



République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère  
de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA-BEJAÏA



Faculté de Technologie  
Département de Génie Électrique  
Spécialité Maintenance Industrielle

## **Projet de Fin d'Etudes**

**En vue de l'obtention du diplôme**

**MASTER**

**En Electromécanique, spécialité : Maintenance Industrielle**

### *Thème*

---

Evaluation de l'efficacité de la maintenance dans les  
modèles de réduction de l'âge virtuel

---

**Présenté par :**

**ZEFFANE Farid**

**Devant le jury composé de :**

**Mr. LAGGOUNE Radouane**

**Promoteur**

**Mr. ZOUGAB Nabil**

**Président**

**Mr. AIT MOKHTAR El Hassene**

**Examineur**

**Année universitaire : 2022/2023**

# Remerciements

Avant tout, nous remercions **DIEU** le tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à **Monsieur LAGGOUNE Radouane** pour son encadrement précieux tout au long de mon mémoire. Ses conseils d'experts et éclairés et son soutien constant ont grandement contribué à la réussite de mon travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers les membres du jury qui ont accepté de **juger** mon travail. Je les remercie sincèrement pour leur participation et leur précieuse contribution.

Enfin je remercie **ma famille** et **mes amis**, d'avoir été là pour moi tout au long de ce travail.

## Table des matières

Introduction générale .....	1
Chapitre I : Notions et Concepts de la maintenance .....	2
Introduction .....	2
1. Sûreté de Fonctionnement .....	2
2. La maintenance .....	2
3. Types de maintenance .....	3
3.1. Maintenance corrective .....	4
- Maintenance curative .....	4
- Maintenance palliative .....	4
3.2. Maintenance Préventive.....	4
- Maintenance préventive systématique .....	4
- Maintenance préventive conditionnelle.....	4
- Maintenance préventive prévisionnelle.....	5
3.3. Maintenance mixte.....	5
4. Autres formes et types de maintenance .....	5
- Maintenance améliorative .....	6
- Maintenance adaptative .....	6
- Maintenance opportuniste.....	6
- Maintenance proactive.....	6
5. Optimisation de la maintenance .....	6
5.1. Les objectifs de la maintenance .....	7
- Les objectifs opérationnels .....	7
- Les objectifs économiques .....	7
6. La fiabilité .....	8
- Fiabilité opérationnelle .....	8
- Fiabilité intrinsèque .....	8
- Fiabilité prévisionnelle .....	8
6.1. Fonctions statistiques utilisées en fiabilités .....	8
- Fonction de fiabilité .....	8
- Fonction de répartition .....	9
- Densité de probabilité.....	9
- Taux de défaillance .....	9
- Taux de réparation instantané .....	10
- MTBF (Mean Time Between Failure) .....	10
- MTTR (Mean Time to Repair) .....	10
6.2. Courbe en baignoire.....	11
7. Lois de probabilité utilisées en fiabilité .....	12
- La loi Exponentielle .....	12
- La loi Normale .....	13

- La loi Gamma.....	13
- La loi de Weibull.....	14
8. Modèles d'efficacité de maintenance.....	15
8.1. Les modèles de base de l'efficacité de la maintenance .....	15
8.1.1. Modèle de maintenance minimale .....	16
8.1.2. Modèle de maintenance parfaite .....	16
8.2. Les Modèles de maintenance imparfaite .....	17
8.2.1. Modèle de Brown-Proschan.....	18
8.2.2. Modèles de réduction de l'intensité de défaillance .....	18
- Modèle de réduction arithmétique de défaillance.....	19
- Modèle de réduction géométrique de défaillance .....	19
8.2.3. Modèles d'âge virtuel.....	20
- Modèles Kijima .....	21
o Modèle Kijima type I.....	21
o Modèle Kijima type II .....	21
- Modèle de réduction proportionnelle de l'âge virtuel .....	21
8.2.4. Modèle hybride .....	22
- Modèle hybride I.....	22
- Modèle hybride II .....	24
Conclusion : .....	24
Chapitre II : Modelisations de l'efficacité de maintenance .....	25
Introduction .....	25
1. Construction du modèle d'âge virtuel.....	25
2. Concept d'âge virtuel des modèles de base .....	25
3. Réduction arithmétique de l'âge de mémoire m ( $ARA_m$ ) .....	26
4. Modèle à mémoire infinie( $ARA_\infty$ ) .....	27
5. Modèle ( $ARA_1$ ) .....	29
6. Estimation des paramètres.....	31
6.1. La méthode de maximum de vraisemblance.....	31
6.2. Exemple d'une estimation des paramètres de Weibull pour un modèle $ARA_1$ .	32
6.3. Evaluation des paramètres .....	34
Conclusion.....	35
Chapitre III : Estimation de l'efficacité de la maintenance de la souffeuse SBO 10 .....	36
Introduction .....	36
1. Présentation de l'entreprise .....	36
1.1. Les produits et la flexibilité de conditionnement de Cevital .....	36
1.2. Organigramme du complexe Cevital .....	37
1.3. Unité conditionnement d'huile de Cevital.....	38
1.4. Présentation de la souffeuse SBO 10 .....	39
1.5. Systèmes fonctionnels de la souffeuse SBO 10.....	40

2. Collecte des données de la souffleuse SBO10 .....	40
2.1. Les données .....	41
3. Estimation des paramètres pour la SBO 10.....	42
3.1. Hypothèse 1 .....	42
➤ L'estimation des paramètres du modèle. MC(ABAO)-MP( $ARA_1$ ).....	42
➤ L'estimation des paramètres du modèle. MC (ABAO)-MP ( $ARA_\infty$ )....	43
3.2. Hypothèse 2 .....	43
➤ L'estimation des paramètres du modèle. MC ( $ARA_1$ )-MP (AGAN) ....	43
➤ L'estimation des paramètres du modèle. MC ( $ARA_\infty$ )-MP (AGAN) ...	44
3.3. Hypothèse 3 .....	44
➤ L'estimation des paramètres du modèle. MC ( $ARA_1$ )-MP ( $ARA_1$ ).....	44
➤ L'estimation des paramètres du modèle. MC ( $ARA_\infty$ )- MP ( $ARA_\infty$ )...	44
3.4. Hypothèse 4 .....	45
➤ Estimation des paramètres du modèle MC (ABAO)-MP (BP).....	45
Conclusion.....	45
Conclusion générale .....	46
Bibliographie	

## Liste des abréviations

SdF	La Sûreté de Fonctionnement
NF	Normes françaises
MP	Maintenance préventive
MC	Maintenance corrective
AFNOR	Association française de normalisation
MTBF	Mean Time Between Failure (Temps moyen entre défaillances consecutives)
MTTR	Mean Time to Repair (Temps moyen pour réparer)
MTTF	Mean Time to Failure (temps moyen avant l'échec)
TBF	Time Between Failure (Temps entre défaillances consecutives)
ABAO	Aussi mauvais que vieux (As Bad As Old)
AGAN	Aussi bon que neuf (As Good As New)
ARA	Modèle à réduction arithmétique de l'âge
$ARA_{\infty}$	Modèle à Réduction arithmétique de l'âge de mémoire infini
$ARA_m$	Modèle à réduction arithmétique de l'âge de mémoire m
BP	Brown-Proschan

## Symboles et notations utilisés

- $\rho$  Le facteur d'efficacité (facteur d'amélioration)
- $\beta$  Le paramètre de la forme de la loi de Weibull
- $\eta$  Le paramètre d'échelle de la loi de Weibull
- $\gamma$  Le paramètre de localisation de la loi de Weibull.
- $K_t$  Le nombre de maintenances (correctives et préventives) entre 0 et  $t$  compris
- $C_i$  Le  $i$  instant de maintenance (corrective ou préventive) avec  $C_0 = 0$
- $W_i = C_i - C_{i-1}$  La  $i$  ème durée inter-maintenances (correctives et préventives)
- $M_t$  Le nombre de MP entre 0 et  $t$
- $N_t$  Le nombre de MC entre 0 et  $t$
- $\rho_c$  L'efficacité des MC
- $\rho_p$  L'efficacité des MP
- $T_i$  L' $i$  ème instant de défaillance
- $H(t)$  Fonction cumulée du taux de défaillance
- $\mu(t)$  Taux de réparation instantané
- $M(t)$  Maintenabilité
- $\lambda(t)$  L'intensité de défaillance (taux de défaillance)

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b>	Les différents types de maintenance	3
<b>Figure I.2.</b>	Courbe en baignoire	11
<b>Figure I.3.</b>	Modèles d'efficacité de maintenance	16
<b>Figure I.4.</b>	Intensité de défaillance, modèle de maintenance minimale	17
<b>Figure I.5.</b>	Intensité de défaillance, modèle de maintenance parfaite	17
<b>Figure I.6.</b>	Intensité de défaillance, modèle Brown-Proschan	19
<b>Figure I.7.</b>	Intensité de défaillance, modèle réduction arithmétique	20
<b>Figure I.8.</b>	Intensité de défaillance, modèle de réduction géométrique	21
<b>Figure I.9.</b>	Intensité de défaillance, modèle hybride I	24
<b>Figure II.1.</b>	Intensité de défaillance, modèle $ARA_m; m = 2$	28
<b>Figure II.2.</b>	Intensité de défaillance, modèle $ARA_\infty$	29
<b>Figure II.3.</b>	Intensité de défaillance, modèle $ARA_1$	31
<b>Figure III.1.</b>	Organigramme du complexe Cevital	38
<b>Figure III.1.</b>	Souffleuse SBO 10	40
<b>Figure III.3.</b>	Systèmes fonctionnel d'une souffleuse SBO 10	41

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Résumé les liens entre les fonctions usuelles de fiabilité	11
<b>Tableau II.1.</b> Intensités de défaillance des modèles de maintenance	31

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Dans un monde où la performance et la fiabilité sont essentielles. La survie et la réussite d'une entreprise repose en grande partie sur l'efficacité de sa maintenance à maintenir le système performant. Une gestion judicieuse de la maintenance permet d'augmenter la fiabilité et la disponibilité des équipements. Ainsi, les entreprises doivent choisir avec des objectifs et des stratégies de maintenance optimales pour assurer le suivi de leurs équipements, afin de garantir leur durabilité, leur sécurité et leur fonctionnement continu.

La quantification de l'efficacité de la maintenance permet d'optimiser les performances, d'allouer efficacement les ressources, de prendre des décisions basées sur des données, d'établir des normes et des objectifs, ainsi que de justifier les investissements. Cela conduit à une meilleure gestion des actifs et à des opérations plus efficaces dans les entreprises et les industries qui dépendent de la maintenance pour maintenir leur performance.

L'évaluation de l'efficacité de la maintenance est aussi importante que la maintenance elle-même. Différents modèles ont été utilisés pour quantifier cette efficacité. Les modèles base considèrent que la maintenance préventive ou corrective est soit parfaite (remise à neuf du système) avec une efficacité maximale, soit minimale (retour à l'état initial avant l'intervention) avec une efficacité nulle. Cependant, pour les système complexe la réalité se situe entre ces deux extrêmes. Qui sont les modèles imparfaits incluent la réduction de l'intensité de défaillance (géométrique ou arithmétique) où la maintenance réduit l'intensité des pannes du système, ainsi que les modèles de réduction de l'âge virtuel où la réparation rajeunit le système. Parmi ces modèles, on trouve les modèles ARA (Arithmetic Reduction Age). Et les modèles hybride qui regroupe les deux modèles. Ces modèles permettent d'évaluer et de quantifier l'efficacité de la maintenance. Le présent mémoire est structuré comme suit :

Dans le chapitre I, nous aborderons plusieurs aspects clés liés à la maintenance, notamment les modèles de fiabilité et la modélisation du processus de défaillance, la fiabilité, les expressions mathématiques utilisées en fiabilité. Afin d'évaluer l'impact de cette maintenance sur la fiabilité et la disponibilité des équipements.

Ensuite dans le chapitre II, nous explorerons en détail la modélisation de l'effet de la maintenance des modèles d'âge virtuel et de leur utilisation dans l'analyse de l'effet de la maintenance sur les systèmes. Cette approche est largement utilisée pour étudier l'impact des activités de maintenance, les modèles à réduction arithmétique de l'âge virtuel (ARA), d'ordre 1 ( $ARA_1$ ), infini ( $ARA_\infty$ ) et de mémoire  $m$  ( $ARA_m$ ).

Enfin dans le chapitre III, nous évaluerons l'efficacité de la maintenance appliquée à une souffleuse du groupe Cevital en utilisant les modèles à réduction arithmétique de l'âge virtuel à l'aide du logiciel MARS (Maintenance Assessment of Repairable Systems), afin d'estimer le facteur d'efficacité de maintenance.

Et nous terminerons avec une conclusion où nous reprendrons les résultats principaux de ce mémoire.

# Chapitre I

### Introduction

Afin d'assurer le bon fonctionnement et la compétitivité d'une entreprise, la maintenance est devenue essentielle. Tous les secteurs d'activité sont confrontés à la nécessité de maintenir la fiabilité et l'état de leurs équipements de production, en surveillant attentivement les installations afin de prévenir les pannes. Tout en se basant sur des modèles d'efficacité de maintenance. Le but de ce chapitre est de présenter la notion de maintenance et ses différents types, ainsi que les lois de fiabilité et les principaux processus stochastiques utilisés dans ce domaine. Enfin nous introduirons les modèles d'efficacité de maintenance. Nous aborderons les modèles de base, les modèles de réduction d'intensité de défaillance et les modèles de réduction d'âge virtuel et les modèles hybrides.

### 1. Sûreté de Fonctionnement

La Sûreté de Fonctionnement (sdf) regroupe des méthodes et outils pour évaluer, prévenir et assurer la fiabilité d'un système tout au long de sa durée de vie. Elle vise à minimiser les défaillances, garantir la disponibilité et maintenir les performances conformes aux objectifs fixés. La sdf englobe la connaissance, l'évaluation, la prévision, la mesure et la maîtrise des défaillances. Son importance réside dans la garantie de la confiance justifiée dans les performances du système, en évitant les défaillances graves ou dépassant les limites acceptables. En résumé, la sdf consiste à évaluer et prévenir les défaillances, assurant ainsi la fiabilité et la performance du système conformément à ses objectifs.

Selon les applications pour lesquelles le système est conçu, la sûreté de fonctionnement peut mettre l'accent sur différents aspects. Elle peut être abordée de manière classique en se basant sur plusieurs propriétés complémentaires qui définissent ses attributs.

- La Fiabilité (Reliability) qui est la continuité du service,
- La Maintenabilité (Maintenability) qui est l'aptitude aux réparations et aux évolutions,
- La Disponibilité (Availability) est le fait que le système soit prêt à l'utilisation.
- La Sécurité: Elle est défini par rapport l'écartement des conséquences catastrophiques sur l'environnement du système

### 2. Maintenance

Selon les normes françaises NF.X 60-010 et 60-011 [1], la maintenance englobe toutes les activités techniques, administratives et de gestion nécessaires tout au long du cycle de vie d'un

bien, afin de le maintenir ou de le rétablir dans un état lui permettant d'accomplir sa fonction requise.

La maintenance inclut donc toutes les actions de dépannage, de réparation, de réglage, de révision, de contrôle et de vérification des équipements matériels tels que les machines et les objets manufacturés, ainsi que des éléments immatériels tels que les logiciels.

L'objectif de la maintenance est de prévenir, éviter ou corriger les dysfonctionnements des systèmes souvent complexes et variés, afin de réduire les coûts d'intervention, de maximiser la durée de fonctionnement et d'optimiser les effets positifs de la maintenance. Il s'agit donc de planifier les dates et les types d'interventions sur ces systèmes.

Pour atteindre les objectifs de la maintenance, il est nécessaire d'avoir une connaissance approfondie des stratégies et des actions à mettre en œuvre. Afin de prolonger la durée de vie des équipements et de garantir leur fonctionnement optimal.

### 3. Types de maintenance

La maintenance comprend deux aspects essentiels qui sont exprimés par les termes "maintenir" et "rétablir". Le premier terme implique une action préventive, tandis que le second se réfère à une action corrective. Pour prendre une décision quant à laquelle de ces actions entreprendre, il est nécessaire de connaître les objectifs de la direction ainsi que les décisions politiques en matière de maintenance. Il est également important de comprendre le fonctionnement, les caractéristiques et le comportement de l'équipement en exploitation, ainsi que les coûts associés à la maintenance. Dans la (Figure 1), nous présentons les différents types de maintenance, que nous allons définir par la suite.

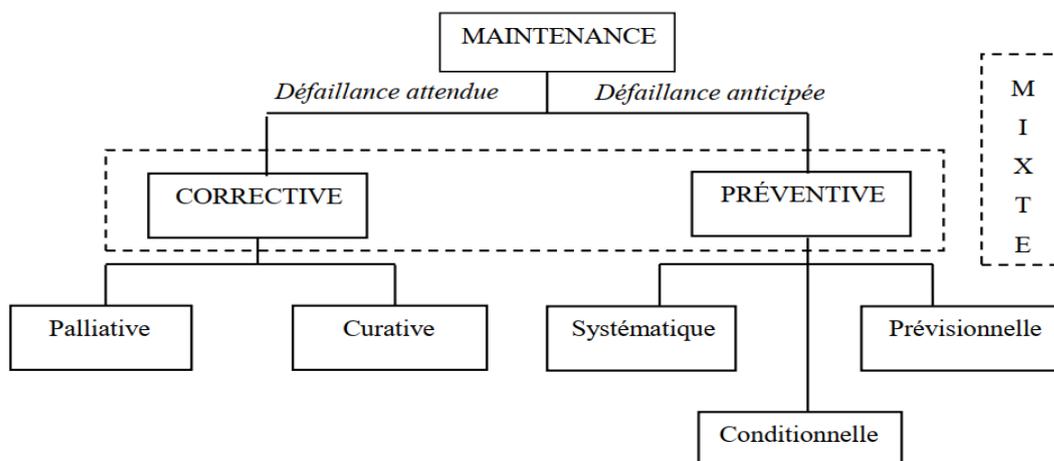


Figure I.1. Les différents types de maintenance.

### 3.1. Maintenance corrective

La Maintenance Corrective (MC) est réalisée en réponse à une défaillance, dans le but de restaurer le système à son bon fonctionnement et de lui redonner les performances nécessaires à son utilisation. La maintenance corrective se divise en deux types :

- **Maintenance curative** qui vise à effectuer des réparations, des modifications ou des rénovations définitives. Afin de lui redonner toutes les qualités nécessaires à son bon fonctionnement et à son utilisation.
- **Maintenance palliative** Elle consiste en des actions temporaires effectuées pour atténuer les conséquences d'une panne ou d'un dysfonctionnement. Qui permet des réparations ou des rénovations temporaires. Cependant, elle doit être suivie d'une action curative dans les plus brefs délais.

Cette approche de maintenance est adoptée lorsqu'il s'agit de réagir à des événements plus ou moins aléatoires. Elle est utilisée lorsque les défaillances n'ont pas d'impact critique sur la production, lorsque les coûts liés aux défaillances sont minimes et que les exigences de sécurité sont faibles.

### 3.2. Maintenance Préventive

La Maintenance Préventive (MP) est une approche utilisée lorsque le système est en état de fonctionnement. Son objectif est de réduire la dégradation et la fréquence des défaillances du système [1]. Cette politique de maintenance est mise en place pour des raisons de sécurité (pour éviter des conséquences inacceptables en cas de défaillance), d'économie (car cela revient moins cher) ou parfois par praticité (en intervenant à des moments spécifiques).

#### La maintenance préventive se décline en trois versions

- **Maintenance préventive systématique** est réalisée à des intervalles de temps préétablis, indépendamment de l'état de fonctionnement du système sur lequel on intervient. Elle vise à rajeunir le système en remplaçant systématiquement ses composants sans préalablement vérifier leur état, ou à ralentir sa dégradation grâce à des entretiens réguliers.
- **Maintenance préventive conditionnelle** se base sur la surveillance de l'état du système. Elle consiste à anticiper les défaillances futures en analysant l'état de fonctionnement ou d'usure du système à partir de paramètres significatifs de dégradation tels que les pressions, les vibrations, les températures, les bruits, les autodiagnostic et

les informations provenant de capteurs. Ces paramètres permettent d'évaluer le degré de dégradation du système et de décider d'une intervention lorsque certains seuils sont atteints.

- **Maintenance préventive prévisionnelle** est une forme de maintenance conditionnelle qui se base sur des prévisions extrapolées à partir de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de dégradation du système [1]. Son objectif est de planifier et de retarder les interventions. Cette approche permet de prédire avec certitude et confiance la date exacte de la défaillance, donnant ainsi suffisamment de temps à l'équipe de maintenance pour préparer son intervention.

Chaque type de maintenance peut avoir ses propres avantages et inconvénients, et le choix d'un type de maintenance dépendra des besoins spécifiques de chaque système industriel complexe.

La maintenance est très importante pour les systèmes industriels actuels et la nécessité de la mise en place de stratégies de maintenances efficaces. Car les interventions préventives et correctives peuvent avoir un impact sur la rentabilité de l'entreprise. C'est pourquoi, des modèles de maintenance adaptés doivent être développés pour répondre aux besoins spécifiques de chaque système industriel.

### 3.3. Maintenance mixte

Une maintenance mixte implique la combinaison de deux types de maintenance : la maintenance corrective et la maintenance préventive. Il est impossible de se limiter à la seule maintenance préventive, car cela serait coûteux, surtout si l'on abuse de la maintenance systématique. En même temps, il est impossible de prévoir toutes les défaillances, ce qui entraîne toujours des défaillances résiduelles. C'est pourquoi il est préférable de conserver une partie de la maintenance corrective. Par conséquent, il est nécessaire d'envisager des stratégies qui combinent les deux types de maintenance : corrective et préventive.

## 4. Autres formes et types de maintenance

En dehors des formes traditionnelles de maintenance préventive et corrective, d'autres méthodes de maintenance sont utilisées dans des domaines spécifiques. Chacune de ces méthodes est basée sur des critères tels que le coût, la disponibilité, la fiabilité et la maintenabilité. Les différentes stratégies de maintenance disponibles sont présentées afin de répondre à ces critères.

### - **Maintenance améliorative**

La maintenance améliorative se concentre sur l'amélioration de la fiabilité et de la maintenabilité d'un système. Elle implique d'apporter des modifications et des changements afin de faciliter et réduire la nécessité de maintenance. Cette approche est couramment utilisée dans la maintenance.

### - **Maintenance adaptative**

La maintenance adaptative vise à ajuster une application en fonction des changements de son environnement, afin de garantir sa continuité de fonctionnement.

### - **Maintenance opportuniste**

La maintenance opportuniste est une stratégie de maintenance préventive, elle permet de remplacer non seulement le composant défaillant mais aussi plusieurs composants proches qui ne sont pas forcément dans le même état, ceci est fait après un arrêt programmé d'un système. Elle vise à optimiser le coût de la maintenance grâce à des réparations simultanées des composants, notamment les temps d'interventions et l'utilisation des systèmes. Cette méthode de maintenance ne concerne que les systèmes multi-composants.

### - **Maintenance proactive**

La maintenance proactive est une approche préventive de la maintenance qui vise à anticiper et prévenir les défaillances avant qu'elles ne surviennent. Elle implique la mise en place d'actions telles que des inspections régulières, des réparations préventives et des remplacements planifiés pour éliminer les causes potentielles de défaillance. L'objectif de la maintenance proactive est d'améliorer la fiabilité et la disponibilité du système, tout en réduisant les coûts de maintenance à long terme. Cela permet d'éviter les arrêts imprévus, les réparations coûteuses et les perturbations de l'activité.

## **5. Optimisation de la maintenance**

L'optimisation d'une stratégie de maintenance vise à trouver le bon équilibre entre la maintenance préventive et corrective, tout en respectant les objectifs fixés. Ces stratégies sont conçues pour optimiser un critère de décision tel que le coût, la disponibilité du système, la fiabilité ou d'autres critères tels que la sécurité.

En général, une approche de maintenance mixte est appliquée aux systèmes. Comme nous l'avons expliqué précédemment, il est nécessaire de considérer une stratégie qui combine les

deux types de maintenance (préventive et corrective). Cependant, un excès de maintenance préventive ou corrective nuit au fonctionnement du système et entraîne une augmentation des arrêts, des réparations coûteuses et des perturbations de l'activité. Il est donc impératif de trouver un équilibre entre la maintenance préventive et corrective afin de maximiser les effets positifs de la maintenance tout en minimisant les pertes.

### **5.1. Les objectifs de la maintenance**

Les objectifs de la maintenance peuvent être regroupés en deux catégories : les objectifs opérationnels et les objectifs économiques.

#### **- Les objectifs opérationnels comprennent**

1. Maintenir l'équipement dans un état acceptable.
2. Assurer la disponibilité maximale de l'outil de production à un coût raisonnable.
3. Créer un service qui élimine les pannes à tout moment.
4. Augmenter la durée de vie de l'outil de production autant que possible.
5. Obtenir un rendement maximal de l'outil de production.
6. Maintenir les installations selon une priorité donnée.
7. Diminuer la probabilité de défaillance en service.
8. Réduire les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
9. Permettre une décision éclairée concernant la maintenance corrective.
10. Éliminer les causes des accidents graves.

#### **- Les objectifs économiques comprennent**

1. Réduire au minimum les coûts de maintenance.
2. Réduire les temps d'arrêt de production.
3. Prévenir et anticiper les interventions de maintenance corrective coûteuses.

### 6. La fiabilité

La fiabilité et la capacité d'un système, d'un équipement ou d'une installation à effectuer correctement sa tâche dans des conditions spécifiques pendant une durée déterminée sans interruption ou défaillance.

La norme AFNOR définit la fiabilité comme l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné [1].

On distingue plusieurs types de fiabilité :

- **Fiabilité opérationnelle**, elle se rapporte à la capacité de l'équipement ou du système à fonctionner de manière fiable dans des conditions réelles d'utilisation. Elle prend en compte les variations de la charge de travail, les variations de l'environnement et les effets de la maintenance et des réparations.
- **Fiabilité intrinsèque**, elle se réfère à la fiabilité inhérente ou naturelle d'un produit ou d'un système. Elle est déterminée par la qualité et la robustesse des composants, de la conception et de la fabrication. La fiabilité intrinsèque est souvent évaluée en laboratoire et est utilisée comme base pour estimer la fiabilité globale d'un produit ou d'un système. Cependant, d'autres facteurs tels que les conditions environnementales, l'utilisation et l'entretien peuvent influencer la fiabilité effective dans des conditions réelles d'utilisation.
- **Fiabilité prévisionnelle**, elle estime la fiabilité potentielle d'un composant, d'un équipement ou d'un système avant son utilisation. Cette méthode utilise des modèles de probabilité mathématiques de vieillissement physique pour prédire le comportement de chaque élément constitutif. Ces modèles sont établis à partir de retours d'expérience et d'essais visant à modéliser le comportement en matière de fiabilité.

#### 6.1. Fonctions statistiques utilisées en fiabilité

##### - Fonction de fiabilité

La fonction de fiabilité, également appelée fonction de survie et notée  $R(t)$  (pour Reliability), représente la probabilité que l'entité  $x$  ou le système continue à remplir ses fonctions sans défaillance pendant la période  $[0, t]$ . La fiabilité à l'instant  $t$  correspond donc à la probabilité que le système n'ait pas subi de défaillance, c'est la probabilité de fonctionnement sans défaillance. [2]

La fonction de fiabilité (ou de survie) notée  $R(t)$  peut s'exprimer comme suit :

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad (I.1)$$

La fiabilité est également définie comme le complément de la fonction de répartition  $F(t)$  (probabilité de défaillance). Dans le concept de la maintenance, la connaissance de la durée de vie (fiabilité) d'un système permet de déterminer les périodicités dans le cas d'une maintenance préventive systématique.

**- Fonction de répartition**

La fonction de répartition  $F(t)$  représente la probabilité d'avoir au moins une défaillance pendant la période  $[0, t]$  [2].

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (I.2)$$

**- Densité de probabilité**

La fonction de densité de probabilité, notée  $f(t)$ , représente la probabilité de défaillance d'un dispositif à l'instant  $t$  [2].

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (I.3)$$

**- Taux de défaillance**

Le taux de défaillance instantané ou taux de hasard, est utilisé pour estimer la fiabilité d'un système. Il représente la probabilité que le système subisse une défaillance dans l'intervalle  $[t, t+\Delta t]$ , à condition qu'il n'ait pas déjà échoué jusqu'à l'instant  $t$ . La formule de  $\lambda(t)$  est la suivante [3].

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (I.4)$$

La connaissance de  $\lambda(t)$  permet de connaître  $R(t)$  ou  $F(t)$ . En effet,

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(u) du} \quad (I.5)$$

$\lambda(t)$  également appelé « fonction de hasard » et noté  $h(t)$

$$h(t) = -\frac{d}{dt} \log R(t) \quad (I.6)$$

$H(t)$ : probabilité (conditionnelle) d'une défaillance entre  $t$  et  $t + dt$  sachant que le dispositif est en vie à l'instant  $t$ . On peut également définir la fonction de hasard cumulée  $H(t)$ ,

$$H(u) = \int_0^t h(u)du \quad (I.7)$$

L'évolution du taux de défaillance par rapport au temps peut être représentée par une courbe caractéristique dite : courbe en baignoire (Figure I.2).

- **Taux de réparation instantané**

La définition du taux de réparation instantané, noté  $\mu(t)$ , est la probabilité que le système qui n'a pas été réparé à l'instant  $t$  le soit dans l'intervalle de temps  $t$  à  $t + dt$ . Le taux de réparation est donc exprimé en termes de maintenabilité  $M(t)$ .

$$\mu(t) = \frac{1}{1 - M(t)} * \frac{dM(t)}{dt} \quad (I.8)$$

- **MTBF (Mean Time Between Failure)**

Le temps moyen entre pannes ou durée moyenne entre pannes, souvent désigné par son sigle anglais MTBF (mean time between failures), est une des valeurs qui indiquent la fiabilité d'un composant, d'un produit ou d'un système. C'est la moyenne arithmétique du temps de fonctionnement entre les pannes d'un système réparable

$$MTBF = \frac{\text{Temps total de fonctionnement}}{\text{Nombre de pannes}} \quad (I.9)$$

- **MTTR (Mean Time to Repair)**

Le MTTR (Mean Time to Repair), ou temps moyen de réparation, représente la durée moyenne nécessaire pour réparer et remettre en état de fonctionnement un système. De manière similaire, la maintenabilité  $M(t)$  est une mesure qui est caractérisée par le MTTR.

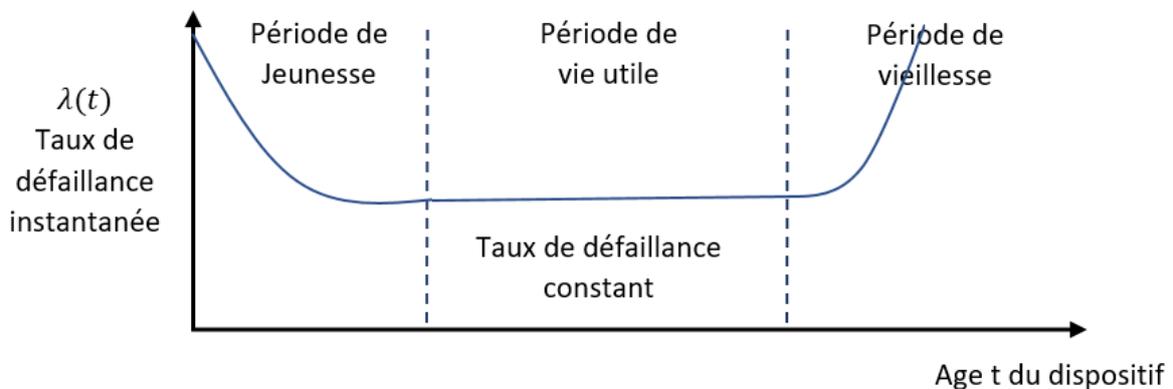
**Tableau I.1.** Résumé des liens entre les fonctions usuelles de fiabilité

	$f(t)$	$F(t)$	$R(t)$	$\lambda(t)$
$f(t)$	–	$\frac{dF(t)}{dt}$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$\lambda(t)\exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$
$F(t)$	$\int_0^t f(x)dx$	–	$1 - R(t)$	$1 - \exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$
$R(t)$	$\int_0^\infty f(x)dx$	$1 - F(t)$	–	$\exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$
$\lambda(t)$	$\frac{f(t)}{\int_0^t f(x)dx}$	$\frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1 - F(t)}$	$-\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$	–

## 6.2. Courbe en baignoire

La (Figure I.2) représente la courbe en baignoire qui illustre l'évolution du taux de défaillance  $\lambda(t)$  en fonction de l'âge  $t$  du matériel. Cette courbe montre clairement trois périodes distinctes selon l'âge du matériel :

- Une période de jeunesse, également appelée période de mortalité infantile ou période des défaillances précoces, au cours de laquelle le taux de défaillance diminue.
- Une période de vie utile qui correspond à la maturité du matériel, durant laquelle les défaillances sont aléatoires et le taux de défaillance reste globalement constant.
- Une période de vieillesse durant laquelle le taux de défaillance augmente.



**Figure I.2.** Courbe en baignoire

## **7. Lois de probabilité utilisées en fiabilité**

La fiabilité est devenue une caractéristique essentielle et représente une étape cruciale dans toute étude de sûreté de fonctionnement. Ainsi, afin d'évaluer la performance du système, il est indispensable de disposer de modèles permettant d'estimer sa fiabilité.

Nous présenterons les distributions de probabilité les plus couramment utilisées dans l'analyse des données de durée de vie, qui s'appliquent à de nombreux phénomènes. En particulier, nous examinons les distributions Exponentielle, Normale, Gamma et Weibull, qui sont largement utilisées et étudiées.

En fonction de la nature des données et des événements à modéliser, d'autres lois de probabilités peuvent également être utilisées en fiabilité, mais celles-ci sont les plus couramment utilisées.

### **- La loi exponentielle**

Le concept de la loi exponentielle trouve ces applications dans divers domaines. Il est fréquemment employé pour modéliser la durée de vie des équipements soumis à des défaillances soudaines, ce qui explique son utilisation courante dans le domaine de la fiabilité électronique. La loi exponentielle repose sur un unique paramètre, le taux de défaillance  $\lambda$ .

La fiabilité :

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (\text{I. 10})$$

$$\lambda > 0$$

La densité de probabilité :

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (\text{I. 11})$$

Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \lambda \quad (\text{I. 12})$$

La durée de vie moyenne :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{I. 13})$$

**- La loi normale**

La loi est largement utilisée parmi les distributions de probabilité en raison de son application à de nombreux phénomènes. En ce qui concerne la fiabilité, elle décrit la dégradation des systèmes vieillissants en raison de l'usure, de la fatigue, etc., car le taux de défaillance augmente continuellement. Elle est définie par sa moyenne  $\mu$  et son écart-type  $\sigma$ .

La fonction de répartition :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (\text{I. 14})$$

La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{I. 15})$$

La variance :

$$V(T) = \sigma^2 \quad (\text{I. 16})$$

**- La loi Gamma**

Elle représente la loi de probabilité d'occurrence de  $\alpha$  événements dans un processus poissonien. C'est une loi à deux paramètres, le paramètre d'échelle  $\lambda$  et celui de forme  $\alpha$ . Le temps cumulé d'apparition de  $\alpha$  défaillances suit une loi Gamma. [4]

Densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{t^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right)}{\lambda^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (\text{I. 17})$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{+\infty} t^{\alpha-1} \exp(-t) dt.$$

Taux de défaillance :

$$f(t) = \frac{t^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right)}{\lambda^\alpha \int_t^{+\infty} \Gamma(\alpha) f(u) du} \quad (\text{I. 18})$$

Esperance :

$$E(T) = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (I.19)$$

Variance :

$$V(T) = \frac{\alpha}{\lambda^2} \text{ avec } T \geq 0, \quad \lambda > 0, \quad \alpha > 0 \quad (I.20)$$

### - La loi de Weibull

La popularité de la loi de Weibull en fiabilité est due à sa grande flexibilité et à sa capacité à inclure d'autres lois de probabilité telles que la loi exponentielle et la loi de Rayleigh. Cette loi est souvent caractérisée par deux paramètres, le paramètre de forme  $\beta$  et le paramètre d'échelle  $\eta$ . Cependant, un troisième paramètre, le paramètre de localisation  $\gamma$ , peut également être utilisé pour prendre en compte un éventuel décalage du point de départ de la courbe.

La fiabilité :

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (I.21)$$

La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (I.22)$$

Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (I.23)$$

Le paramètre de forme  $\beta$  est le plus important car il joue sur la variation du taux de défaillance et permet ainsi de modéliser alternativement les trois phases de la courbe en baignoire (Figure2).

Si  $\beta < 1$  :  $\lambda(t)$  est décroissant, ce qui signifie que l'état du système s'améliore. Le système est dit qu'il est dans sa période de jeunesse

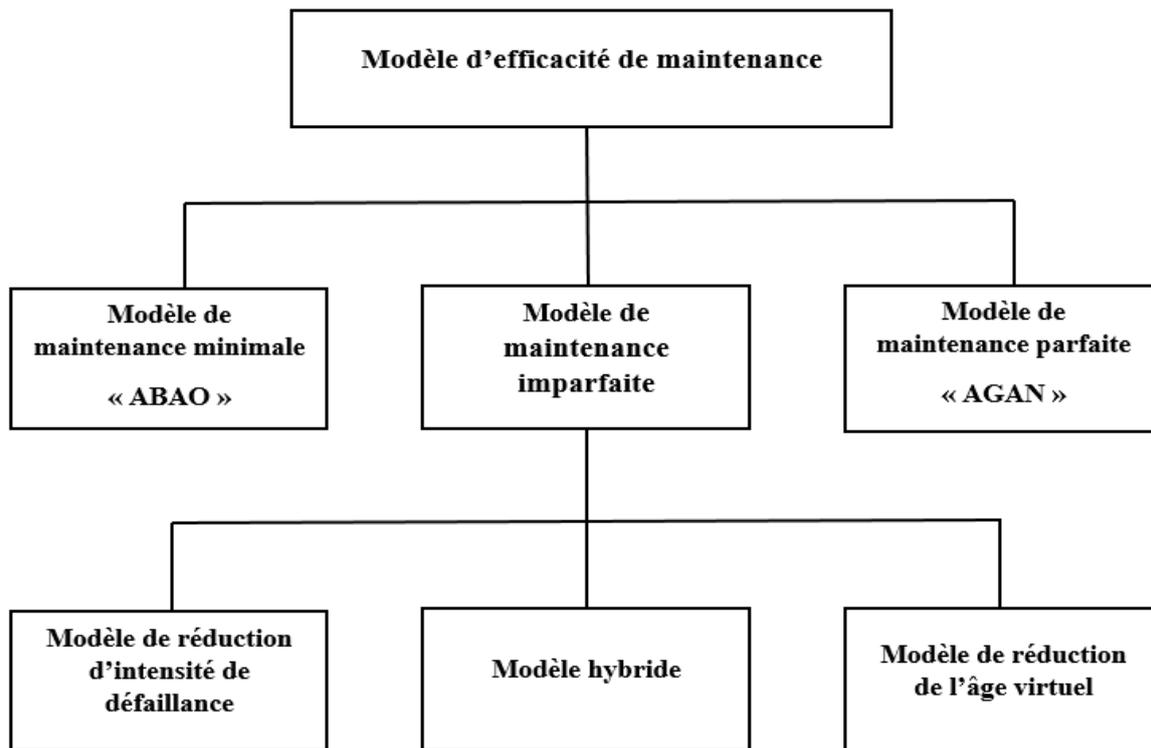
Si  $\beta > 1$  :  $\lambda(t)$  est croissant, ce qui signifie que l'état du système se dégrade. Le système est donc dans sa période de vieillesse ;

Si  $\beta = 1$  :  $\lambda(t)$  est constant, nous retrouvons donc la loi exponentielle comme cas particulier de la loi de Weibull. Le système quant à lui est dans sa période de vie utile.

## **8. Modèles d'efficacité de maintenance**

La défaillance est définie comme une altération partielle ou totale des caractéristiques d'un élément, entraînant une diminution significative ou une perte totale de sa capacité de fonctionnement. Pour améliorer l'efficacité des systèmes, la modélisation des processus permet de structurer les activités (actions, interventions) en vue de leur réparation, la Figure I.3 représente un diagramme de modèles de défaillance.

Dans la suite de ce chapitre, nous aborderons les principaux modèles d'efficacité de maintenance couramment utilisés dans la pratique : la maintenance minimale, la maintenance parfaite et la maintenance imparfaite.



**Figure I.3.** Modèles d'efficacité de maintenance

### **8.1. Les modèles de base de l'efficacité de la maintenance**

Les hypothèses couramment utilisées dans ce contexte sont celles qui considèrent l'effet de la maintenance comme étant soit minimal, également appelé "As Bad As Old" (ABAO), où le

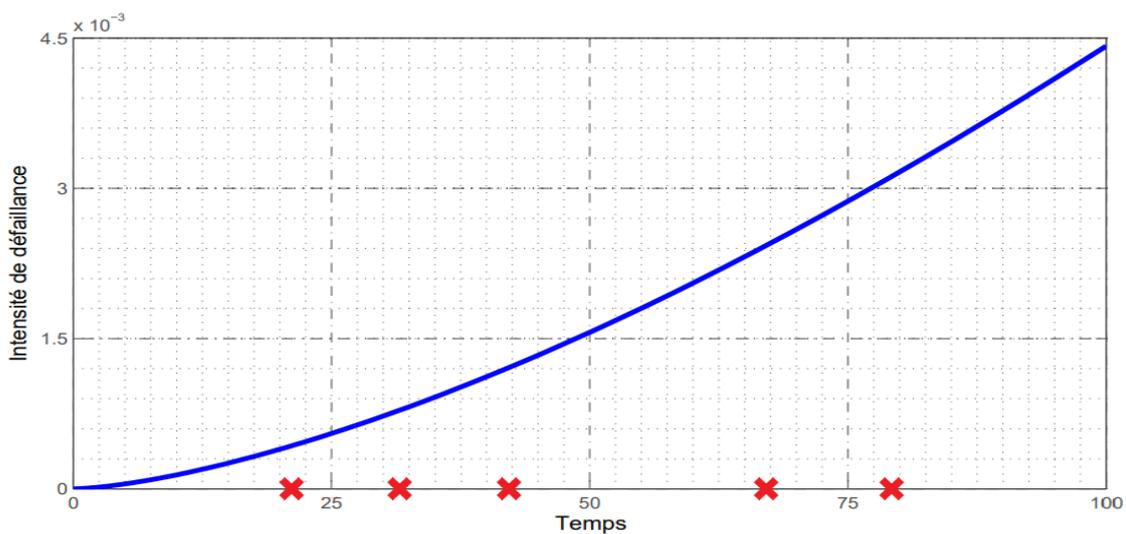
Le système est remis en état de fonctionnement tel qu'il était juste avant la défaillance. Soit parfait, également appelé "As Good As New" (AGAN), où la maintenance permet de remettre le système à neuf.

### 8.1.1. Modèle de maintenance minimale

Le concept de maintenance minimale considère que l'effet de la maintenance est simplement de rétablir le système dans son état antérieur à la panne. Cela signifie que la maintenance n'a pas d'effet sur l'amélioration ou la dégradation du système. On dit alors que le système est "Aussi mauvais que vieux" (As Bad As Old « ABAO ») après la maintenance.

L'intensité de défaillance est alors une fonction uniquement du temps.

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) \quad (I.24)$$



**Figure I.4.** Intensité de défaillance, modèle de maintenance minimale

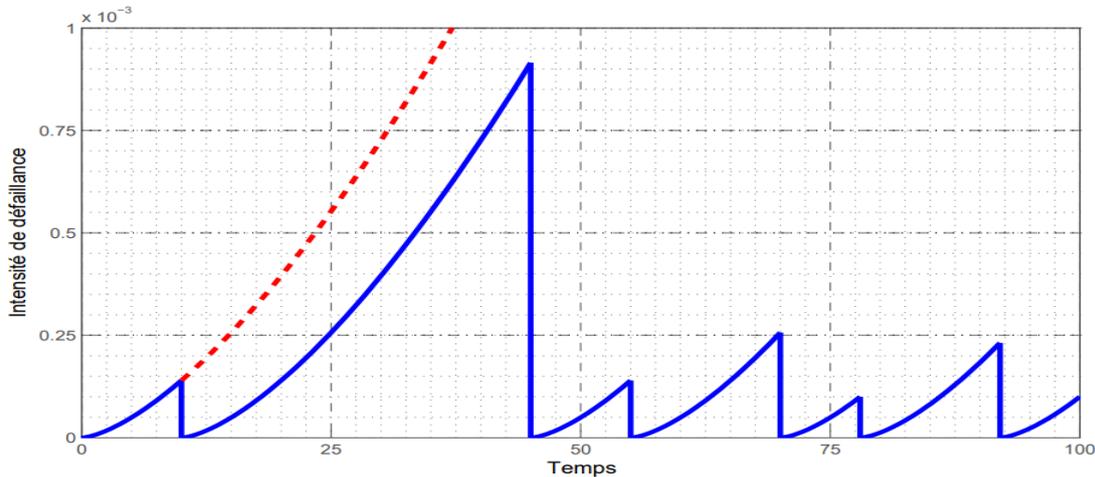
(X : Instant de défaillance)

### 8.1.2. Modèle de maintenance parfaite

Le modèle de maintenance parfaite suppose que chaque intervention de maintenance restaure le système à son état d'origine, comme s'il était neuf. Le système après maintenance est considéré aussi bon que neuf ou en anglais As Good As New (AGAN). Ce dernier cas est applicable aux remplacements des composants non réparables.

Considérons que le système reçoit des actions de maintenance à des instants successifs notés  $T_i$  Pour  $i = 1, 2, \dots, i_m$ . La fonction d'intensité de défaillance, à un instant  $t \in ]i, i + 1[$ , dans le cas d'une maintenance AGAN, s'écrit comme suit :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t - T_i) \quad (I.25)$$



**Figure I.5.** Intensité de défaillance, modèle de maintenance parfaite

Il est clair que la réalité se situe entre ces deux cas extrêmes :

En réalité, les actions de maintenance impliquent souvent le remplacement de composants, des ajustements et des correctifs. Par conséquent, l'état du système après maintenance sera différent de son état d'origine, et ne sera pas totalement remis à neuf. Donc le système se trouvera dans un état intermédiaire entre neuf et vieux.

## 8.2. Modèles de maintenance imparfaite

En général, la maintenance vise à réduire l'intensité des défaillances d'un système, mais elle ne le remet pas à neuf. Les modèles correspondants sont appelés des modèles de maintenance imparfaite ou "Better than Minimal Repair" [5]. La maintenance imparfaite se situe entre les hypothèses AGAN et ABAO, ce qui signifie que le système est dans un état meilleur qu'avant la maintenance. Cependant, il est peu probable que la maintenance ramène le système à un état neuf, on dit donc qu'il est moins bon que neuf [6].

Plusieurs modèles de maintenance imparfaite ont été proposés. Dans ces modèles, une hypothèse est généralement utilisée, selon laquelle une action de maintenance permet une réduction totale, partielle ou nulle de l'âge du système à chaque opération de maintenance. Ainsi, l'état du système après la maintenance est rajeuni ou vieilli.

### 8.2.1. Modèle de Brown-Proschan

Le modèle Brown-Proschan (BP) est l'un des premiers modèles proposés dans la littérature. Selon ce modèle, après la défaillance du système, la maintenance peut être soit parfaite (AGAN) avec une probabilité  $p$ , soit minimale (ABAO) avec une probabilité  $(1-p)$ . La valeur de  $p$  représente l'efficacité globale de la maintenance. Pour modéliser l'effet des maintenances, une variable aléatoire  $B_i$  est utilisée, suivant une loi de Bernoulli avec un paramètre  $p$ . La variable  $B_i$  est définie de la manière suivante.[8]

- (si  $p = 1$ ), lorsque la  $i$ ème maintenance est AGAN (parfaite).
- (si  $p = 0$ ), lorsque la  $i$ ème maintenance est ABAO (minimale).

C'est l'un des premiers modèles de maintenance imparfaite.

La fonction d'intensité de défaillance s'écrit :

$$\lambda(t) = \lambda \left( t - T_i + \sum_{j=1}^i \left( \prod_{k=j}^i (1 - B_k) \right)^j X_j \right) \quad (I.25)$$

$X_j$  est la durée entre deux défaillances.

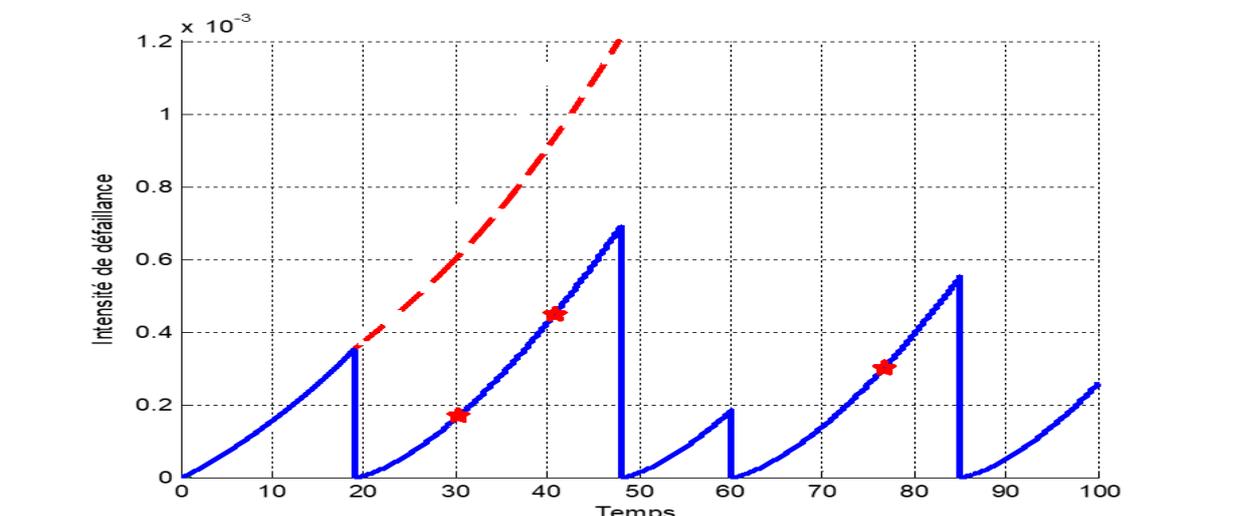


Figure I.6. Intensité de défaillance, modèle Brown-Proschan

### 8.2.2. Modèles de réduction de l'intensité de défaillance

Les modèles de réduction d'intensité sont des modèles qui considèrent que l'efficacité de la maintenance se traduit par une réduction de l'intensité de défaillance du système. Ils cherchent à modéliser la dynamique de l'intensité de défaillance en tenant compte des effets de la

maintenance sur cette dernière [2]. Les modèles de réduction d'intensité peuvent être divisés en deux sous-classes : Les modèles de réduction arithmétique et les modèles de réduction géométrique.

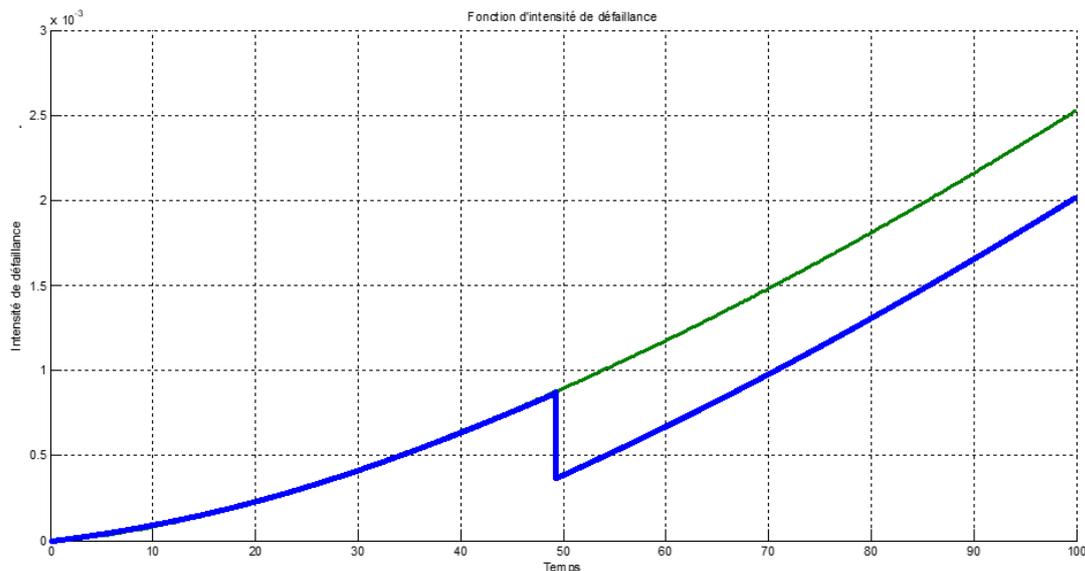
### - Modèles de réduction arithmétique d'intensité de défaillance

L'effet de la maintenance n'affecte pas l'allure de l'intensité de défaillance. Autrement dit, après une action de maintenance, le système est ramené à un état amélioré par rapport à celui précédant l'intervention, ce qui se traduit par une réduction de l'intensité de défaillance. Cette réduction correspond à l'effet bénéfique de la maintenance sur le système. Et suit une courbe parallèle à la courbe d'intensité de défaillance initiale.

La fonction d'intensité de défaillance s'écrit :

$$\lambda_n(t) = \lambda_0(t) - \sum_{i=1}^n \delta_n \quad (I.27)$$

Avec n est le nombre d'actions de maintenance.



**Figure I.7.** Intensité de défaillance, modèle réduction arithmétique

### - Modèles de réduction géométrique d'intensité de défaillance

Cette sous classe de modèles est obtenu à partir du processus géométrique, appelé aussi processus de quasi-renouvellement. Pour cette classe on note par  $\alpha$ , le facteur de réduction d'intensité de défaillance, l'effet de la maintenance se traduit par une réduction de l'intensité de défaillance initiale, Ainsi, après l'action de maintenance, la courbe d'intensité de défaillance

redémarre à partir d'un point inférieur à celui juste avant l'action de maintenance avec une courbe d'une allure différente de la courbe initiale.

Le principe ici est de supposer qu'après une action de maintenance imparfaite, la fonction d'intensité de défaillance du système est multipliée par le facteur  $\alpha$ , sachant que  $0 < \alpha < 1$ . Ainsi après la première action de maintenance imparfaite, la fonction d'intensité de défaillance devient :

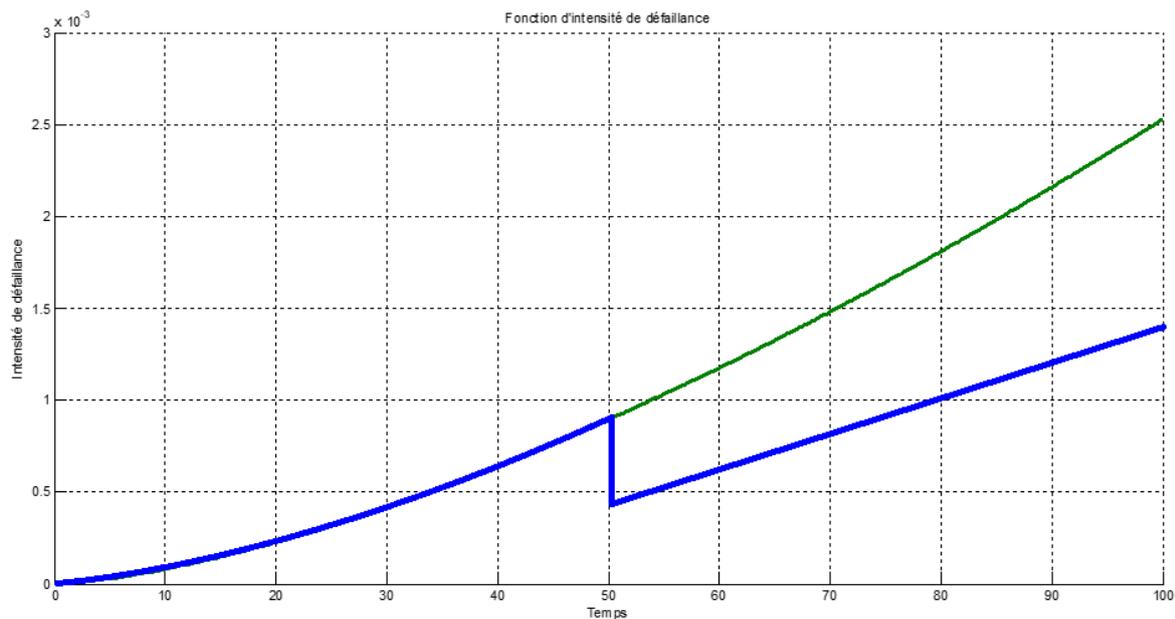
$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0(t) \quad (I.28)$$

Après la seconde action de maintenance, elle devient :

$$\lambda(t) = \alpha^2 \lambda_0(t) \quad (I.29)$$

La fonction d'intensité de défaillance s'écrit :

$$\lambda(t) = \alpha^n \lambda_0(t) \quad (I.30)$$



**Figure I.8.** Intensité de défaillance, modèle de réduction géométrique

Ces modèles de réduction de l'intensité de défaillance peuvent être utilisés pour prédire la performance des systèmes après des actions de maintenance régulières et pour évaluer l'efficacité des stratégies de maintenance.

### 8.2.3. Modèle d'âge virtuel

Les modèles d'âges virtuels offrent des approches différentes pour évaluer l'efficacité de la maintenance. En utilisant des approches d'analyse et de prévision différentes, et des techniques

de modélisation pour estimer l'état d'un équipement ou d'un système en fonction de son utilisation et d'autres variables, afin d'évaluer efficacement les activités de maintenance.

### **Les modèles de KIJIMA**

Kijima a défini deux classes de modèles d'âges virtuels, connus depuis sous le nom de modèles de Kijima de type I et II [7]:

#### **- Modèle de KIJIMA type I**

Lorsqu'on effectue la  $i_{Eme}$  Maintenance sur le système, cela a pour effet de diminuer l'âge virtuel du système avant la défaillance, qui est représenté par  $A_{i-1} + X_i$ . Cette diminution est proportionnelle à la durée écoulée depuis la dernière maintenance, qui est  $Z_i X_i$ , avec  $Z_i$  Etant un nombre compris entre 0 et 1. Par conséquent, on obtient alors :

- Type I :  $\forall_i \geq 0, A_i = A_{i-1} + (1 - Z_i)X_i$ .

( $X_i$  : Temps entre défaillances).

A partir de l'équation, on en déduit l'intensité de défaillance de ce modèle :

$$\lambda_t^N(N, Z) = \lambda \left( t - T_{N_t} + \sum_{j=1}^{N_t} (1 - Z_j) X_j \right) \quad (I.31)$$

#### **- Modèle de KIJIMA type II**

Le modèle de KIJIMA de type II, prene en considération toutes les opérations de maintenance passé. Chaque opération de maintenance réduit l'âge virtuel global du système de manière proportionnelle à un coefficient  $Z_i$  Compris entre 0 et 1.

- Type II :  $\forall_i \geq 0, A_i = (1 - Z_i)(A_i + Z_i)$ .

$$\lambda_t^N(N, Z) = \lambda \left( t - T_{N_t} + \sum_{j=1}^{N_t} \left[ \prod_{k=j}^{N_t} (1 - Z_k) \right] X_j \right) \quad (I.32)$$

#### **- Modèle de réduction proportionnelle de l'âge virtuel**

Compte tenu de la difficulté de considérer  $Z$  comme une variable aléatoire, les modèles les plus simples de Kijima [7] supposent que les facteur de réduction d'âge  $Z_i$ , sont déterministe, constants et égaux à  $\rho$ ,  $\rho$  étant aussi appelé facteur d'amélioration de la maintenance.

La fonction d'intensité de défaillance pour ce modèle est la suivante :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t - \rho t) \quad (\text{I.33})$$

$$\forall_i \geq 1, Z_i = \rho$$

Ce modèle suppose que l'efficacité de maintenance est constante, Le facteur  $\rho$  est le paramètre de réduction d'âge virtuel et est également connu sous le nom de facteur d'amélioration. Il est utilisé pour représenter l'efficacité de la maintenance dans le temps.

À partir de ce modèle on peut retrouver :

Maintenance parfaite (AGAN)  $\rho = 1$ .

Maintenance imparfaite :  $\rho \in ]0,1[$ .

Maintenance minimale (AGAN) :  $\rho = 0$ .

Maintenance nuisible :  $\rho < 0$ .

Pour les modèles de KIJIMA de type I, on obtient un modèle défini par Malik sous le nom de modèle à réduction proportionnelle de l'âge (PAR) et qui a été étudié par Doyen et Gaudoin sous le nom de modèle  $ARA_1$ .

### 8.2.4. Modèles hybrides

En maintenance, les modèles d'efficacité hybride sont utilisés pour regrouper des modèles de réduction de l'âge et des modèles de réduction de l'intensité. La modélisation hybride est considérée comme la plus générale. Ces modèles combinent les avantages du modèle de réduction d'âge, qui permet de déterminer la valeur initiale de l'intensité après une maintenance préventive (PM), et du modèle de réduction d'intensité de défaillance, qui influence directement la forme de la fonction d'intensité après chaque maintenance préventive (PM).

Des chercheurs ont introduit et construit plusieurs modèles hybrides, et voici quelques exemples de ces modèles :

#### - **Modèle hybride I**

Afin de tirer parti des avantages des deux approches, un modèle hybride d'évolution de l'intensité des systèmes a été développé en combinant la méthode de réduction de l'âge et la méthode d'augmentation du taux de probabilité. Ce modèle permet de prendre en compte à la

fois la réduction de l'âge et l'ajustement du taux de probabilité dans la modélisation de l'évolution de l'intensité des systèmes.

La formule pour l'intensité de défaillance pour le modèle hybride :

$$\lambda(t) = \alpha\lambda_0(t - bT_i) \quad (I.34)$$

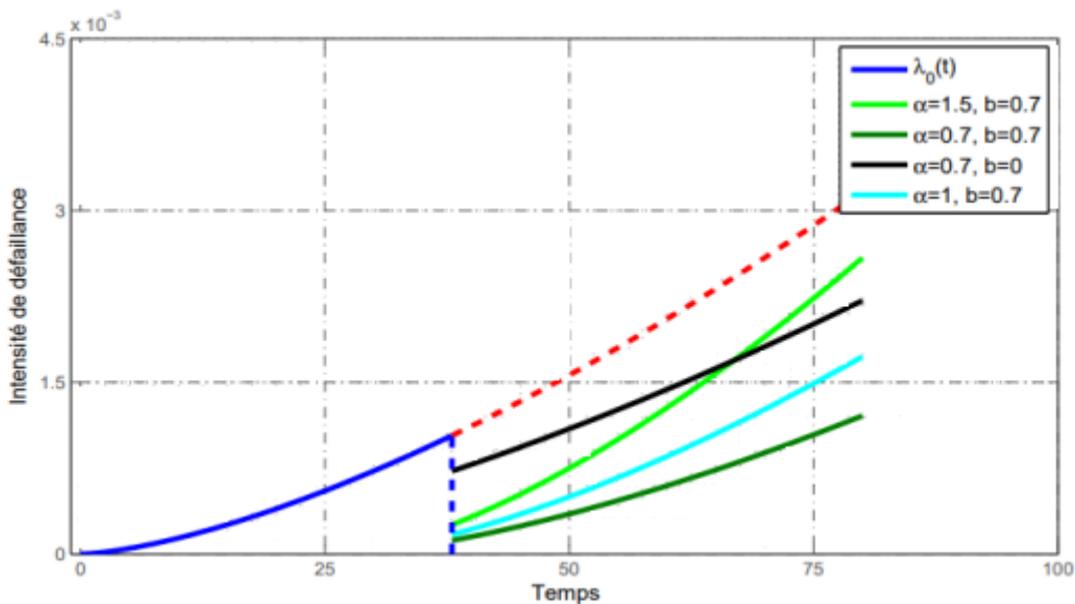
$$T_i < t < T_{i+1}, 0 < b < 1$$

$\alpha > 1$  et  $0 < b < 1$  : Modèle hybride avec réduction de l'âge virtuel et une augmentation de la dégradation.

$0 < \alpha < 1$  et  $0 < b < 1$  : Modèle hybride avec réduction de l'âge virtuel et une réduction géométrique d'intensité de défaillance.

$0 < \alpha < 1$  et  $b = 0$  : Modèle de réduction géométrique d'intensité de défaillance.

$\alpha = 1$  et  $0 < b < 1$  : Modèle de réduction proportionnelle de l'âge virtuel.



**Figure I.9.** Intensité de défaillance, modèle hybride I

### - Modèle hybride II

Ce modèle hybride et plus développé permettant de combine les paramètres de réduction arithmétique et géométrique de l'intensité de défaillance, ainsi que le paramètre de réduction d'âge virtuel [9].

La formule pour l'intensité de défaillance pour le modèle hybride :

$$\lambda(t) = \alpha\lambda_0(t - \tau T) - \delta\lambda_0(T) \quad (I. 35)$$

$\lambda_0(t)$  : Fonction d'intensité de défaillance initiale du système.

$\alpha$  : Facteur de réduction géométrique d'intensité de défaillance.

$\tau$  : Facteur de réduction proportionnelle d'âge virtuel.

$\delta$  : Facteur de réduction proportionnelle d'intensité de défaillance.

### Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons abordé les concepts de maintenance et de fiabilité. Nous avons ensuite examiné les principaux processus stochastiques utilisés en maintenance, tout en soulignant le rôle et l'importance de l'efficacité de la maintenance dans les systèmes réparables. Nous avons également présenté trois modèles de maintenance : le modèle minimal, le modèle parfait et le modèle imparfait.

# Chapitre II

## **Introduction**

La modélisation de l'effet de la maintenance est une approche utilisée pour étudier l'impact de la maintenance sur les systèmes. L'effet de la maintenance peut être étudié à différents niveaux, allant des composants individuels aux systèmes complexes. Plusieurs modèles pour quantifier l'effet de la maintenance ont été développés. Nous allons nous intéresser au modèle d'âge virtuel.

### **1. Construction du modèle de l'âge virtuel**

En 1979, l'idée des modèles d'âge virtuel a été introduite par Malik dans ses recherches. Cependant, il faudra attendre 1988 pour que Kijima, Morimura et Suzuki proposent leur construction mathématique [13].

Les modèles reposent sur l'hypothèse suivante : après la  $i_{\text{ème}}$  Maintenance, le système se comporte comme s'il était neuf et avait fonctionné pendant une durée  $A_i$  sans connaître de panne. Par conséquent,  $A_i$  peut être considéré comme l'âge virtuel du système après la  $i_{\text{ème}}$  Maintenance.

Les modèles de Kijima [7] (ou modèles d'âge virtuel) ont permis de modéliser l'effet des actions de maintenance par un processus d'âge virtuel. Ce processus reflète l'efficacité de la maintenance par une réduction de l'âge du système assurée à l'aide d'un facteur de réduction prenant ses valeurs entre 0 et 1. L'intensité de défaillance du modèle s'écrit :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t - T_i + A_i) \quad (\text{II.1})$$

On peut comprendre ce modèle en disant que la maintenance rajeunit le système de sorte que l'intensité de défaillance à l'instant  $t$  est égale à l'intensité initiale à l'instant  $t - (T_i - A_i)$ .  $t$  est l'âge réel du système et  $t - (T_i - A_i)$  est son âge virtuel, du fait des maintenances. Entre deux maintenances, l'âge virtuel varie comme l'âge réel.

### **2. Concept d'âge virtuel à partir de modèles de base**

Revenons maintenant aux deux modèles de base afin de clarifier le concept d'âge virtuel. Nous avons précédemment constaté que dans le modèle ABAO, l'intensité conditionnelle était définie par l'équation (3.3). Cependant, mathématiquement, l'absence d'effet de la maintenance sur l'âge virtuel se traduit par la relation suivante, valable pour tout  $t \geq 0$  et  $i \geq 1$  :

$$A_i(t) = A_{i-1}(t) = \dots = A_0(t) = t$$

$$A_i = T_i$$

Avec  $A_i$  que et l'âge virtuel et  $T_i$  l'instant des actions de maintenance.

En d'autres termes, l'âge virtuel correspond à la période écoulée depuis la mise en service du système.

$$\lambda(t) = \lambda_0(t - T_i + A_i) = \lambda_0(t) \quad (\text{II. 2})$$

De cette manière, le modèle (ABAO) peut être exprimé sous la forme d'un modèle d'âge virtuel.

Au lieu du modèle (ABAO), envisageons le modèle (AGAN) où la réparation est considérée comme parfaite, ramenant ainsi le système à son état d'origine. Dans ce modèle (AGAN), l'âge virtuel est réinitialisé aux conditions initiales, pour tout  $t \geq 0$  et  $i \geq 1$  :

On à l'âge virtuel  $A_i$  du système :

$$A_i(t) = A_0(t - T_i) = t - T_i$$

Ainsi, la forme de l'intensité conditionnelle est clairement déduite.

$$\lambda(t) = \lambda_0(t - T_i) \quad (\text{II. 3})$$

Dans les modèles à réduction arithmétique de l'âge virtuel (ARA), exposés dans [10]. Concéderons que chaque réparation rajeunit le système, ce qui réduit l'âge virtuel d'une quantité dépendant potentiellement du passé du processus de défaillances et d'un paramètre d'efficacité  $\rho$ .

### **3. Réduction arithmétique de l'âge de mémoire m (ARA<sub>m</sub>)**

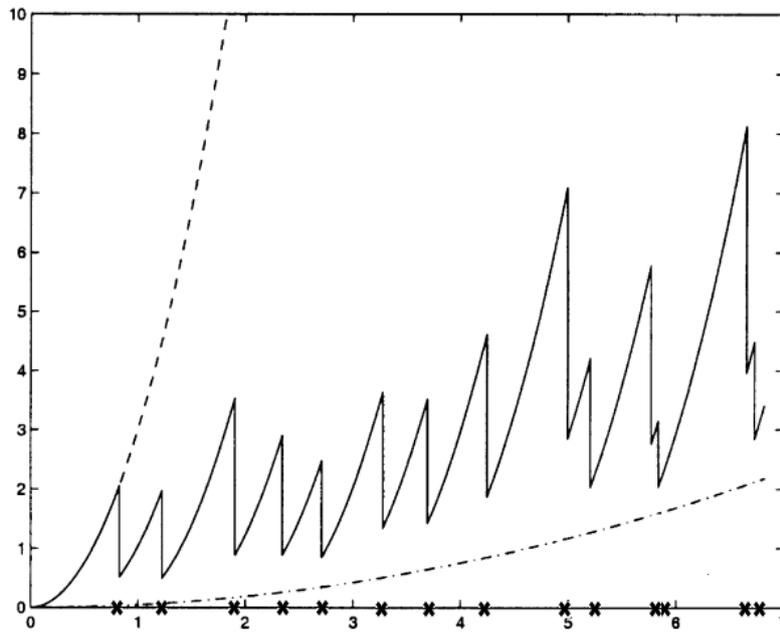
DOYEN et GAUDOIN ont proposé une classe de modèles dits à réduction arithmétique de l'âge de mémoire m (ARA<sub>m</sub>) [10].

Le modèle ARA<sub>m</sub> est une version intermédiaire entre les modèles ARA<sub>1</sub> et ARA<sub>∞</sub>. Au lieu de ne prendre en compte que le dernier instant de défaillance ARA<sub>1</sub> ou tous les instants de défaillance ARA<sub>∞</sub>, dans le modèle ARA<sub>m</sub> la mémoire m fait référence au nombre de maintenances précédentes qui influencent l'intensité de défaillance. Ainsi, ce modèle est caractérisé par l'âge virtuel suivant :

$$A_i(t) = t - \rho \sum_{j=0}^{\min(m-1; i-1)} (1 - \rho)^j T_{i-j}$$

$$\lambda(t) = \lambda \left( t - \rho \sum_{j=0}^{\min(m-1; i-1)} (1 - \rho)^j T_{i-j} \right) \quad (\text{II. 4})$$

Dans toutes les figures, le symbole **X** sur l'axe des abscisses représente l'instant de défaillance.



**Figure II.1.** Intensité de défaillance, modèle  $ARA_m$ ;  $m = 2$

#### 4. Modèle à mémoire infinie $ARA_\infty$

Le modèle  $ARA_\infty$  est un exemple de modèles de maintenance imparfaite. Il est basé sur le modèle de KIJIMA de Type II, qui inclut un effet de maintenance déterministe et constant. Dans ce modèle, on suppose que la maintenance réduit l'âge porte sur le dommage cumule depuis la mise en service du matériel.

L'hypothèse de base de ce modèle est que la réparation réduit l'âge virtuel du système d'une quantité proportionnelle à son âge juste avant la réparation : pour tous  $t \geq 0$  et  $i \geq 1$ .

$$A_i(t) = A_{i-1}(t) - \rho A_{i-1}(T_i)$$

Nous pouvons donc réécrire l'âge virtuel ainsi : dans un modèle  $ARA_\infty$ , pour tous  $t \geq 0$  et  $i \geq 0$ , l'âge virtuel pour les défaillance cumule est donné par :

$$A_i(t) = t - \rho \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \rho)^j T_{i-j} \quad (\text{II. 5})$$

Intensité de défaillance pour le modèle  $ARA_{\infty}$  est :

$$\lambda(t) = \lambda \left( t - \rho \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \rho)^j T_{i-j} \right) \quad (\text{II. 6})$$

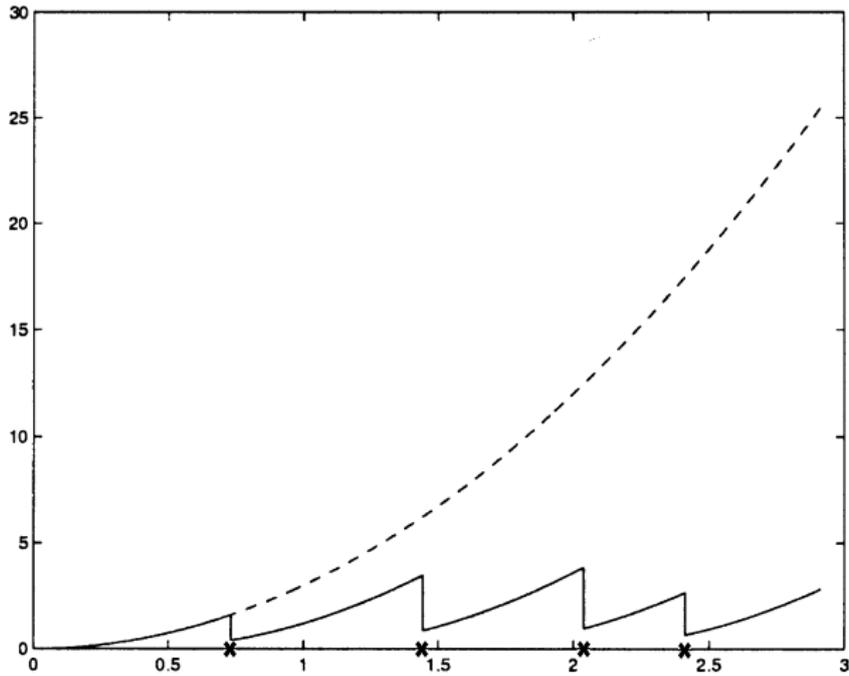
Les modèles de base sont des cas particuliers du modèle  $ARA_{\infty}$  , selon les valeurs de  $\rho$  :

$\rho = 1$  Maintenance parfaite (AGAN),

$\rho = 0$  Maintenance minimale (ABAO),

$0 < \rho < 1$  Maintenance imparfaite mais efficace,

$\rho < 0$  Maintenance nuisible.



**Figure II.2.** Intensité de défaillance, modèle  $ARA_{\infty}$

Ici nous prenons en compte à la fois la maintenance corrective (MC) et la maintenance préventive (MP) en obtient :

$$\lambda_t = \lambda \left( t - C_{K_t} + \sum_{j=1}^{K_t} (1 - \rho_p)^{K_t - M_{tj-1}} (1 - \rho_c)^{N_t - N_{tj-1}} W_i \right) \quad (\text{II. 7})$$

- $K_t$  : Le nombre de maintenances (correctives et préventives) entre 0 et  $t$  compris.
- $C_i$  : le  $i$  instant de maintenance (corrective ou préventive) avec  $C_0 = 0$ .
- $W_i = C_i - C_{i-1}$  : La  $i$  ème durée inter-maintenances (correctives et préventives).
- $M_t$  : Le nombre de MP entre 0 et  $t$ .
- $N_t$  : Le nombre de MC entre 0 et  $t$ .
- $\rho_c$  : L'efficacité des MC.
- $\rho_p$  : L'efficacité des MP.
- $T_i$  : L' $i$  ème instant de défaillance.

## 5. Modèle $ARA_1$

Le modèle  $ARA_1$  correspond au modèle de KIJIMA de type I avec effet de maintenance déterministe et constant. L'hypothèse du modèle  $ARA_1$  est que l'effet de la réparation réduit le supplément d'âge ajouté depuis la dernière panne d'un facteur  $\rho$  : pour tous  $t \geq 0$  et  $i \geq 1$

$$A_i(t) = A_{i-1}(t) - \rho(A_{i-1}(T_i) - A_{i-1}(T_{i-1}))$$

Nous pouvons alors réécrire l'âge virtuel ainsi :

$$A_i(t) = t - \rho T_i$$

Démonstration. Nous pouvons à nouveau le montrer par récurrence sur  $i$  : il est évident que le résultat est vérifié pour  $i = 0$ . Supposons que :

$$A_{i-1}(t) = t - \rho T_{i-1}$$

$$A_i(t) = A_{i-1}(t) - \rho(A_{i-1}(T_i) - A_{i-1}(T_{i-1}))$$

$$A_i(t) = t - \rho T_{i-1} - \rho(T_i - \rho T_{i-1} - (T_{i-1} - \rho T_{i-1}))$$

$$A_i(t) = t - \rho T_i$$

Son intensité de défaillance est :

$$\lambda(t) = \lambda(t - \rho T_i) \quad (\text{II. 8})$$

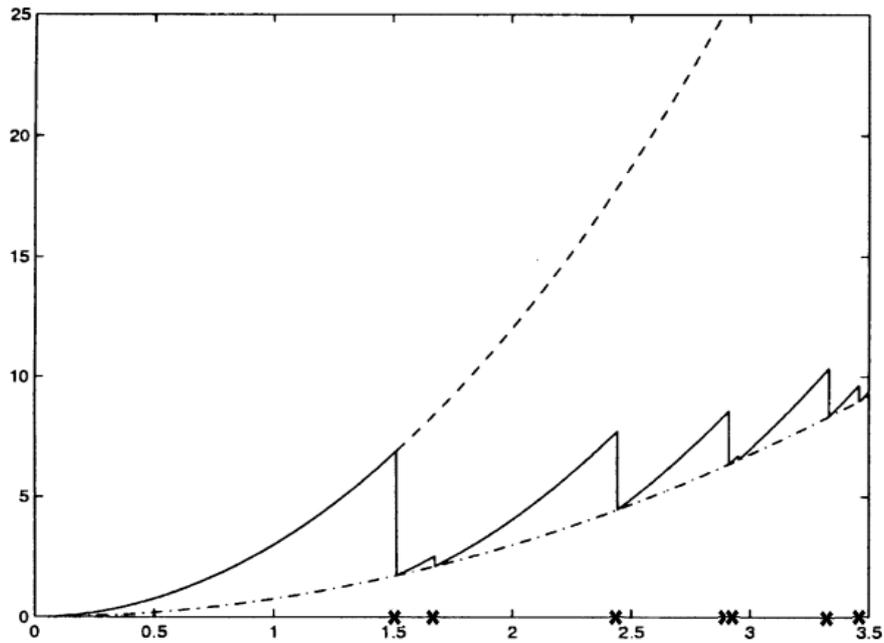


Figure II.3. Intensité de défaillance, modèle  $ARA_1$

Tableau II.1. Intensités de défaillance des modèles de maintenance

Efficacité des maintenances	Modèle de maintenance		Intensité de défaillance
$\rho = 0$	Modèle ABAO		$\lambda(t) = \lambda(t)$
$\rho = 1$	Modèle AGAN		$\lambda(t) = \lambda(t - T_i)$
$0 < \rho < 1$	Modèles de maintenance imparfaite	$ARA_1$	$\lambda(t) = \lambda(t - \rho T_i)$
		$ARA_\infty$	$\lambda(t) = \lambda\left(t - \rho \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \rho)^j T_{i-j}\right)$
		$ARA_m$	$\lambda(t) = \lambda\left(t - \rho \sum_{j=0}^{\min(m-1; i-1)} (1 - \rho)^j T_{i-j}\right)$
		BP	$\lambda(t) = \lambda\left(t - T_i + \sum_{j=1}^i \left(\prod_{k=j}^i (1 - B_k)\right)^j X_j\right)$ $X_j$ est la dure entre deux défaillances

## 6. Estimation des paramètres

Les modèles d'âge virtuel sont influencés par plusieurs paramètres, notamment l'intensité initiale et l'efficacité des réparations. Lorsque nous sommes confrontés à des données et que nous sélectionnons un modèle d'âge virtuel, il est important d'être en mesure d'évaluer les valeurs de ces paramètres. Dans ce cas, nous utilisons une approche statistique pour estimer ces paramètres.

L'approche du maximum de vraisemblance (MLE) est considérée comme la méthode la plus utilisée pour estimer les paramètres d'un processus à partir des données émanant d'un système maintenu.

### 6.1. La méthode du maximum de vraisemblance

Elle est utilisée pour estimer les paramètres d'une fonction ou d'une distribution de probabilités à partir d'un échantillon donné. Son principe consiste à trouver les paramètres de la distribution qui correspondent le mieux, qui maximise la fonction de vraisemblance aux données disponibles.

Si nous considérons  $n$  réalisations indépendantes  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  d'une variable aléatoire  $X$  ayant comme densité de probabilité  $f(x; \theta)$ . La fonction de vraisemblance est définie comme étant une fonction  $L(\theta)$  telle que :

$$L = L(X; \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta)$$

Pour obtenir l'estimation du maximum de vraisemblance entre l'échantillon de données et la distribution considérée, il suffit de maximiser la fonction de vraisemblance. Cependant, la maximisation d'un produit est généralement plus complexe que la maximisation d'une somme.

Pour faciliter le processus, on utilise le log-vraisemblance défini par :

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i; \theta) \quad (\text{II. 9})$$

La fonction de vraisemblance et le log-vraisemblance atteignent leur maximum aux mêmes valeurs des paramètres ( $\theta$ ), appelées estimations du maximum de vraisemblance (MLE) en anglais the Maximum Likelihood Estimates, il est plus commode de travailler avec la log-vraisemblance.

## 6.2. Exemple d'une estimation des paramètres de Weibull pour un modèle (ARA<sub>1</sub>)

L'intensité de défaillance associée à un modèle ara d'ordre 1 (ARA<sub>1</sub>) est :

$$\lambda_t = \lambda(t - \rho T_{N_t}) \quad (\text{II. 10})$$

Selon les valeurs de  $\rho$ , différentes remarques peuvent être faites :

- $\rho = 1$  : la maintenance est parfaite. On retrouve le modèle (AGAN).
- $\rho \in ] 0; 1[$ : la maintenance est efficace.
- $\rho = 0$  : la maintenance est nulle. On retrouve le modèle (ABAO).
- $\rho < 0$  : la maintenance est nuisible.

Ainsi, L'estimation des paramètres de ce modèle est réalisée par la méthode du maximum de vraisemblance [12].

L'intensité de défaillance :

$$\lambda(t) = \lambda(t_i - \rho T_N) \quad (\text{II. 11})$$

$$L(t_i, T_1, \dots, T_{N_t}, i \in \{1, \dots, n\}, \rho) = \prod_{i=1}^n [\lambda] R_t$$

- $T_1, \dots, T_{N_t}$  : Instants des maintenances correctifs effectuées.
- $T_1, \dots, T_{M_t}$  : Instants des maintenances préventives effectuées.
- $\lambda_i(t)$ : Taux de défaillance instantané du composant non maintenu à l'instant t.

### - La vraisemblance

$$L = \prod_{i=1}^n [\lambda(t_i - \rho T_{N_t})] \exp \left( - \sum_{k=0}^{N_t} \left( \int_{T_k}^{T_{k+1}} \lambda(s - \rho T_k) ds \right) - \int_{T_{N_t}}^{t_i} \lambda(s - \rho T_{N_t}) ds \right) \quad (\text{II. 12})$$

Le modèle d'intensité de défaillance avec les paramètres Weibull est :

$$\lambda_t = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t_i - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (\text{II. 13})$$

La vraisemblance du modèle ( $ARA_1$ ) est :

$$\begin{aligned}
 L(t_i, T_1, \dots, T_{N_t}, i \in \{1, \dots, n\}, \beta, \eta, \rho) \\
 &= \prod_{i=1}^n \left[ \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t_i - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} \right] \exp \left( - \sum_{k=0}^{N_t} \left( \int_{T_k}^{T_{k+1}} \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{s - \rho T_k}{\eta} \right)^{\beta-1} ds \right) \right. \\
 &\quad \left. - \int_{T_{N_t}}^{t_i} \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{s - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} ds \right) \quad (\text{II. 14})
 \end{aligned}$$

$$S_1 = \int_{T_k}^{T_{k+1}} \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{s - \rho T_k}{\eta} \right)^{\beta-1} ds = \frac{\beta}{\eta} \int_{T_k}^{T_{k+1}} \left( \frac{s - \rho T_k}{\eta} \right)^{\beta-1} ds \text{ on pose } u = s - \rho T_k$$

$$\frac{\beta}{\eta} \left( \frac{1}{\eta} \right)^{\beta-1} \int_{T_k}^{T_{k+1}} u^{\beta-1} du$$

$$\frac{\beta}{\eta^\beta} \left[ \frac{u^\beta}{\beta} \right]_{T_k}^{T_{k+1}} = \left[ \frac{u^\beta}{\eta^\beta} \right]_{T_k}^{T_{k+1}} = \left[ \left( \frac{u}{\eta} \right)^\beta \right]_{T_k}^{T_{k+1}}$$

On remplace  $u = s - \rho T_k$

$$= \left[ \left( \frac{s - \rho T_k}{\eta} \right)^\beta \right]_{T_k}^{T_{k+1}}$$

$$S_1 = \left[ \left( \frac{T_{k+1} - \rho T_k}{\eta} \right)^\beta - \left( \frac{T_k - \rho T_k}{\eta} \right)^\beta \right]$$

$$S_2 = \int_{T_{N_t}}^{t_i} \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{s - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} ds$$

$$S_2 = \left[ \left( \frac{t_i - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^\beta - \left( \frac{T_{N_t} - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^\beta \right]$$

On substituant  $S_1$  et  $S_2$  dans (II. 14).

$$\begin{aligned}
 L(t_i, T_1, \dots, T_{N_t}, i \in \{1, \dots, n\}, \beta, \eta, \rho) \\
 &= \prod_{i=1}^n \left[ \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t_i - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} \right] \exp \left( - \sum_{k=0}^{N_{T_i}-1} \left[ \left( \frac{T_{k+1} - \rho T_k}{\eta} \right)^\beta \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \left( \frac{T_k - \rho T_k}{\eta} \right)^\beta \right] \right) \exp \left( - \left[ \left( \frac{t_i - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^\beta - \left( \frac{T_{N_t} - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^\beta \right] \right) \quad (\text{II. 15})
 \end{aligned}$$

La log-vraisemblance est utilisée à la place de la vraisemblance pour des raisons pratiques.

Elle permet de faciliter les calculs et de manipuler les quantités plus facilement, car elle transforme les multiplications en additions.

**La log-vraisemblance.**

$$\begin{aligned} \text{Log}(L) = & \sum_{i=1}^n \left[ \ln \left( \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t_i - \rho T_{N_t}}{\eta} \right)^{\beta-1} \right) \right. \\ & - \sum_{k=0}^{N_T-1} \left[ \left( \frac{T_{k+1} - \rho T_k}{\eta} \right)^{\beta} - \left( \frac{T_k - \rho T_k}{\eta} \right)^{\beta} \right] \\ & \left. - \left[ \left( \frac{t_i - \rho T_{N_T}}{\eta} \right)^{\beta} - \left( \frac{T_{N_T} - \rho T_{N_T}}{\eta} \right)^{\beta} \right] \right] \end{aligned} \quad (\text{II. 16})$$

### 6.3. Evaluation des paramètres

En pratique, lorsqu'un système matériel composé de plusieurs composants rencontre une défaillance, la maintenance consiste à réparer ou remplacer le composant défaillant. Cela permet au système de continuer à fonctionner, mais ne le ramène pas à son état initial neuf.

Pour évaluer la fiabilité d'un système de manière probabiliste, il est important d'utiliser un modèle approprié qui représente l'état réel du système. Ainsi, il est essentiel de pouvoir sélectionner un modèle de fiabilité adapté en fonction des données disponibles.

Dans cette optique, l'estimation du facteur de fiabilité est réalisée en utilisant un modèle de maintenance avec les paramètres de Weibull. Pour cela en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance, et des méthodes d'optimisation nous déterminons les paramètres du modèle de réduction d'âge virtuel qui permettent de mieux correspondre aux données observées.

L'estimation de l'efficacité de la maintenance ne se limite pas seulement aux mesures quantitatives, mais comprend également une évaluation qualitative des résultats. Cela peut être utilisé pour évaluer la satisfaction vis-à-vis des services de maintenance, des évaluations de la qualité du travail effectué, à identifier les lacunes, à mettre en œuvre des améliorations.

### **Conclusion**

Ce chapitre a fourni un aperçu des différents modèles d'âge virtuel, de leur définition et de l'estimation des paramètres associés. Ces modèles sont utiles pour étudier le comportement des systèmes en termes de défaillance et de maintenance, ce qui peut être précieux pour la prise de décision en matière de maintenance préventive et corrective, et son évaluation en terme d'efficacité.

# Chapitre

## III

## **Introduction**

Dans ce chapitre nous aborderons l'estimation de l'efficacité de maintenance, sur les interventions exécutées sur une souffleuse du groupe Cevital, dans l'unité de conditionnement d'huile. La souffleuse SBO 10 destinée à la fabrication de bouteilles en PET (Polyéthylène Téréphtalate).

### **1. Présentation de l'entreprise**

Cevital est un groupe industriel et commercial algérien diversifié, fondé en 1998. Il est considéré comme l'un des principaux conglomérats en Algérie et en Afrique.

Cevital opère dans plusieurs secteurs d'activité, notamment l'agroalimentaire, l'électroménager....., le groupe possède un portefeuille de marques reconnues à l'échelle nationale et internationale.

Dans le secteur agroalimentaire, Cevital est présent dans la production de sucre, d'huile végétale, de biscuits, de boissons et d'autres produits alimentaires. Il possède également des fermes agricoles et des installations de transformation pour soutenir ses activités.

#### **1.1. Les produits et la flexibilité de conditionnement de Cevital**

Cevital Agro-Industrie est une entreprise comprenant diverses unités de production, notamment une raffinerie d'huile, une raffinerie de sucre, une unité de fabrication de margarine, une unité de fabrication de sauce, des unités de conditionnement d'eau minérale, une unité de fabrication et de conditionnement de boissons sans alcool, une conserverie, des silos portuaires, ainsi qu'un terminal de déchargement portuaire.

1.2. Organigramme du complexe Cevital

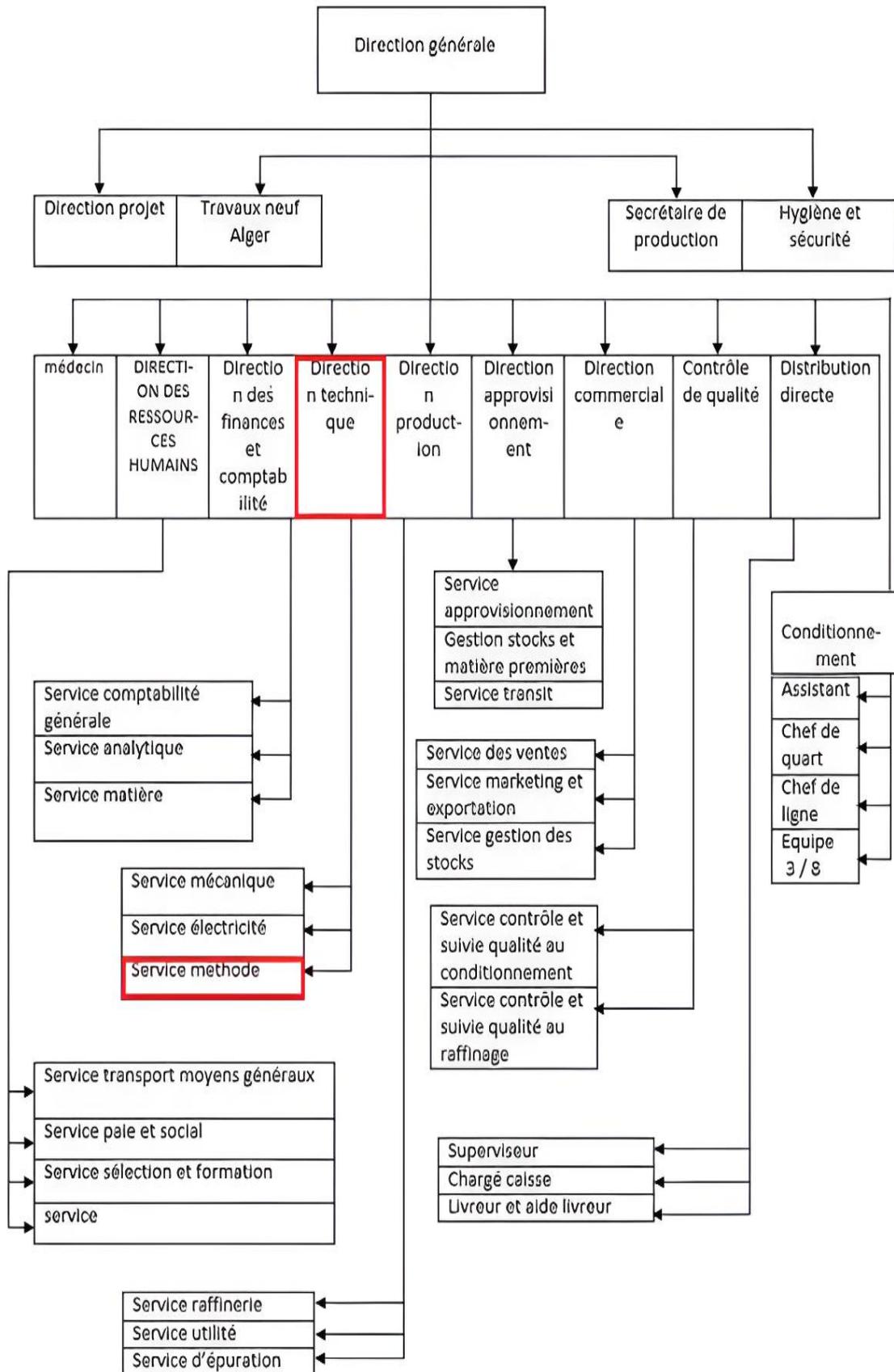


Figure III.1. Organigramme du complexe Cevital

### 1.3. Unité de conditionnement d'huile de Cevital

Actuellement, l'unité de conditionnement d'huile de Cevital est équipée de plusieurs lignes de production. Des lignes de production de bouteilles de 5 litres, et de bouteilles de 4 litres, et de bouteilles de 1 et 2 litre.

Les huiles raffinées sont mises en bouteilles à travers un processus qui implique la transformation du PET en préformes, puis en bouteilles et subissent les étapes suivantes :

- **La souffleuse** : qui est une machine destinée à fabriquer des bouteilles à partir des préformes qui ont une structure de tube, cette dernière est fabriquées dans l'unité plastique.
- **Convoyeur aéraulique rafale** : c'est un dispositif destiné au transport des petites bouteilles en PET de la souffleuse jusqu'à la remplisseuse. Le transport est assuré par un soufflage d'air produit par les colonnes de ventilation équipées des filtres garantissant un air propre.
- **Remplisseuse** : la remplisseuse est l'unité chargée du remplissage des bouteilles du produit fini (huile) dont la vitesse du remplissage peut être variée.
- **Bouchonneuse** : la bouchonneuse se trouve encastrée dans la remplisseuse pour permettre le bouchage des bouteilles juste à la fin du remplissage pour éviter le débordement, les bouchons sont fabriqués et préparés par une autre unité.
- **Etiqueteuse** : elle est destinée à coller les étiquettes enveloppement sur les récipients cylindriques portant des informations sur le produit et le fabriquant.
- **Dateur** : le dateur sert à mentionner la date et l'heure de fabrication du produit
- **Fardeuse** : c'est la machine qui reçoit les bouteilles et les enveloppe dans un film en silicone.
- **Tapis roulant** : c'est un moyen de transport des fardeaux de la sortie de la fardeuse jusqu'à l'entrée du palettiseur.
- **Poseuse poignée** : on trouve ce type de machine uniquement dans les lignes de 4 ou 5 litres. Elle a pour rôle le placement et la fixation des poignées sur les bouteilles.
- **Palettiseur** : cette machine est conçue pour superposer sur une palette plusieurs étages de fardeaux.
- **Banderoleuse** : son rôle est d'entourer la charge d'un film en silicone dans le but d'assurer la bonne tenue des bouteilles pour tout déplacement.

### 1.4. Présentation de la souffleuse SBO 10

Cette machine est spécialement conçue pour le soufflage haute pression d'articles en PET (Polyéthylène Téréphtalate). Elle utilise des préformes appropriées en fonction de l'article final à produire. Cette machine peut être intégrée en amont d'une ligne de remplissage existante ou fonctionner de manière autonome, selon les besoins et les activités de son utilisateur.

Il convient de noter que les informations mise à notre disposition concernant la souffleuse SBO 10 datent que de l'année 2022/2023. Par conséquent, nous avons fait de notre mieux pour interpréter et analyser les données disponibles afin d'obtenir des données exploitables et d'évaluer l'efficacité des actions de maintenance exécutées durant la dite période.



**Figure III.2.** Souffleuse SBO 10

### 1.5. Système fonctionnel, de la souffeuse SBO 10

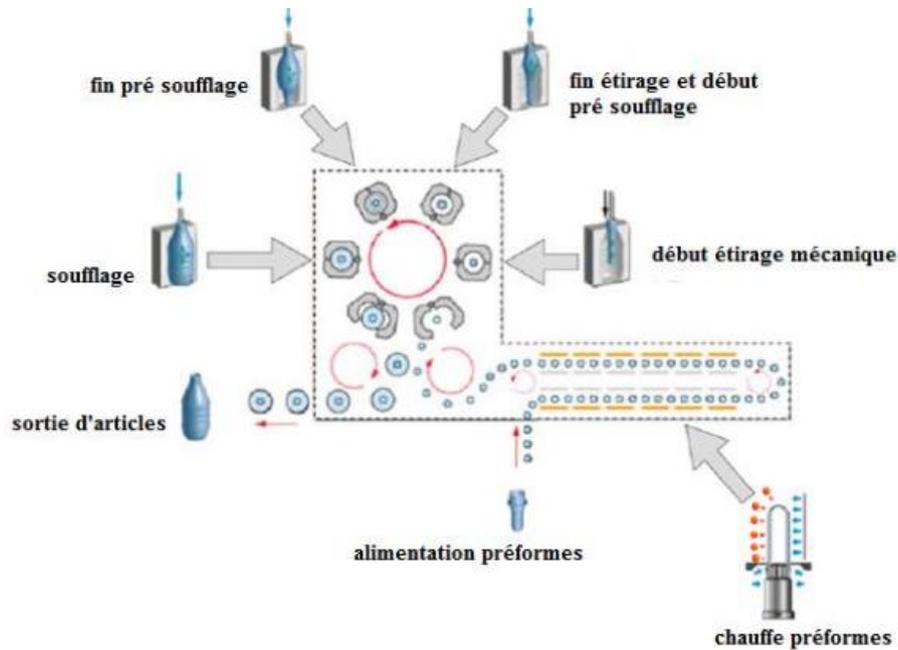


Figure III.3. Système fonctionnel de d'une souffeuse SBO 10

Les étapes pour la fabrication :

- 1- Alimentation préformes.
- 2- Chauffe préformes.
- 3- Début étirage mécanique.
- 4- Fin étirage / Début présoufflage.
- 5- Fin présoufflage.
- 6- Sortie articles.
- 7- Soufflage.

### 2. Collecte des données de la souffeuse SBO 10

Les données obtenues sur la souffeuse SBO10. Ont été fournies sous forme de données brutes. Notre étude s'est limitée à une période d'un an, car les données historiques mise à notre disposition couvrent uniquement la période de 2022 à 2023. Ces données représentent toutes les différentes tâches effectuées durant l'année : les opérations de maintenance préventives et correctives, les dates d'arrêt machine, les dates de remise en service, et une description de l'intervention.

Nous avons ensuite effectué un prétraitement sur ces des données, afin de sélectionner un échantillon fiable, il consiste à sélectionner les interventions ayant un certain impact sur le système, notamment ce qui influe sur la fiabilité et le bon fonctionnement du système. Le prétraitement a pour but sur tout d'éliminant les interventions qui n'ont aucun effet sur le comportement ou la fiabilité du système (comme les interventions de nettoyage, nettoyage du pupitre, des purges.....).

Après ce traitement ces données nous ont permis d'extraire les temps à la défaillance.

Pendant l'examen de ces données, on a observé que certaines dates n'ont pas été saisis, et que des descriptions sur des interventions sont incohérente et manque de pression. Ce qui nous a obligé de les exclure.

#### **Les données**

Ce système a observé pendant plus d'un an, 143 interventions. Sur ces interventions 20 ont été des interventions de maintenance préventive (MP), et 123 des interventions de maintenance corrective (MC).

- **20** maintenance préventive (MP). (**En gras**)
- 123 maintenance corrective (MC).

Leur unité et en heures.

[ 51 58 137 **172** 199 221 239 260 535 648 **677** 759 832 **845** 878 944 969 1163 **1181** 1413 1492  
**1517** 1520 1648 **1685** 1748 1800 1815 1881 1945 **2021** 2121 2131 2140 2271 **2357** 2385 2454  
2585 2650 **2858** 2888 2928 2931 3075 3287 3365 **3366** 3401 3487 3515 3658 3668 3765 3788  
3864 **4040** 4120 4305 **4350** 4451 4745 **5021** 5341 5424 5435 5451 5639 5652 5732 5894 5929  
5959 **6008** 6083 6184 6216 6270 6313 6615 6668 **6701** 6982 7152 7420 7500 7683 7937 7952  
8042 8168 8172 8182 8250 8283 8304 8322 8362 8384 8425 8456 8504 **8549** 8581 8749 8756  
8792 8796 8833 8834 **8889** 8907 8934 9013 9058 9094 **9245** 9335 9395 9416 9461 9532 9674  
9691 9697 **9705** 9718 9720 9791 9794 9799 9824 9825 9917 9943 9965 10026 **10418** 10505  
10661 10669 10680 10819 ].

### **3. Estimation des paramètres d'efficacité de maintenance de la souffleuse SBO 10**

Dans cette section, nous présentons l'évaluation de l'efficacité de la maintenance tout en proposant différentes hypothèses. Nous nous concentrons spécifiquement sur les modèles de maintenance ( $ARA_1$ ) et ( $ARA_\infty$ ).

Pour l'évaluation de l'efficacité de la maintenance nous avons utilisé le logiciel MARS (Maintenance Assessment of Repairable Systems) [11]. Ce logiciel a été spécialement développé pour mettre en pratique les modèles de maintenance et estimer les effets cumulés du vieillissement et des interventions de maintenance (préventive et/ou corrective) sur des systèmes réparables.

L'outil MARS fonctionne en simulant un ensemble de données basées sur des retours d'expérience, qui comprennent des moments spécifiques de maintenance corrective et/ou de maintenance préventive déterministes. Il permet d'analyser différents modèles d'efficacité de maintenance et de vérifier la validité des procédures d'estimation.

Les données utilisées sont des temps à la défaillance.

#### **Résultats des estimations :**

##### **3.1. Hypothèse 1 :**

Pour la première hypothèse nous allons considérer que les maintenances correctives sont de type minimale (ABAO), les maintenances préventives sont de type ( $ARA_1$ ). Puis nous allons considérer que les maintenances préventives sont de type ( $ARA_\infty$ ), que les maintenances correctives sont de modèle minimale (ABAO). Le facteur d'efficacité des maintenances correctives correspondant donc à 0, ( $\rho_c = 0$ .)

Donc ici nous estimons l'efficacité des maintenances préventives seulement.

##### **➤ L'estimation des paramètres du modèle. MC(ABAO)-MP( $ARA_1$ ).**

$$\eta = 97.97968769; \beta = 1.02368; \rho_p = 1$$

Interprétation des résultats :

Nous constatons que l'efficacité des maintenances préventives  $\rho_p = 1$  ce qui signifie donc que l'efficacité des maintenances préventives est parfaite, et un paramètre de forme  $\beta = 1.02368$  qui nous renseigne sur l'évolution du taux de défaillance du système, on peut dire que le système vient de sortir de sa période de vie utile et entamer la période de vieillesse, et un paramètre d'échelle  $\eta = 97.97968769$ , Il représente la durée de vie caractéristique. Ces résultats ne reflètent pas la réalité, les maintenances préventives sont loin d'être considérées parfaites.

➤ **L'estimation des paramètres du modèle. MC (ABAO)-MP ( $ARA_\infty$ ).**

$$\eta = 82.45725848; \beta = 0.972067; \rho_p = 0.913377$$

Interprétation des résultats :

L'efficacité des maintenances préventives  $\rho_p = 0.913377$ , ce qui signifie que les maintenances préventives sont presque parfaites avec le modèle ( $ARA_\infty$ ). Le paramètre de forme  $\beta = 0.972067$  qui nous renseigne que le système est dans sa période de jeunesse, et un paramètre d'échelle  $\eta = 82.45725848$ . Encore une fois, ces résultats ne reflètent pas tout à fait la réalité.

### **3.2. Hypothèse 2 :**

Pour la deuxième hypothèse nous allons considérer que les maintenances préventives sont parfaites (AGAN), les maintenances correctives sont de type ( $ARA_1$ ). Puis nous allons que considérer les maintenances correctives sont de type ( $ARA_\infty$ ), que les maintenances préventives sont parfaites (AGAN), le facteur d'efficacité des maintenances préventives correspond donc à 1 ( $\rho_p = 1$ ).

Donc ici nous estimons l'efficacité des maintenances correctives seulement.

➤ **L'estimation des paramètres du modèle. MC ( $ARA_1$ )-MP (AGAN).**

$$\eta = 86.52313499; \beta = 0.959787; \rho_c = 0.959787$$

Interprétation des résultats :

Ici l'efficacité des maintenances correctives est  $\rho_c = 0.959787$ , ce qui veut dire qu'elles sont presque parfaites, le paramètre de forme  $\beta = 0.959787$  d'où on peut dire que le système

se trouve dans sa période de vie utile , et un paramètre d'échelle  $\eta = 86.52313499$ . Encore une fois les résultats obtenus ne reflètent pas tout à fait la réalité.

➤ **L'estimation des paramètres du modèle. MC ( $ARA_{\infty}$ )-MP (AGAN).**

$$\eta = 78.61; \beta = 0.909173; \rho_c = 0.499615$$

Interprétation des résultats :

Ici l'efficacité des maintenances correctives et  $\rho_c = 0.499615$ , ce qui signifie que les MC sont imparfaites, elles ont une efficacité presque de (50%). Le paramètre de forme  $\beta = 0.909173$  d'où on peut dire que le système se trouve dans sa période de jeunesse , et un paramètre d'échelle  $\eta = 78.61$ .

L'efficacité obtenue se rapproche mieux de la réalité, mais elle reste pas tout à fait réaliste.

### **3.3. Hypothèse 3 :**

Pour la troisième hypothèse nous allons considère que les maintenances préventives sont de type ( $ARA_1$ ). Et que les maintenances correctives sont de type ( $ARA_1$ ). Puis nous allons considérer les maintenances préventives de type ( $ARA_{\infty}$ ), les maintenances correctives de type ( $ARA_{\infty}$ ).

➤ **L'estimation des paramètres du modèle. MC ( $ARA_1$ )-MP ( $ARA_1$ ).**

$$\eta = 101.972789; \beta = 1.0904; \rho_c = 0.965014; \rho_p = 1$$

Interprétation des résultats :

Ici l'efficacité des maintenances préventives est  $\rho_p = 1$  ce qui signifie donc que les maintenances préventives son parfaite (AGAN), l'efficacité des maintenances correctives est  $\rho_c = 0.965014$ . Nous pouvons dire qu'elles sont presque parfaites et un paramètre de forme  $\beta = 1.0904$  d'où on peut dire que le système vient de sortir de sa période de vie utile et entamer la période de vieillesse, le paramètre d'échelle  $\eta = 101.972789$  . Ces résultats ne reflètent pas la réalité.

➤ **L'estimation des paramètres du modèle. MC ( $ARA_{\infty}$ )- MP ( $ARA_{\infty}$ ).**

$$\eta = 29.6014647; \beta = 0.664211; \rho_p = 0.167117; \rho_c = 0.319753$$

Interprétation des résultats :

Ici par contre nous constatons que l'efficacité des maintenances préventives est  $\rho_p = 0.167117$ , c'est à dire presque minimale. L'efficacité des maintenances correctives est  $\rho_c = 0.319753$ . le paramètre de forme  $\beta = 0.664211$  qui nous dit que le système et dans sa période de jeunesse, ce qui n'est pas le cas en réalité, le paramètre d'échelle  $\eta = 29.6014647$ .

Nous pouvons dire que ces résultats sont les plus proches de la réalité en terme d'efficacité de la maintenance.

#### **3.4. Hypothèse 4 :**

Pour la première hypothèse nous allons considérer que les maintenances correctives sont de type minimale (ABAO). Et que les maintenances préventives sont de type Brown-Proschan (BP). En considérant les maintenances correctives de type minimale (ABAO), le facteur d'efficacité des maintenances correctives correspondant donc à 0, ( $\rho_c = 0$ ).

➤ **Estimation des paramètres du modèle MC (ABAO)-MP (BP).**

$$\eta = 77.33416121; \beta = 0.961881; \rho_p = 0.295937$$

Interprétation des résultats :

Pour le modèle de Brown-Proschan l'efficacité de la maintenance et de  $\rho_p = 0.295937$ .

Nous pouvons aussi le considérer comme proche de la réalité, en terme d'efficacité de maintenance.

#### **Conclusion:**

La collecte et le traitement des données, de défaillances et de maintenance, de la souffeuse SBO 10 ont permis d'extraire des informations utiles pour l'évaluation de l'efficacité des interventions de maintenance.

Les résultats obtenus, selon diverses hypothèses, montrant que considérer que les maintenances préventives et correctives sont du type  $(ARA_\infty)$  semble plus réaliste. L'hypothèses de maintenance préventive de type BP et la corrective de type (ABAO) semble également réaliste.

Les autres hypothèses menant à des résultats différents de la réalité.

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire met en évidence l'importance capitale de la maintenance pour assurer la performance, la fiabilité et la disponibilité des systèmes. Une gestion efficace de la maintenance se révèle essentielle pour garantir la durabilité, la sécurité et le bon fonctionnement des équipements, autant de facteurs critiques pour la survie et la prospérité des entreprises.

Les modèles d'âge virtuel présentés dans cette étude offrent une approche précieuse pour évaluer de manière objective l'effet de la maintenance sur les systèmes. Ces modèles permettent une quantification de l'efficacité des opérations de maintenance, offrant ainsi une base solide pour les prises de décisions. En estimant le facteur d'efficacité de la maintenance, les entreprises sont en mesure de prendre des décisions éclairées quant aux impacts de leurs interventions de maintenance. Elles peuvent ainsi évaluer dans quelle mesure leurs objectifs de disponibilité et/ou de sécurité sont satisfaits, et ajuster en conséquence leurs efforts de maintenance.

Cette approche méthodologique permet aux gestionnaires et aux professionnels de la maintenance de mettre en place des stratégies efficaces visant à assurer la fiabilité et la disponibilité des systèmes. En comprenant l'effet réel des opérations de maintenance, ils peuvent optimiser leurs actions et améliorer la productivité tout en réduisant les coûts associés.

Il est également important de souligner que, face à la diversité des approches de modélisation de l'efficacité de la maintenance, il convient de choisir des hypothèses réalistes et pertinentes. L'exactitude des résultats obtenus dépend directement de la réalité et de l'applicabilité des hypothèses utilisées. Il est donc crucial de prendre en compte les conditions et les contraintes spécifiques à chaque contexte afin d'obtenir des résultats fiables et exploitables.

L'application industrielle réalisée dans le cadre de cette recherche démontre de manière claire et concrète qu'il est plus réaliste de considérer la maintenance préventive comme imparfaite ( $ARA_{\infty}$ , BP) et la maintenance corrective comme soit minimale (ABAO), soit imparfaite ( $ARA_{\infty}$ ). D'autres hypothèses, telles que celle considérant la maintenance préventive comme parfaite (AGAN), peuvent conduire à des résultats incohérents et déconnectés de la réalité.

Enfin, il convient de souligner l'importance primordiale d'un retour d'expérience complet et de qualité. Un tel retour d'expérience, basé sur une analyse approfondie des opérations de maintenance antérieures, permet de tirer des enseignements précieux pour améliorer les performances du service de maintenance. En capitalisant sur ces expériences passées, les entreprises peuvent mettre en place des mesures correctives, ajuster leurs pratiques et optimiser leur efficacité, contribuant ainsi à une amélioration continue et durable des performances du service de maintenance.

## Références bibliographiques

- [1] NF. EEN13306. Terminologie de la maintenance. AFNOR, 2001.
- [2] E. AIT MOKHTAR, Optimisation de la sureté de fonctionnement et de la maintenance des systèmes complexes par les réseaux bayésiens, Thèse doctorat, Université de Bejaia, 2016.
- [3] R. LAGGOUNE, Optimisation de la maintenance par la fiabilité opérationnelle des systèmes mécaniques multi-composants. Applications industrielles. Thèse de doctorat en Génie mécanique, option Mécaniques des matériaux, université A.MIRA-BEJAÏA, juin 2009.
- [4] L. Remi, Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables, Application `a un système photovoltaïque, Thèse de Doctorat, Université d'Angers, 2011.
- [5] E. Ferton, H. Procaccia, M. Procaccia. Aging initiation time evaluation for repairable equipments, and preventive maintenance optimization. 16ème Congrè de Maitrise des Risques de Fonctionnement, pp.6–10, Avignon, 2008.
- [6] O. Gaudoin, L. Doyen. Modélisation de l'efficacité de la maintenance des systèmes réparables –Synthèse bibliographique. Rapport du contrat T50L47/F00555/0 entre EDF et le LMC, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004.
- [7] M. Kijima. Some results for repairable systems with general repair. Journal of Applied Probability, Vol. 26, N°. 9, pp.89–102,1989.
- [8] M. Brown, F. Proschan. Imperfect Repair. Journal of Applied Probability, Vol. 20, pp. 851–859, 1983.
- [9] E. Ait Mokhtar, R. Laggoune, A. Chateaneuf, « Modélisation hybride de l'efficacité de la maintenance des systèmes complexes réparables », 11ème journées, Fiabilité des matériaux et des structures – Clermont – Ferrand, 5-7 juillet 2022.
- [10] L. Doyen and O. Gaudoin. Classes of imperfect repair models based on reduction of failure intensity or virtual age. Reliability Engineering & System Safety, 84(1) :45-56, 2004.
- [11] E. Remy, M. A. Gamero, V. Verrier, L.Doyen, O.Gaudoin. MARS: a software tool for maintenance assessment of Repairable Systems. 16ème Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Avignon, 2008.
- [12] William Lair. Modélisation dynamique de systèmes complexes pour le calcul de grandeurs fiabilistes et l'optimisation de la maintenance. Thèse doctorat. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2011. France.

- [13] Bruno Castanier. Contribution à l'optimisation de la décision sous incertitudes : application à la maintenance. Thèse doctorat. Université de Nantes, 2012.

## Résumé

Ce travail met en évidence l'importance de l'évaluation de l'efficacité de la maintenance.

La maintenance qui est une série d'actions correctives et préventives visant à maintenir ou à rétablir le fonctionnement d'un système, on aborde les aspects clés liés à la maintenance, tels que les modèles de fiabilité, l'optimisation de la maintenance et les expressions statistiques utilisées en fiabilité.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'efficacité de la maintenance à travers les modèles d'âge virtuel, les modèles (ARA) réduction arithmétique d'âge virtuel, estimer le facteur d'efficacité de maintenance nous permettra de valoriser et mesurer l'impact de la maintenance, et pouvoir quantifier les résultats de ces maintenances sur les systèmes, Ce qui nous permettra de juger la satisfaction vis-à-vis de la performance du service maintenance.

## Abstract

This work highlights the importance of evaluating the efficiency of maintenance.

Maintenance is a series of corrective and preventive actions aimed at maintaining or restoring the operation of a system. Key aspects related to maintenance are discussed, such as reliability models, maintenance optimization and statistical expressions used in reliability.

The main objective of this work is to evaluate the efficiency of maintenance through virtual age models, arithmetic reduction of virtual age (ARA) models, estimating the maintenance efficiency factor will enable us to value and measure the impact of the maintenance, and being able to qualitatively evaluate the results of these systems maintenance will enable us to judge satisfaction with maintenance services.

## ملخص

يتسلط هذا العمل على أهمية تقييم فعالية الصيانة.

الصيانة، هي سلسلة من الإجراءات التصحيحية والوقائية التي تهدف إلى الحفاظ على عمل النظام أو تصليحه، تتناول الجوانب الرئيسية المتعلقة بالصيانة، مثل نماذج الموثوقية وتحسين الصيانة والتعبيرات الإحصائية المستخدمة في الموثوقية.

الهدف الرئيسي من هذا العمل وتقييم كفاءة الصيانة من خلال نماذج العمر الافتراضي، ونماذج تخفيض العمر الافتراضي الحسابي، وتقدير عامل كفاءة الصيانة سيسمح لنا بتقدير وقياس تأثير صيانتنا، والقدرة على ذلك تحديد نتائج هذه (ARA) الصيانة على الأنظمة، مما سيسمح لنا بالحكم على مدى الرضا عن أداء خدمة الصيانة.