].

## Chapitre 3 : Optimisation de la maintenance des pipelines corrodés

---

Les autres extensions des politiques sont prédictives et proactives, elles visent à réduire les coûts et améliorer la fiabilité. Ces politiques plus stratégiques telles que la maintenance conditionnelle qui est centrée sur la fiabilité, la gestion de la maintenance assistée par ordinateur et les systèmes d'information ont été adoptés depuis les années 80; cependant, le travail initial a été introduit dans les années 1960 ces politiques peuvent être considérées comme la troisième phase des politiques de maintenance. La majeure partie de la littérature relative à la troisième phase s'est étendue sur deux décennies entre 1980 et 2000. Dans ces politiques, les décisions d'entretien ont été prises en fonction de l'état de l'équipement. L'état de l'équipement était surveillé à intervalles de temps réguliers ou sur une base continue. La maintenance préventive s'effectue une fois l'état d'usure de l'unité atteint un niveau de seuil prédéfini [17].

La quatrième génération de politiques de maintenance est apparue au XXI<sup>e</sup> siècle et a été reconnue comme l'approche la plus adaptative dans un passé récent où les politiques de maintenance sont caractérisées par une inspection et une maintenance basées sur les risques. Ces politiques sont également appelées politiques proactives [18]. L'objectif principal de ces politiques est d'éviter l'échec et d'atténuer les causes profondes avant que l'échec ne survienne en insistant sur les conséquences importantes et parties les plus vulnérables d'une infrastructure. La différence fondamentale entre la maintenance prédictive et les politiques de maintenance proactive sont que les décisions se concentrent principalement sur l'état des équipements alors que les derniers considèrent le risque d'échec [19].

## Chapitre 3 : Optimisation de la maintenance des pipelines corrodés

### IV. Politique de maintenance basée sur l'âge

La politique de maintenance basée sur l'âge consiste à effectuer un remplacement préventif seulement lorsque le système atteint l'âge  $T$  qui est la période de remplacement préventif préalablement déterminé.

La durée de la période  $T$  est choisie de manière à effectuer le remplacement avant le moment où on estime que le système risque d'être défaillant. Toutefois si une panne survient avant cette période  $T$  un remplacement correctif est alors effectué.

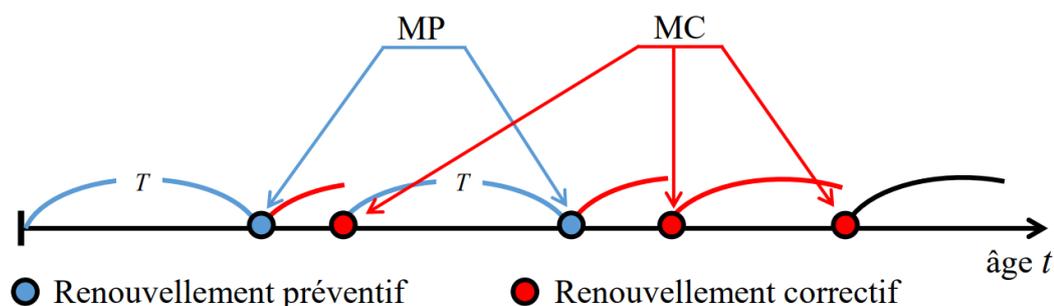


Figure III.2 : Principe de la politique de maintenance selon l'âge [14].

#### IV.1 Critère de coût

On note  $C(T)$  l'espérance du coût de maintenance par unité de temps, pour la politique de maintenance selon l'âge cette espérance est formulée comme suit :

$$C(T) = \frac{C_c F(T) + C_p R(T)}{\int_0^T R(t) dt}$$

Avec :

$T$  : âge de remplacement préventif.

$C_c$  : Coût de la maintenance corrective.

$C_p$  : Coût de la maintenance préventive.

## Chapitre 3 : Optimisation de la maintenance des pipelines corrodés

---

Ainsi l'âge optimal  $T^*$  pour effectuer un remplacement correspond au minimum de la fonction  $C(T)$

### IV.2 Critère de disponibilité

Sur un cycle de renouvellement, l'espérance du temps de bon fonctionnement est :  $\int_0^T R(T) dt$  et la durée totale est égale soit à  $t + t_c$  ( $t < T$ ) dans le cas d'une MC ou  $T + t_p$  dans le cas d'une MP avec  $t_c$  et  $t_p$  qui représente les durées moyennes des maintenances corrective et préventive respectivement, le premier scénario a une probabilité  $F(T)$  et le second  $F(T) = R(T)$

A partir de ces hypothèses, l'espérance de la période de renouvellement de ce modèle s'écrit :

$$E = \int_0^T R(T) dt + t_c F(T) + t_p R(T)$$

La disponibilité correspond au rapport entre l'espérance du temps de bon fonctionnement et l'espérance de la période de renouvellement, ainsi un modèle de disponibilité peut être formulé et s'écrit comme suit :

$$A(T) = \frac{\int_0^T R(T) dt}{\int_0^T R(T) dt + t_c F(T) + t_p R(T)}$$

On peut facilement voir que pour maximiser la disponibilité il faut minimiser la fonction des coups de maintenances.

Plusieurs extensions ont été développées à partir du modèle initial. Par exemple :

Tahada et Nishida [20] considèrent qu'il n'est pas raisonnable de remplacer le système après sa première défaillance alors qu'il se peut qu'il n'ait même pas fonctionné 10% de son âge  $T$  (âge optimal de remplacement), donc ils suggèrent que le système soit remplacé préventivement lorsque il atteint son âge  $T$  ou lorsque une défaillance survient après  $t_a$  (avec :  $0 < t_a < T$ ), si la défaillance survient avant  $t_a$  une MC minimale est alors effectuée.

## Chapitre 3 : Optimisation de la maintenance des pipelines corrodés

---

Nakagawa [21] quant a lui a développé un modèle appelé « modèle de maintenance T-N » qui suggère que le système soit est remplacé préventivement lorsqu'il atteint un âge T ou lorsqu'il subit N défaillances.

Toutefois cette politique a des avantages mais aussi quelques inconvénients, et l'inconvénient principal est la nécessité de surveiller l'âge du système ce qui est difficile pour les systèmes complexes, de plus comme chaque panne décale les interventions suivantes cela rend alors impossible l'établissement d'un calendrier de MP à long terme [14].

## Chapitre 3 : Optimisation de la maintenance des pipelines corrodés

---

### V. Optimisation de la maintenance

Après avoir estimé la fiabilité du pipeline au chapitre précédent pour 4 différents environnements. En s'appuyant sur les paramètres des **Tableau II.1** et **Tableau II.2** et sur les paramètres de coût regroupés dans le **Tableau III.1**, ainsi que sur les résultats obtenus lors de l'estimation de la fiabilité, on s'apprête grâce à ça et à la politique de maintenance choisies à optimiser l'intervalle de temps entre maintenance avec la minimisation de l'espérance du coût total.

Pour cela l'**Algorithme II** décrit les étapes à suivre :

---

**Algorithme II** : Algorithme pour l'optimisation de la maintenance

---

(1) Appliquer l'**Algorithme I**

(2) Poser et calculer  $R = 1 - p_f$

(3) générer  $n$  paramètres pour le calcul de l'espérance de coût total :

$$C^{(i)} = \frac{C_c p_f^{(i)} + C_p R^{(i)}}{\int_0^t R^{(i)} dt}$$

(4) Revenir à l'étape 3

(5) Incrémenter  $t$

---

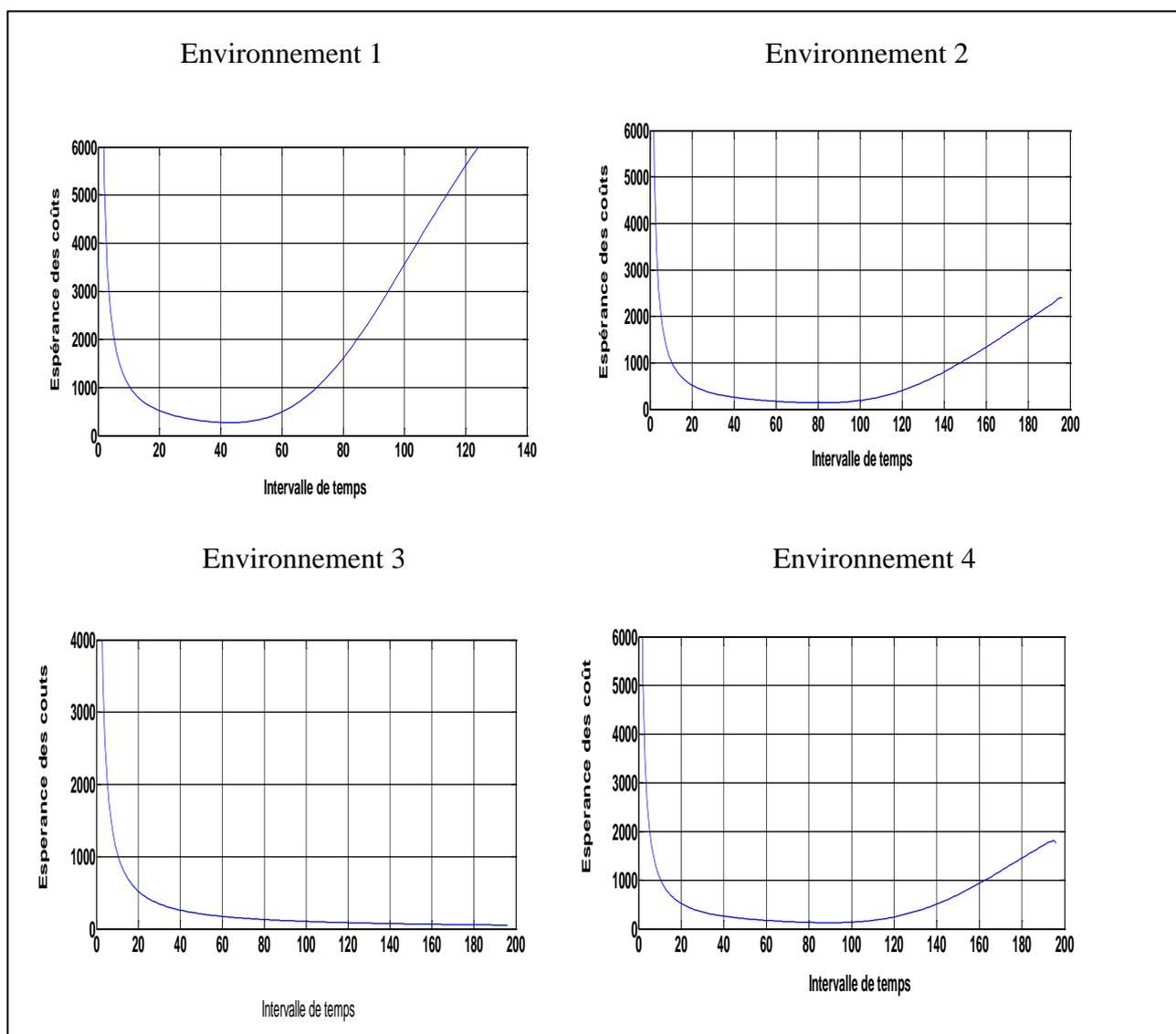
Les paramètres de coûts utilisés pour l'**Algorithme II** sont regroupés dans le **Tableau III.1** qui seront ensuite générés  $n = 196$  fois.

## Chapitre 3 : Optimisation de la maintenance des pipelines corrodés

**Tableau III.1 : Paramètres de coûts**

Paramètres	Symbole	Valeur
<b>Coût correctif</b>	$C_c$	4000K€
<b>Coût préventif</b>	$C_p$	10400€

Grace au logiciel Matlab on a pu tracer les courbes de l'espérance du coût total pour chaque environnement, et qui sont représentés dans la **Figure III.3**



**Figure III.3 : L'espérance du coût total**

## Chapitre 3 : Optimisation de la maintenance des pipelines corrodés

---

- Dans le 1<sup>er</sup> environnement la fonction du coût de maintenance par unité de temps atteint son minimum a  $T=44$ ans pour un coût de maintenance de 268€/an, et vu que cela est le coup optimal, la maintenance peut se faire vers la 44<sup>ème</sup> année.
- Pour l'environnement 2, le minimum de la fonction du cout est atteint a  $T=81$ ans et cela accompagné par un cout de maintenance de 141€/an en conséquent la maintenance se fera a la 81<sup>ème</sup> année pour un cout optimal.
- En ce qui concerne l'environnement 3 le minimum de la fonction de cout est atteint a  $T=196$ ans pour un cout de maintenance de 53€/an du coup pour une bonne optimisation la maintenance se fera a la 196<sup>ème</sup> année.
- Pour l'environnement 4 la fonction du coût de maintenance par unité de temps atteint son minimum a  $T=89$ ans pour un cout de 126.5€/an, en conséquent la maintenance se fera a la 89<sup>ème</sup> année pour un cout optimal.

### V.1 Conclusion

On constate que plus l'environnement ou se situe le pipeline est agressif comme dans l'environnement 1 plus les risques d'une défaillance qui pourrait entrainer des pertes économiques ainsi que des catastrophes écologiques sont grandes. Pour cela une optimisation de la maintenance a été grandement nécessaire. Après l'application de la politique de maintenance selon l'âge sur notre pipeline, l'intervalle de temps optimal pour une maintenance a été estimé pour chaque environnement. Ce qui nous permet d'un côté de minimiser les pertes d'argents au maximum, ainsi que diminuer de manière importante les risque de pollution.

## **Conclusion générale**

Dans cette étude nous avons proposé une méthodologie pour la gestion durable des pipelines sujets à la dégradation par corrosion, et cela pour une protection écologique et une rentabilité des coûts maximal.

pour commencer on a expliqué le processus de corrosion et le phénomène de la perte d'épaisseur du métal au fil du temps grâce au différents modèles de corrosion existants, ensuite et après avoir fait une synthèse sur la fiabilité mécanique et avoir décrit les différentes méthodes de fiabilité, grâce au modèle de Paik déjà défini et à la méthode de simulation de Monte-Carlo on a pu estimer la fiabilité du pipeline dans différents environnements avec des paramètres différents l'un de l'autre.

Grâce à cela on a trouvé que plus l'environnement en question résultait à une probabilité de défaillance importante avec le temps plus il était agressif et très corrosif pour le pipeline et qu'il fallait donc agir en conséquent.

Pour finir, dans la dernière partie de ce mémoire on s'est penchés sur l'optimisation de la maintenance. On a revu les différentes politiques de maintenance qui se sont succédés à travers le temps et cela avant de choisir la politique selon l'âge pour notre étude, pour qu'ensuite grâce à la fiabilité du pipeline déjà estimée on puisse passer à l'optimisation de la maintenance, ou en se basant sur le modèle de critère de coût on a pu estimer les différents coûts et les intervalles de temps optimaux entre chaque maintenance pour chaque environnement.

Grâce à notre étude on a pu se rendre compte que plus l'environnement était agressif et corrosifs pour le pipeline plus l'intervalle de temps entre maintenance est réduit et que l'espérance de coût est élevée.

## **Bibliographie :**

- [1]-Bensabra, H. "Corrosion et protection des métaux." Cours (2016).
- [2]-Saigaa, N. "Etude physicochimique de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone en milieu acide sulfurique." cours (2016).
- [3]-Crolet, J-L. "Towards a unified mechanism of the various forms of hydrogen occurrence in the aqueous corrosion of steel." *Revue de Métallurgie* 101.12 (2004): 1053-1086.
- [4]- Scully, John Christopher. "The fundamentals of corrosion. 2." (1978).
- [5]-Southwell, C. R., J. D. Bultman, and C. W. Hummer. "Estimating service life of steel in seawater." *Seawater corrosion handbook* 87 (1979): 374.
- [6]-Yacine, S. "Optimisation des méthodes d'inspection des pipes." These de doctorat (2014).
- [7]-Melchers, Robert E. "Corrosion uncertainty modelling for steel structures." *Journal of Constructional Steel Research* 52.1 (1999): 3-19.
- [8]-Soares, C. Guedes, and Yordan Garbatov. "Reliability of maintained, corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads." *Marine Structures* 12.6 (1999): 425-445.
- [9]-Paik, Jeom Kee, Sung Kyu Kim, and Sang Kon Lee. "Probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of bulk carriers." *Ocean Engineering* 25.10 (1998): 837-860.
- [10]-Nahal, Mourad. *Etude mecano-fiabiliste des pipelines destines aux hydrocarbures*. Diss. These de doctorat en génie mécanique. Université Badji Mokhtar–Annaba, 2016.
- [11]-Qin, Shengping, and Weicheng Cui. "Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements." *Marine Structures* 16.1 (2003): 15-34.
- [12]-Fahsi, Adil. *Application des techniques de fiabilité pour l'estimation des incertitudes des résultats de simulations numériques en hydrodynamique des rivières*. Diss. École de technologie supérieure, 2009.
- [13]-Phoon, Kok-Kwang, ed. *Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications*. CRC Press, 2008.

- [14]- Ait Mokhtar, El.Hassene "Optimisation de la sûreté de fonctionnement de la maintenance des systèmes complexes par les réseaux bayésiens" Thèse de doctorat en génie mécanique. Université de BEJAIA 2016.
- [15]-Barnard, Ian. "Asset Management—An Insurance Perspective." *Engineering Asset Management*. Springer, London, 2006. 44-53.
- [16]-Usher, John S., Ahmed H. Kamal, and Wasim Hashmi Syed. "Cost optimal preventive maintenance and replacement scheduling." *IIE transactions* 30.12 (1998): 1121-1128.
- [17]- Moan, orgier. "Reliability-based management of inspection, maintenance and repair of offshore structures." *Structure and Infrastructure Engineering* 1.1 (2005): 33-62..
- [18]-Arunraj, N. S., and J. Maiti. "Risk-based maintenance—Techniques and applications." *Journal of hazardous materials* 142.3 (2007): 653-661..
- [19]-Iqbal, Hassan, et al. "Inspection and maintenance of oil & gas pipelines: a review of policies." *Structure and Infrastructure Engineering* 13.6 (2017): 794-815.
- [20]-Tahara, A. K. I. H. I. K. O., and T. O. S. H. I. O. Nishida. "Optimal replacement policy for minimal repair model." *Journal of the operations Research Society of Japan* 18.3-4 (1975): 113-124.
- [21]-Nakagawa, Toshio. "Modified periodic replacement with minimal repair at failure." *IEEE Transactions on Reliability* 30.2 (1981): 165-168.