

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**Université Abderrahmane Mira de Bejaïa**



**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Electrique**

# **Mémoire de fin d'étude**

**En vue de l'obtention du diplôme de Master**

**Filière : électromécanique**

**Spécialité : Maintenance Industrielle**

## **Thème**

# **Modélisation et estimation de l'efficacité de la maintenance des systèmes complexes**

**Présenté par :**

**Mr. Chebbout Mohamed Salah**

**Encadré par :**

**Mr. AIT MOKHTAR El Hassene**

**Année Universitaire 2021/2022**

# Remerciement

Je tiens à remercier

Mon encadrant Mr Ait Mokhtar pour sa disponibilité à tout moment, ses précieux conseils et ses encouragements.

Mes parents qui m'ont soutenu pendant toute ma période de scolarité.

Mon petit frère Rafik, ma soeurette Yasmine.

Toute ma famille et mes amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

# Dédicace

A tous ceux qui m'aiment

## Table des matières

Remerciement.....	
Dédicace .....	
Listes des figures :.....	
Liste des tableaux :.....	
Introduction générale.....	1

### Chapitre I : Généralités sur la maintenance

I-1 Introduction .....	3
I-2 Définition de la maintenance .....	3
I-3 Les types de la maintenance .....	3
I-3-1 Maintenance corrective (MC) .....	4
I-3-2 Maintenance préventive (MP).....	4
I-4 Objectifs de la maintenance.....	4
I-5 La fiabilité.....	5
I-6 Définition d'un système.....	5
I-6-1 Différentes configurations des systèmes .....	5
I-6-1-1 Système série .....	5
I-6-1-2 Système parallèle .....	6
I-6-1-3 Système mixte.....	6
I-6-1-4 Système complexe.....	7
I-7- Principales fonctions statistique utilisées en fiabilité.....	7
I-7-1 Les fonctions de répartition et de fiabilité.....	7
I-7-2 La densité de probabilité .....	7
I-7-3 Le taux de défaillance .....	8
I-8 Lois de probabilité utilisées en fiabilité.....	8
I-8-1 Loi exponentielle.....	8
I-8-2 Loi Weibull .....	9
I-9 Modèle d'efficacité de maintenance .....	10
I-9-1 Modèles de base .....	10
I-9-1-1 Modèle de maintenance minimale (ABAO) .....	10
I-9-1-2 Modèle de maintenance parfaite(AGAN).....	11
I-9-2 Modèle de maintenance imparfaite .....	11
I-9-2-1 Modèles de réduction d'intensité de défaillance.....	12
I-9-2-2 Modèle de réduction d'âge virtuel .....	13
I-9-2-3 Modèle hybride .....	13

Conclusion.....	15
-----------------	----

## **Chapitre II : Evaluation de la fiabilité des systèmes multi-composants**

II-1 Introduction .....	16
II-2 Méthodes d'évaluation de la fiabilité des systèmes complexes .....	16
II-2-1 Arbre de défaillance .....	16
II-2-2 Chaîne de Markov .....	17
II-2-3 Réseaux de Petri stochastique .....	17
II-3 Les réseaux bayésien .....	18
II-3-1 Définition .....	18
II-3-2 Théorème de Bayes .....	19
II-3-3 Type des réseaux bayésiens .....	19
II-3-3-1 Réseaux bayésiens discrets [8] .....	19
II-3-3-2 Réseau bayésien continu [8] .....	19
II-3-3-3 Réseau bayésien hybride [8] .....	19
II-3-3-4 Réseau bayésien orienté objet [8] .....	19
II-3-4 Construction d'un réseau bayésien .....	20
II-3-4-1 Construction d'un RB à partir des avis d'experts et de donnée de retour d'expérience : .....	20
II-3-4-2 Construction d'un RB à partir d'un arbre de défaillance : .....	20
II-3-5 Inférence bayésienne [4] .....	21
II-3-6 Application Numérique.....	21
II-3-6-1 Résultats de la simulation : .....	23
Conclusion.....	24

## **Chapitre III : Modélisation et estimation des modèles d'efficacités de maintenance d'un système multi-composant**

III-1 Introduction.....	25
III-2 Estimation des paramètres de fiabilités et d'efficacités de maintenance .....	25
III-2-1 Méthode des moindres carrées .....	25
III-2-2 Régression non linéaire .....	25
III-2-3 Le coefficient de détermination( $R^2$ ) .....	26
III-3 Présentation de l'application.....	26
III-4 Implémentation du système .....	26
III-5 Application Numérique.....	27
III-5-1 Configuration série .....	27
III-5-1-1 Résultat de la simulation .....	28

III-5-1-2	Interprétation des résultats de la simulation .....	28
III-5-2	Configuration parallèle .....	29
III-5-2-1	Résultats de la simulation.....	29
III-5-2-2	Interprétation des résultats .....	29
III-5-3	Configuration complexe .....	30
III-5-3-1	Résultats de la simulation.....	30
III-5-3-2	Interprétation des résultats .....	31
III-6	Ajustement des paramètres de weibull.....	31
III-7	Ajustement des paramètres d'efficacité de maintenance .....	31
III-7-1	Configuration série .....	32
III-7-1-1	Interprétation des résultats .....	33
III-7-1-2	Choix du modèle .....	33
III-7-2	Configuration parallèle .....	34
III-7-2-1	Interprétations des résultats .....	34
III-7-2-2	Choix du modèle .....	35
III-7-3	Configuration complexe .....	35
III-7-3-1	Intervention de maintenance S1 : .....	36
III-7-3-1-1	Interprétations des résultats : .....	36
III-7-3-1-2	Choix du modèle .....	37
III-7-3-2	Intervention de maintenance S1, S2 : .....	37
III-7-3-2-1	Interprétation des résultats .....	38
III-7-3-2-2	Choix du modèle .....	38
III-7-3-3	Intervention maintenance S1, S2, S3 : .....	39
III-7-3-3-1	Interprétation des résultats .....	39
III-7-3-3-2	Choix du modèle .....	40
	Conclusion.....	40
	Conclusion générale .....	41
	Références bibliographiques .....	
	Résumé .....	

## Listes des figures :

<b>Figure I. 1</b> : Classification des différents types de la maintenance. ....	3
<b>Figure I. 2</b> : Système série. ....	5
<b>Figure I. 3</b> : Système parallèle. ....	6
<b>Figure I. 4</b> : Système mixte. ....	6
<b>Figure I. 5</b> : Schéma d'un système complexe. ....	7
<b>Figure I. 6</b> : Fonction de densité de probabilité – loi exponentielle. ....	8
<b>Figure I. 7</b> : Evolution du taux de défaillance en fonction de $\beta$ -loi Weibull. ....	9
<b>Figure I. 8</b> : Intensité de défaillance dans le cas de la maintenance ABAO. ....	10
<b>Figure I. 9</b> : Intensité de défaillance dans le cas d'une maintenance AGAN. ....	11
<b>Figure I. 10</b> : Modèle de réduction géométrique d'intensité de défaillance. ....	13
<b>Figure I. 11</b> : Intensité de défaillance dans le modèle hybride. ....	14
<b>Figure II. 1</b> : Exemple d'un Arbre de défaillance. ....	16
<b>Figure II. 2</b> : Chaîne de Markov à deux états. ....	17
<b>Figure II. 3</b> : Schéma d'un RdP. ....	18
<b>Figure II. 4</b> : Exemple d'un réseau bayésien. ....	18
<b>Figure II. 5</b> : Réseau bayésien du système. ....	21
<b>Figure II. 6</b> : Intensité de défaillance Configuration parallèle. ....	23
<b>Figure II. 7</b> : Intensité de défaillance configuration série. ....	23
<b>Figure II. 8</b> : Intensité de défaillance configuration complexe. ....	23
<b>Figure III. 1</b> : Exemple d'une régression non linéaire. ....	25
<b>Figure III. 2</b> : Intensité de défaillance avec Maintenance S1 et S2. ....	28
<b>Figure III. 3</b> : Intensité de défaillance avec Maintenance S1. ....	28
<b>Figure III. 4</b> : Intensité de défaillance après maintenance sur $S_1, S_2$ et $S_3$ . ....	28
<b>Figure III. 5</b> : Intensité de défaillance après Maintenance sur S1 et S2. ....	29
<b>Figure III. 6</b> : Intensité de défaillance après Maintenance sur S1. ....	29
<b>Figure III. 7</b> : Intensité de défaillance après maintenance sur $S_1, S_2$ et $S_3$ . ....	29
<b>Figure III. 8</b> : Intensité de défaillance après Maintenance sur S1. ....	30
<b>Figure III. 9</b> : Intensité de défaillance après Maintenance sur S1 et S2. ....	30
<b>Figure III. 10</b> : Intensité de défaillance après maintenance sur S1, S2 et S3. ....	30
<b>Figure III. 11</b> : Ajustement des paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration série avec intervention de maintenance sur S1. ....	32
<b>Figure III. 12</b> : Ajustement des paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration parallèle intervention de maintenance S1 et S2. ....	34
<b>Figure III. 13</b> : Ajustement des paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1. ....	36
<b>Figure III. 14</b> : Ajustement des paramètres de weibull pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1 et S2. ....	37
<b>Figure III. 15</b> : Ajustement des paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1, S2, S3. ....	39

## Liste des tableaux :

<b>Tableau II. 1</b> : Table de probabilités pour la configuration série.....	22
<b>Tableau II. 2</b> : Table de probabilités pour la configuration parallèle. ....	22
<b>Tableau II. 3</b> : Table de probabilités pour la configuration complexe.....	22
<b>Tableau III. 1</b> : Les paramètres de la loi weibull des composants.....	27
<b>Tableau III. 2</b> : Paramètre initiaux pour les trois configurations.....	31
<b>Tableau III. 3</b> : Paramètres des modèles de maintenance imparfaite pour la configuration série. ....	32
<b>Tableau III. 4</b> : Paramètres des modèles d'efficacité de maintenance pour la configuration parallèle. ....	34
<b>Tableau III. 5</b> : Paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1 .....	36
<b>Tableau III. 6</b> : Paramètres des modèles de maintenance imparfaite pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1et S2.....	38
<b>Tableau III. 7</b> : Paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1, S2 et S3. ....	39

# **Introduction générale**

Avant la seconde guerre mondiale les systèmes industriels étaient généralement simple avec des systèmes de commande basique, à ce stade de l'histoire la notion de maintenance se résumait seulement à des actions d'entretien curatifs et de réparations. Après la fin de la guerre, la reconstruction industrielle a recommencé, le marché est donc devenu de plus en plus compétitif ce qui poussa les usines à augmenter le rythme de production, cette augmentation à entrainer une augmentation des temps d'arrêts des équipements industriels donc des coûts de réparation plus élevés, c'est dans ce contexte que la maintenance à vue le jour, au début dans les industries de pointe tels que le nucléaire, l'aéronautique...etc. Par la suite la fonction de maintenance est devenue une fonction à part entière au sein des entreprises.

De nos jours, les systèmes industriels sont loin d'être simple en effet plusieurs composants en interactions entre eux forment des systèmes de plus en plus complexes, la maintenance de ses derniers s'est avéré très compliqué du fait que la prévision des comportements de ses systèmes est une tâche très difficile, les experts en maintenance se sont donc retrouvés face à un nouveau challenge qui consiste à développer de nouvelles techniques pour l'optimisation de la maintenance.

Les réseaux bayésiens (RB) originaires de l'intelligence artificielle, se sont montrés très efficace dans plusieurs domaines tels que la médecine, la prévision météorologique...etc. ce qui à pousser les chercheurs en maintenance à les utiliser dans le domaine de la sureté de fonctionnement afin de bien planifier les actions de maintenance imparfaite des systèmes complexes.

Notre travail consiste à modéliser l'efficacité de maintenance d'un système complexe avec les réseaux bayesiens, ce dernier est organisé comme suit :

Le 1<sup>er</sup> chapitre sera consacré aux généralités sur la maintenance, nous allons rappeler les différentes définitions liées au domaine de la maintenance et de la fiabilité, les différentes configurations des systèmes, les lois de statistique et de probabilité utilisées en fiabilité ainsi que différents modèles d'efficacité de maintenance.

Le 2<sup>ème</sup> chapitre sera dédié aux méthodes classiques d'estimation de la fiabilité des systèmes complexes, par la suite nous allons détailler la méthode d'estimation de la fiabilité par les réseaux bayésiens qui est la méthode employée dans notre travail, une application sur MATLAB ainsi que les résultats des simulations seront présenté à la fin du chapitre.

Le 3<sup>ème</sup> chapitre sera entièrement consacré à la simulation par Matlab de l'efficacité de maintenance d'un système multi-composant avec 3 composants et l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, une conclusion générale sera récapitulative de toutes les étapes et les déductions.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur la maintenance**

**I-1 Introduction**

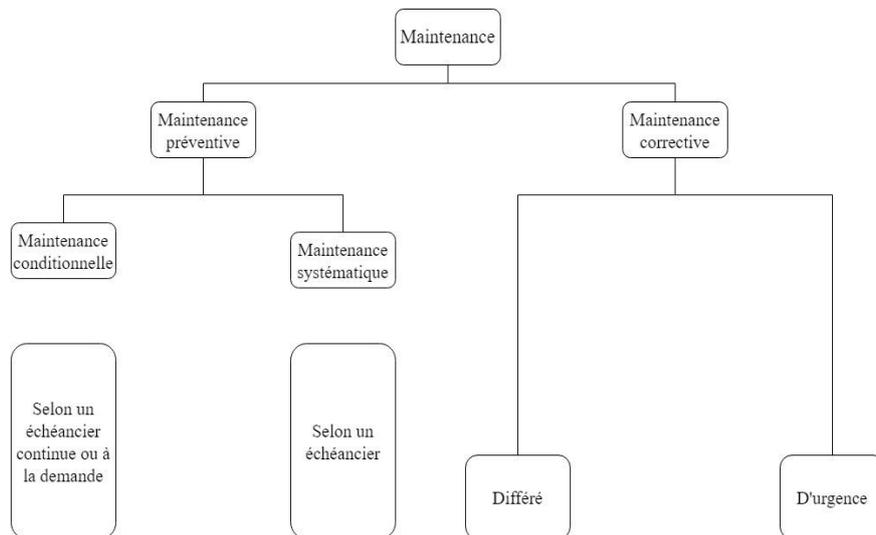
Avant les années 1950, le concept de la maintenance se réduisait seulement à l’entretien des équipements, l’évolution de l’industrie ainsi que le besoin d’optimiser le rendement des biens et de minimiser le temps d’arrêt des équipements au sein des entreprises à fait de la maintenance de nos jours une fonction à part entière au sein de ses dernières.

On consacre ce chapitre en premier lieu à l’état de l’art de la maintenance ainsi que les notions de base de la fiabilité ensuite nous allons rappeler les configurations des systèmes et leurs propriétés, à la fin du chapitre nous verrons les fonctions de statistique et de probabilité utilisées en fiabilité ainsi que les différents modèles de maintenance.

**I-2 Définition de la maintenance**

La maintenance est généralement un ensemble d’opérations sur un appareil ou un système dans le but de le faire fonctionner ou de le maintenir en état de bon fonctionnement, selon l’association française de normalisation AFNOR la maintenance est l’ensemble des toutes les actions technique, administrative et de management durant le cycle de vie d’un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [1].

**I-3 Les types de la maintenance**



**Figure I. 1 : Classification des différents types de la maintenance [1].**

### I-3-1 Maintenance corrective (MC)

MC est une maintenance effectuée après la détection d'une panne pour remettre un bien dans un état dans lequel il peut exécuter la fonction souhaitée. Il existe deux types de maintenance corrective :

- **Maintenance palliative** : la maintenance palliative se caractérise par le fait qu'elle est temporaire et provisoire, conçu pour dépanner le système temporairement dans le but d'assurer une partie de la fonction requise, ce type de maintenance est systématiquement suivi d'une maintenance curative [2].
- **Maintenance curative** : La maintenance curative est une action de MC qui permet de remettre définitivement le système en un état lui permettant d'accomplir ses fonctions requises, l'intervention peut avoir lieu juste après l'apparition d'une défaillance ou après un dépannage. Contrairement à la maintenance palliative, la maintenance curative est une réparation durable [2].

### I-3-2 Maintenance préventive (MP)

La MP est une maintenance effectuée dans le but de réduire la probabilité de défaillance d'un bien, elle est exécutée à des intervalles prédéterminés [2].

- **Maintenance systématique** : la maintenance systématique est une MP exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unité d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien. Donc même si le bien ne montre aucun signe de défaillance certains composants doivent être changés [2].
- **Maintenance conditionnelle** : appelé aussi maintenance prédictive c'est une MP basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent [2].

### I-4 Objectifs de la maintenance

Nous pouvons identifier deux objectifs majeurs de la maintenance :

- L'un à dominante économique : réduire les coûts de défaillance à travers elle le budget du service.
- L'autre à dominante opérationnelle : améliorer la disponibilité et la durabilité des équipements à travers elle la productivité [3].

## I-5 La fiabilité

La fiabilité d'un produit ou d'un système signifie dans le langage courant, l'absence de panne et des défaillances, la performance et le bon fonctionnement, selon l'AFNOR la fiabilité est « *l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée* ». Elle est souvent associée à la lettre R du nom de cette dernière en anglais « Reliability », d'un point de vue mathématique la fiabilité à l'instant  $t$  correspond à la probabilité que le système n'ait pas subi de défaillance durant sa durée de vie  $T$  [4].

$$R(t) = P(T > t) \quad (1.1)$$

## I-6 Définition d'un système

Un système peut être défini comme étant le résultat d'un assemblage d'éléments, composants, interconnectés entre eux et avec l'environnement dans le but de réaliser un service, en effet selon l'AFIS (Association Française d'Ingénierie Système) « un système est décrit comme un ensemble d'éléments en interaction entre eux et avec l'environnement, intégré pour rendre à son environnement les services correspondants ».

### I-6-1 Différentes configurations des systèmes

Avec l'apparition de l'ère industrielle les systèmes qui étaient auparavant simple est facile à comprendre sont maintenant de plus en plus complexe. Du point de vue fiabilité les systèmes sont classés selon les configurations suivantes :

#### I-6-1-1 Système série

Un système série est un système qui peut fonctionner que lorsque tous ses composants sont fonctionnels, pour avoir la probabilité de bon fonctionnement d'un système série on fait le produit des probabilités de bon fonctionnement de ses composants par contre le taux de défaillance de ce dernier est la somme des taux de défaillance de ses composants [4].

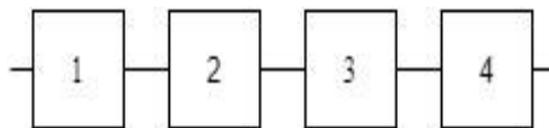


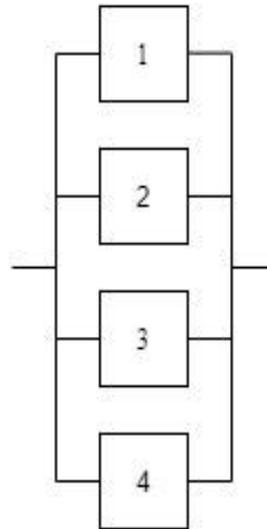
Figure I. 2 : Système série.

La fiabilité d'un système série s'écrit comme suit :

$$R_s(t) = R_1(t) \times \dots \times R_n(t) \quad (1.2)$$

**I-6-1-2 Système parallèle**

Un système parallèle est un système qui peut fonctionner même si seulement un de ses composants est fonctionnel, la probabilité de défaillance est égale au produit des probabilités de défaillance de ses composants [4].



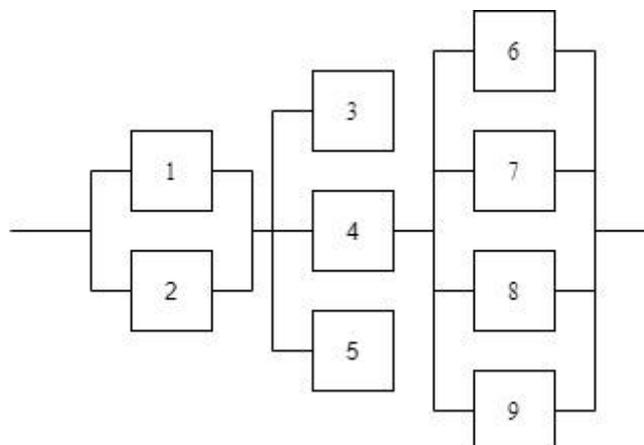
**Figure I. 3 : Système parallèle.**

La fiabilité d'un système parallèle s'écrit comme suit :

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (1.3)$$

**I-6-1-3 Système mixte**

Un système mixte est une combinaison des systèmes séries et parallèles, on peut distinguer deux configuration possible : les systèmes série-parallèle et les systèmes parallèle-série [4].



**Figure I. 4 : Système mixte.**

#### I-6-1-4 Système complexe

Un système complexe est un système composé de nombreux composants qui peuvent interagir les uns avec les autres. On qualifie un système comme étant complexe quand un observateur ne peut pas prévoir le comportement ou l'évolution de ce dernier [4].

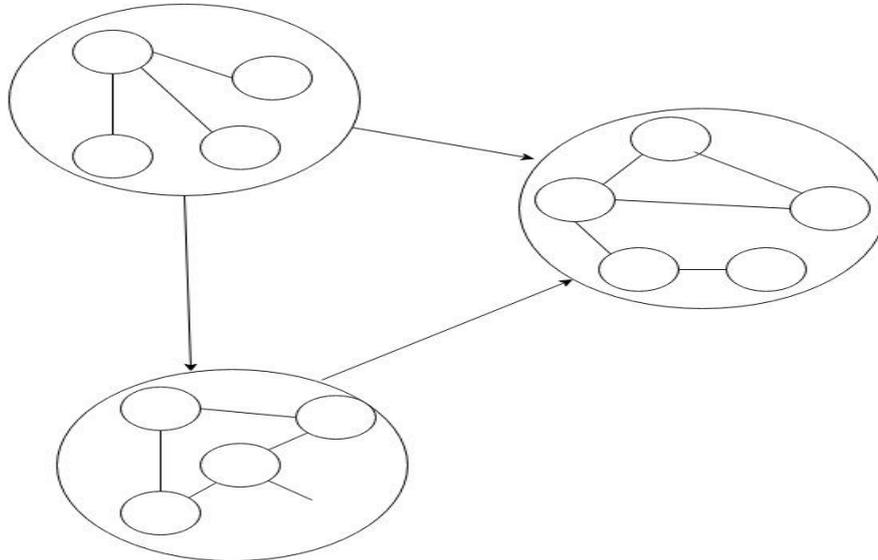


Figure I. 5 : Schéma d'un système complexe.

#### I-7- Principales fonctions statistique utilisées en fiabilité

Chaque système possède ses propres caractéristiques, ces dernières font que le temps d'apparition de la défaillance soit imprévu et aléatoire c'est donc une variable qui a une probabilité qui lui correspond et cela donne une loi de probabilité [5].

##### I-7-1 Les fonctions de répartition et de fiabilité

$F(t)$  La fonction de répartition représente la probabilité d'avoir au moins une défaillance durant la durée de vie du système, la fonction de survie  $R(t)$  aussi appelé fonction de fiabilité est quant à elle la probabilité que le système fonctionne sans défaillance pendant la durée de vie [5].

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad (1.4)$$

##### I-7-2 La densité de probabilité

Elle exprime la probabilité d'avoir une défaillance à l'instant  $t$ , elle est noté  $f(t)$  elle représente la dérivé de la fonction  $F(t)$  [5].

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1.5)$$

### I-7-3 Le taux de défaillance

Noté  $\lambda(t)$  il est aussi appelé fonction de hasard, il exprime la probabilité que la défaillance d'un bien se produise entre  $[t, t + dt]$  tout en sachant que le dispositif a fonctionné jusqu'à l'instant  $t$  [5].

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{dR(t)}{R(t)} \quad (1.6)$$

### I-8 Lois de probabilité utilisées en fiabilité

En fiabilité on dispose de plusieurs lois de probabilité, cependant les plus utilisées sont la loi exponentielle et la loi Weibull

#### I-8-1 Loi exponentielle

La loi exponentielle est très utilisée notamment pour les composants électroniques puisque ces derniers possèdent un taux de défaillance constant et les défaillances sont aléatoires [5].

Les caractéristiques d'une variable aléatoire  $T$  distribuée selon une loi exponentielle sont :

-Fonction de répartition :

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

-Densité de probabilité :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad t \geq 0 \quad (1.8)$$

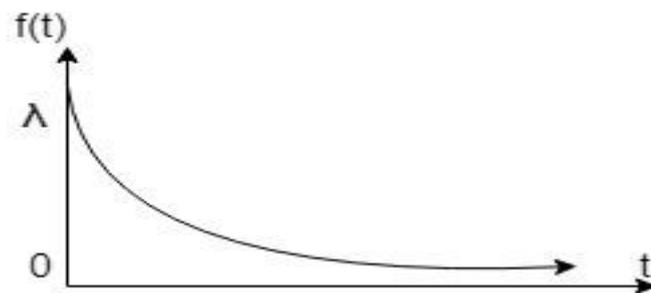


Figure I. 6 : Fonction de densité de probabilité – loi exponentielle

I-8-2 Loi Weibull

La loi Weibull est très utilisée dans le domaine de la fiabilité pour son caractère flexible et au fait qu'elle englobe d'autres lois de probabilité (loi exponentielle), elle est définie par le paramètre de forme  $\beta$  ainsi que le paramètre d'échelle  $\eta$  parfois on prend en considération un autre paramètre de localisation  $\gamma$  [4].

Les caractéristiques d'une variable aléatoire T distribuée selon la loi Weibull sont :

-Fonction de fiabilité :

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

-Densité de probabilité :

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

-Taux de défaillance instantané :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (1.11)$$

Le paramètre de forme  $\beta$  est très important puisque en le variant on peut modéliser les trois phases de la courbe en baignoire (figure 1.4) [5].

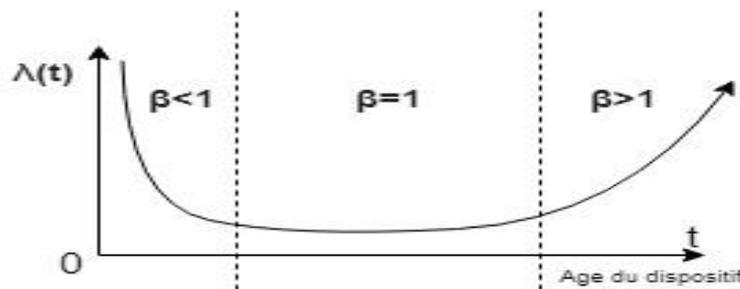


Figure I. 7 : Evolution du taux de défaillance en fonction de  $\beta$ -loi Weibull

- Si  $\beta < 1$ :  $\lambda(t)$  est décroissante donc l'état du système s'améliore, il est dans sa période de jeunesse.
- Si  $\beta > 1$ :  $\lambda(t)$  est croissante donc l'état du système se dégrade, il est dans sa période de vieillesse.

- Si  $\beta = 1$ :  $\lambda(t)$  est constante on retrouve la loi exponentielle qui est un cas particulier de la Weibull, le système quant à lui est dans sa période de vie utile

## I-9 Modèle d'efficacité de maintenance

Dans le but d'assurer le bon fonctionnement des systèmes industriels durant toute leurs durée de vie, des actions de maintenance (préventive et corrective) sont effectuées, la sûreté de fonctionnement des systèmes dépend de l'efficacité des actions de maintenance effectuées [6].

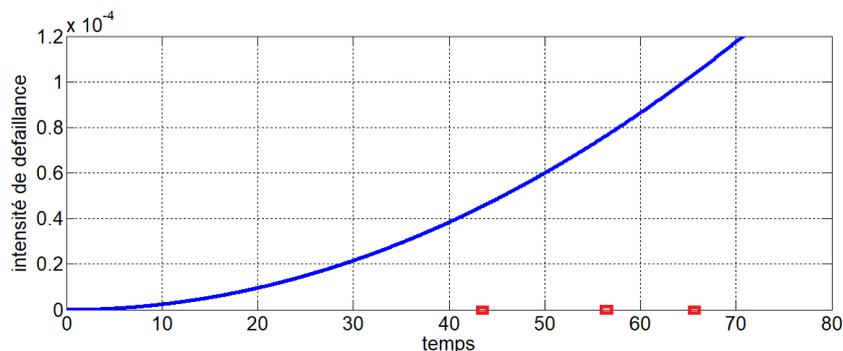
### I-9-1 Modèles de base

#### I-9-1-1 Modèle de maintenance minimale (ABAO)

Le modèle de maintenance minimale considère que l'effet de la maintenance sur le système est nul, il remet ce dernier à l'état ou il était avant l'intervention de la maintenance, le système après l'action de maintenance est aussi mauvais que vieux (As Bad As Old) en anglais [6].

La fonction du taux de défaillance dans le cas d'une maintenance ABAO est donnée par la formule (1.13) où  $\lambda_0(t)$  représente la fonction du taux de défaillance avant d'effectuer une intervention de maintenance [6].

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) \quad (1.12)$$



**Figure I. 8 : Intensité de défaillance dans le cas de la maintenance ABAO.**

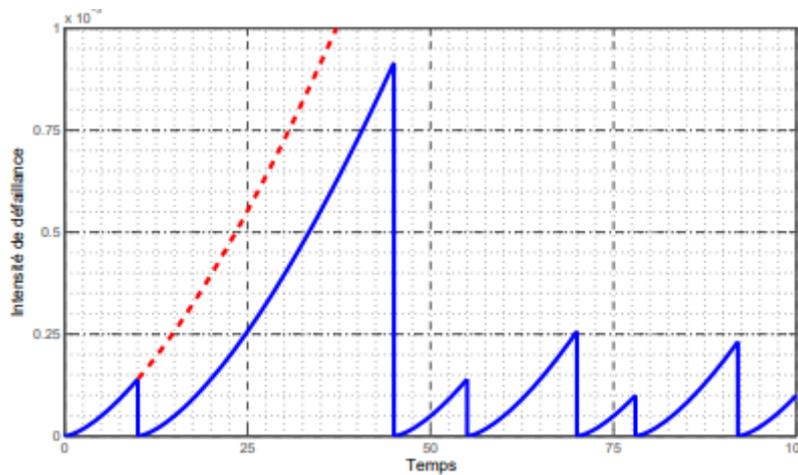
La figure 1.8 représente l'allure de l'intensité de défaillance dans le cas d'une maintenance ABAO les carrés sur l'axe des abscisses représentent les instants des actions de maintenance.

**I-9-1-2 Modèle de maintenance parfaite(AGAN)**

Le modèle de maintenance parfaite considère que les interventions de maintenance remettent le système a son état neuf, le système après une action de maintenance est dit aussi bon que neuf (As Good As New) en anglais [6].

La fonction du taux de défaillance dans le cas d'une maintenance AGAN est donnée dans la formule (1.13) où  $\lambda_0(t)$  représente la fonction du taux de défaillance avant l'intervention de maintenance et  $T_i$  les instants d'interventions de maintenance [6].

$$\lambda(t) = \lambda_0(t - T_i) \tag{1.13}$$



**Figure I. 9 : Intensité de défaillance dans le cas d'une maintenance AGAN**

La figure 1.9 représente l'allure de l'intensité de défaillance dans le cas d'une maintenance AGAN les instants d'intervention de maintenance correspondent aux sauts d'intensité de défaillance.

**I-9-2 Modèle de maintenance imparfaite**

Lorsque des actions de maintenance sont effectuées sur les systèmes il est presque impossible que leurs effets correspondent à celui des modèles de base, ceci est dû à la complexité des systèmes actuels, en effet lors des interventions de maintenance le système subi des remplacements d'un ou plusieurs composants donc son état ne peut être ni identique à celui d'avant, ni dans son état neuf. On peut donc dire que le système est dans un état « meilleur que vieux » [6].

**I-9-2-1 Modèles de réduction d'intensité de défaillance**

Ce modèle considère que l'effet de la maintenance sur le système est de réduire l'intensité de défaillance de façon qu'elle soit comprise entre l'effet d'une maintenance ABAO et l'effet d'une maintenance AGAN, cette classe de modèle peut être divisée en deux sous-classes :

**Modèle de réduction arithmétique d'intensité de défaillance** après une action de maintenance la courbe d'intensité de défaillance repart d'un point inférieur à celui juste avant l'action de maintenance sans affecter l'allure de la courbe d'intensité de défaillance (parallèle à la courbe d'intensité de défaillance initial) [6].

Son expression mathématique s'écrit :

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} - \delta \lambda_{i-1} \quad (1.14)$$

Pour  $0 \leq \delta \leq 1$

La fonction d'intensité de défaillance s'écrit donc :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) - \sum_{i=1}^n \delta_n \quad (1.15)$$

Tel que  $n$  est le nombre d'intervention de maintenance

**Modèle de réduction géométrique d'intensité de défaillance** après l'action de maintenance la courbe d'intensité de défaillance est affecter par l'action de maintenance, ainsi après l'intervention de maintenance la courbe d'intensité de défaillance repart d'un point inférieur à celui juste avant mais avec une allure différente du courbe initial [6].

La fonction d'intensité de défaillance de ce model s'écrit :

$$\lambda(t) = \alpha^n \lambda_0(t) \quad (1.16)$$

Pour  $0 < \alpha < 1$

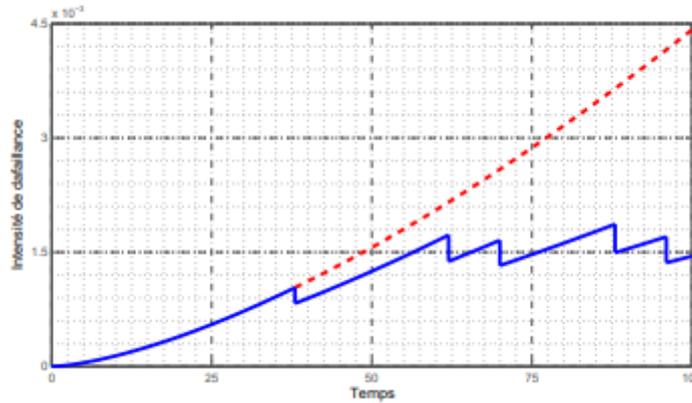


Figure I. 10 : Modèle de réduction géométrique d'intensité de défaillance.

### I-9-2-2 Modèle de réduction d'âge virtuel

Ce modèle consiste à réduire l'âge du système qui est égal à  $t$  avant l'intervention de maintenance à  $t / \Delta$  après l'intervention de maintenance, où  $\Delta$  est le facteur de réduction d'âge. Après la  $i^{ème}$  actions de maintenance, le système se comporte comme un système neuf qui aurait fonctionné une durée  $A_i$  sans tomber en panne,  $A_i$  est considéré comme étant l'âge virtuel du système après la  $i^{ème}$  actions de maintenance [6].

La formule de la fonction d'intensité de défaillance après la  $i^{ème}$  action de maintenance est :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t - T_i + A_i) \tag{1.17}$$

Pour  $T_i < t < T_{i+1}$

### I-9-2-3 Modèle hybride

Comme leur nom l'indique les modèles hybrides sont une combinaison entre les deux classes de réduction d'intensité de défaillance malgré leur différente hypothèse en effet après une intervention de maintenance, l'effet de cette dernière permet de réduire l'âge virtuel mais la courbe d'intensité de défaillance n'est pas parallèle à celle avant l'intervention ce qui nous amène à dire que le modèle hybride est une combinaison entre le modèle de réduction d'âge virtuel et le modèle de réduction géométrique d'intensité de défaillance [6].

Après la  $i^{ème}$  actions de maintenance la formule d'intensité de défaillance s'écrit :

$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0(t - bT_i) \tag{1.18}$$

Tel que :  $T_i < t < T_{i+1}$ ,  $0 < b < 1$  et  $\alpha > 1$

La figure 1.11 montre l'évolution de la courbe d'intensité de défaillance en variant le  $\alpha$

- ✓  $\alpha > 1$  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 réduction géométrique d'intensité de défaillance.
- ✓  $0 < \alpha < 1$  et  $b = 0$  : modèle de réduction géométrique d'intensité de défaillance.
- ✓  $\alpha = 0$  et  $0 < b < 1$  : modèle de réduction proportionnelle de l'âge virtuel.

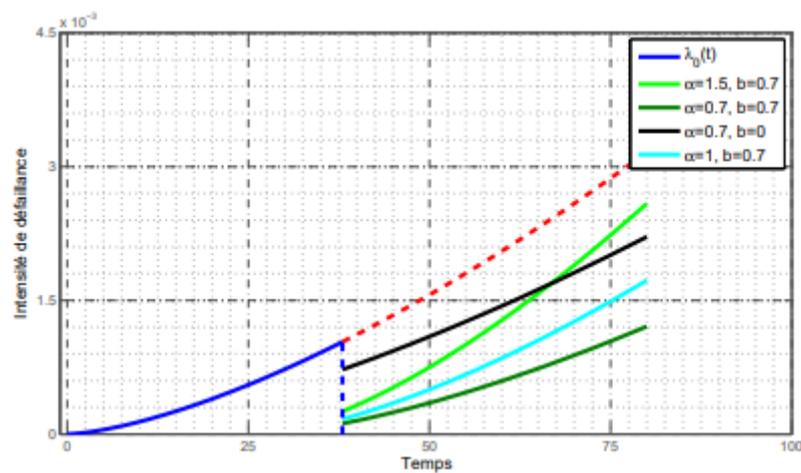


Figure I. 11 : Intensité de défaillance dans le modèle hybride.

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons défini la maintenance, les principales lois de probabilités utilisées en fiabilité.

Nous avons conclu que ces notions sont fortement impliquées durant toute la période de vie des équipements ce qui implique qu'une bonne connaissance de ses dernières nous permettra d'optimiser le rendement des biens.

Nous avons revu les configurations des systèmes, les modèles de base de la maintenance ainsi que les modèles de maintenance imparfaite.

Nous concluons que chaque modèle d'efficacité de maintenance est une hypothèse ce qui nous donne un large choix pour modéliser la maintenance.

Dans le deuxième chapitre nous verrons les méthodes classiques d'évaluation de la fiabilité des systèmes complexes de manière générale, on mettra l'accent sur l'évaluation de la fiabilité des systèmes complexes avec les réseaux bayésiens.

## **Chapitre II**

# **Evaluation de la fiabilité des systèmes multi-composants**

## II-1 Introduction

L'évolution industrielle a fait que les systèmes sont devenus de plus en plus complexe, cela a poussé les chercheurs à développer de nouvelles méthodes pour l'évaluation de la fiabilité.

Dans ce chapitre nous verrons en premier lieu les méthodes classiques d'estimations de la fiabilité des systèmes complexes, par la suite nous allons détailler la méthode d'estimation de la fiabilité par les réseaux bayésiens.

## II-2 Méthodes d'évaluation de la fiabilité des systèmes complexes

Les méthodes classiques d'estimation de la fiabilité sont généralement les arbres de défaillances, chaîne de Markov et les réseaux de Petri stochastiques.

### II-2-1 Arbre de défaillance

Appelé aussi arbre de causes ou arbres de fautes de l'anglais *fault tree* est une technique qui représente les causes d'un évènement indésirable de manière arborescente en utilisant des portes logique (portes « ET » et « OU »), la structure d'un arbre de défaillance s'obtient en partant de l'évènement indésirable vers les évènements élémentaires [7].

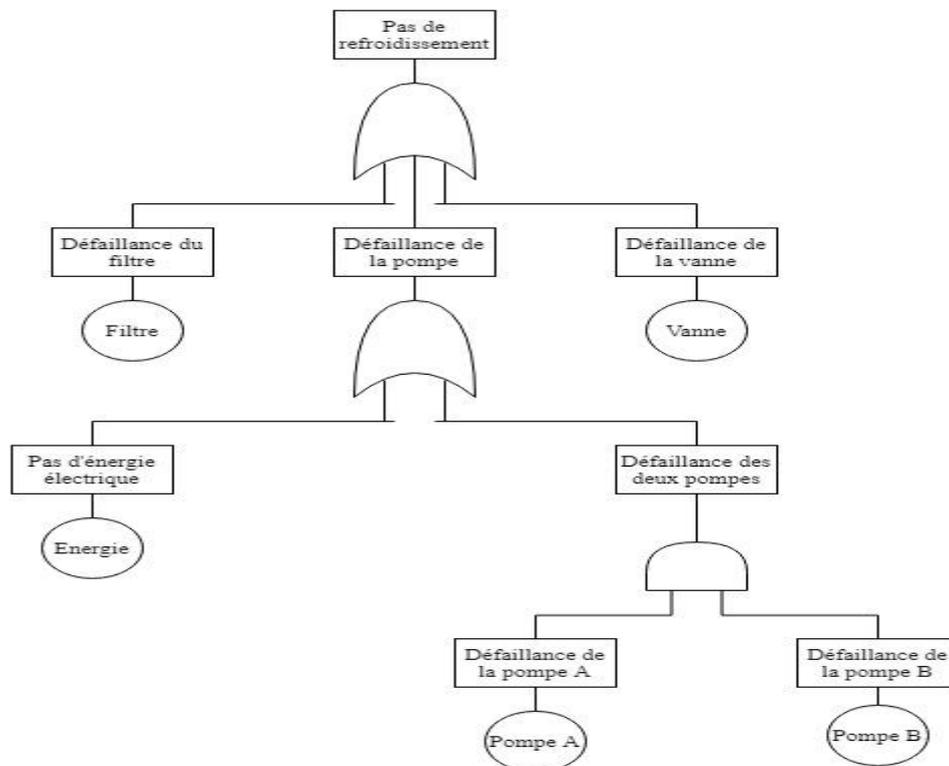


Figure II. 1 : Exemple d'un Arbre de défaillance.

### II-2-2 Chaîne de Markov

Les chaînes de Markov sont l'une des méthodes les plus utilisées en sûreté de fonctionnement elle permet d'avoir une analyse exacte des probabilités de défaillance et d'utiliser des variables multi-état.

Une chaîne de Markov dans un espace fini  $E$  est un processus stochastique à temps discret qui bénéficie de la propriété de Markov. Cette propriété signifie que si l'état du système à l'instant présent est connu, la prédiction de l'avenir ne dépend plus de son passé mais juste de l'instant présent d'où la définition suivante :

« La chaîne  $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une chaîne de Markov dans  $E$  si, pour tout  $x_0, \dots, x_n$  dans  $E$  avec  $P(X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_0 = x_0)$ , nous avons :

$$P(X_n = x_n | X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_0 = x_0) = P(X_n = x_n | X_{n-1} = x_{n-1}) \quad (2.1)$$

L'équation 2.1 représente la propriété de Markov [4].

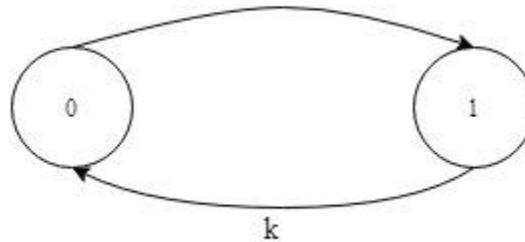


Figure II. 2 : Chaîne de Markov à deux états

### II-2-3 Réseaux de Petri stochastique

C'est l'une des méthodes traditionnelles de modélisation de la maintenance, elle est basée sur des procédures de simulation telles que la méthode de Monte Carlo, elle est en forme de graphe orienté avec deux type de nœuds (des places et des transitions) et d'arc orienté :

- Les places sont représentées par des cercles.
- Les transitions sont représentées par des rectangles.
- Les arcs sont représentés par des flèches.

Son avantage réside dans le fait que c'est possible d'analyser le fonctionnement d'un système avec ou sans présence de défaillance, l'un des inconvénients de cette méthode et le temps de simulation qui reste considérable [4].

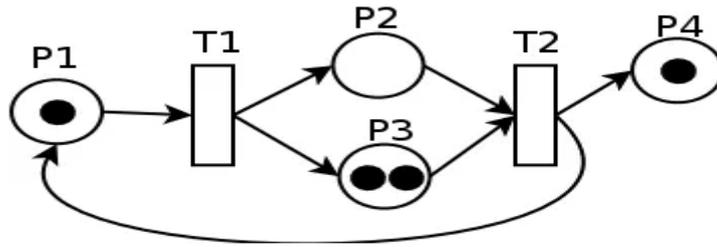


Figure II. 3 : Schéma d'un RdP

### II-3 Les réseaux bayésien

Les réseaux bayésiens sont actuellement une des techniques les plus utilisées dans l'intelligence artificielle, leurs utilisations se sont montrés très efficace dans plusieurs domaines tel que la médecine, la métrologie...etc. Ceci a poussé les experts en maintenance à les utiliser en sureté de fonctionnement.

#### II-3-1 Définition

Un réseau bayésien est un graph dans lequel les nœuds représentent des variables aléatoires, et les arcs les influences entre ses variables. Nous associons la variable aléatoire  $X$  à ses différentes modalités ( $X = x_1, X = x_2, \dots, X = x_n$ ). Quant aux arcs, ce sont les relations de causalité qui peuvent être à caractère déterministe ou probabiliste. Pour un arc reliant le fait A au fait B, il y aura une pondération qui sera la probabilité conditionnelle notée  $P(A/B)$ . De manière générale, les réseaux bayésiens sont donc des graphes orientés et essentiellement sans circuit, c'est-à-dire sans boucles. D'où l'appellation DAGs (DirectedAcyclic Graphs) [8].

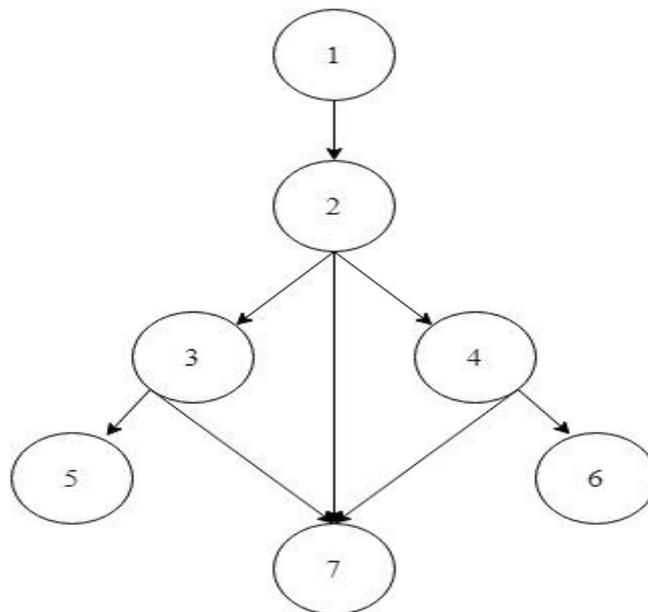


Figure II. 4 : Exemple d'un réseau bayésien.

### II-3-2 Théorème de Bayes

La théorie des réseaux bayésiens est issue des travaux de Thomas Bayes (1702-1761).

$$P(A/B) = \frac{P(B/A)P(A)}{P(B)} \quad (2.2)$$

### II-3-3 Type des réseaux bayésiens

#### II-3-3-1 Réseaux bayésiens discrets [8]

Un réseau bayésien discret  $N = (X, G, P)$  consiste en :

- Un DAG  $G = (V, E)$  avec des nœuds et  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  des liens orientés  $E$ .
- Un ensemble de variables aléatoires discrètes,  $X$  représentées par les nœuds du graphe.
- Un ensemble de distributions de probabilité  $P$  contenant une distribution  $P(X_v | X_{pa(v)})$  pour chaque variable aléatoire  $X_v \in X$ .

#### II-3-3-2 Réseau bayésien continu [8]

Un réseau Bayésien continu  $N = (X, G, P)$  consiste en :

- Un DAG  $G = (V, E)$  avec des nœuds et  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  des liens orientés  $E$ .
- Un ensemble de variables continues,  $X$ , représentées par les nœuds du graphe.
- Un ensemble de fonctions de densité de probabilité conditionnelle  $P$  contenant une distribution  $P(X_v | X_{pa(v)})$  pour chaque variable aléatoire  $X_v \in X$ .

#### II-3-3-3 Réseau bayésien hybride [8]

Un réseau Bayésien hybride  $H = (X, G, P)$  consiste en :

- Un DAG  $G = (V, E)$  avec des nœuds  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  et des liens orientés  $E$ .
- Un ensemble de variables aléatoires discrètes et continues,  $X$ , représentées par les nœuds du graphe.
- Un ensemble de fonctions de densité et de distribution de probabilité conditionnelle  $P$ , contenant une distribution  $P(X_v | X_{pa(v)})$ , pour chaque variable aléatoire.

#### II-3-3-4 Réseau bayésien orienté objet [8]

Un réseau bayésien orienté objet est utilisé dans le but de réduire la complexité d'un RB ayant un grand nombre de variables, ceci en fusionnant les sous structures répétées

dans un RB.

Ce type de modèle est utilisé pour la modélisation des systèmes complexes.

### **II-3-4 Construction d'un réseau bayésien**

Dans le domaine de la maintenance et la sûreté de fonctionnement, on peut construire un RB à partir des avis des experts et de données de retour d'expérience ou bien à partir d'un arbre de défaillance [4].

#### **II-3-4-1 Construction d'un RB à partir des avis d'experts et de donnée de retour d'expérience :**

Cette méthode est basée sur 5 étapes :

1. Définir exactement ce qu'il faut inclure dans le modèle à construire.
2. Sélectionner les variables nécessaires à inclure dans le modèle définir les modalités et le rang des variables discrètes et continue.
3. Créer des tables de probabilité pour les nœuds racine et les tables de probabilité conditionnelle pour les autres nœuds (ses valeurs doivent être comprise entre 0 et 1).
4. Définir la structure graphique du réseau pour établir les dépendances entre les variables.
5. Vérification du modèle en examinant des scénarios déjà connu.

#### **II-3-4-2 Construction d'un RB à partir d'un arbre de défaillance :**

1. Créer un nœud racine dans le RB pour chaque nœud de l'arbre de défaillance.
2. Attribuer les probabilités aux nœuds racine dans le RB leurs nœuds feuilles correspondants dans l'arbre des défaillances.
3. Créer un nœud dans le RB pour chaque porte logique de l'arbre de défaillance.
4. Le nœud indésirable dans l'arbre de défaillance correspond au nœud à analyser dans le RB.
5. Connecter les nœuds dans le RB de la même façon que les portes logiques sont connectées dans l'arbre de défaillance.
6. Attribuer les tables de probabilités aux nœuds correspondant aux portes logiques.

### II-3-5 Inférence bayésienne [4]

Elle consiste à calculer les probabilités marginales et à les mettre à jour après l'observation d'une variable appelé évidence, on distingue deux types de méthodes :

- Les méthodes d'inférences exactes.
- Les méthodes d'inférences approchées.

Dans notre cas on s'intéresse aux méthodes d'inférences exactes plus précisément la méthode d'arbre de jonction que nous allons utiliser dans notre application cette dernière a été introduite par Lauritzen & Spiegelhalter (1988) et Jensen, Lauritzen & Olssen (1990). Aussi appelé méthode JLE cette méthode est applicable pour toute les structure d'un RB.

### II-3-6 Application Numérique

On considère un système S constitué de trois composants. Afin de voir l'impact de la configuration du système sur le taux de défaillance de ce dernier on prend les trois configurations suivantes :

- Les trois composants sont en série.
- Les trois composants sont en parallèle.
- Les trois composants sont configurés en complexe.

On ce qui concerne les RBs correspondants aux trois configurations nous avons implémenté l'algorithme d'arbre de jonction sous MATLAB muni de « BNT Toolbox » qui est une boîte à outils qui nous permet le calcul des probabilités, La structure du RB généré est représenté dans la figure 2.5, les tables de probabilisées des trois configurations sont représentés dans les tableaux (2.1, 2.2, 2.3)

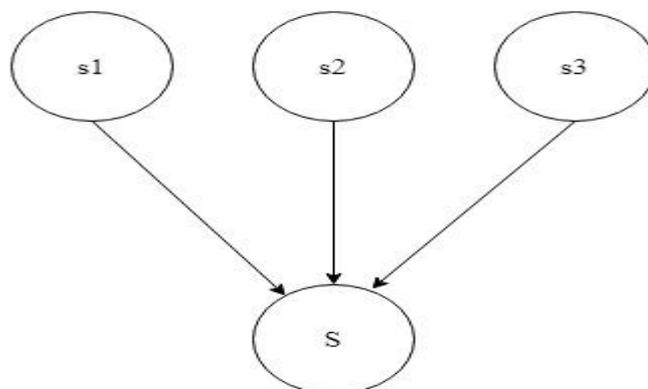


Figure II. 5 : Réseau bayésien du système.

**Tableau II. 1 : Table de probabilités pour la configuration série**

	Pr{S=1}	Pr{S=0}
Pr {s1=1, s2=1, s3=1}	1	0
Pr {s1=1, s2=1, s3=0}	0	1
Pr {s1=1, s2=0, s3=1}	0	1
Pr {s1=1, s2=0, s3=0}	0	1
Pr {s1=0, s2=1, s3=1}	0	1
Pr {s1=0, s2=1, s3=0}	0	1
Pr {s1=0, s2=0, s3=1}	0	1
Pr {s1=0, s2=0, s3=0}	0	1

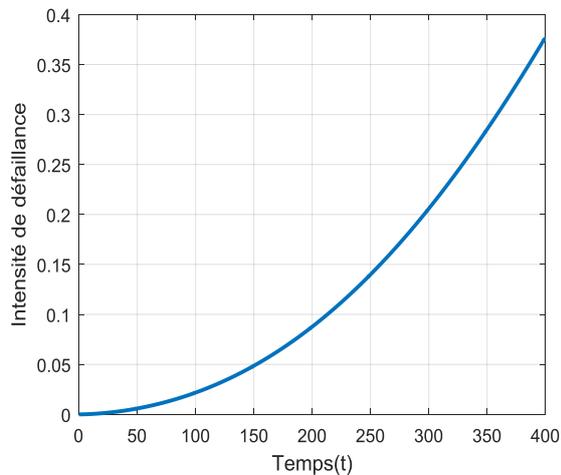
**Tableau II. 2 : Table de probabilités pour la configuration parallèle.**

	Pr{S=1}	Pr{S=1}
Pr {s1=1, s2=1, s3=1}	1	0
Pr {s1=1, s2=1, s3=0}	1	0
Pr {s1=1, s2=0, s3=1}	1	0
Pr {s1=1, s2=0, s3=0}	1	0
Pr {s1=0, s2=1, s3=1}	1	0
Pr {s1=0, s2=1, s3=0}	1	0
Pr {s1=0, s2=0, s3=1}	1	0
Pr {s1=0, s2=0, s3=0}	0	1

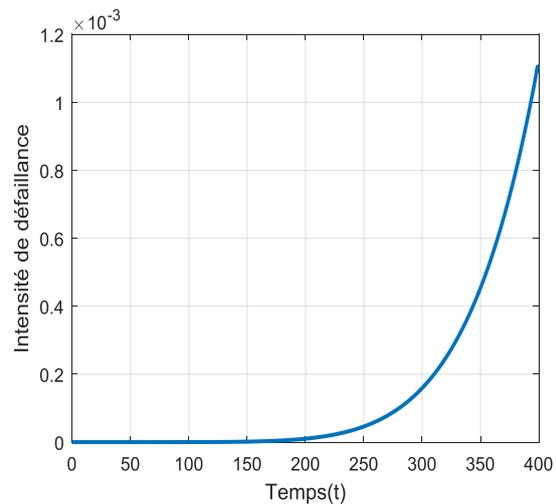
**Tableau II. 3 : Table de probabilités pour la configuration complexe.**

	Pr{S=1}	Pr{S=1}
Pr {s1=1, s2=1, s3=1}	0	1
Pr {s1=1, s2=1, s3=0}	0.3	0.7
Pr {s1=1, s2=0, s3=1}	0.3	0.7
Pr {s1=1, s2=0, s3=0}	0.9	0.1
Pr {s1=0, s2=1, s3=1}	0.55	0.45
Pr {s1=0, s2=1, s3=0}	0.85	0.15
Pr {s1=0, s2=0, s3=1}	0.85	0.15
Pr {s1=0, s2=0, s3=0}	1	0

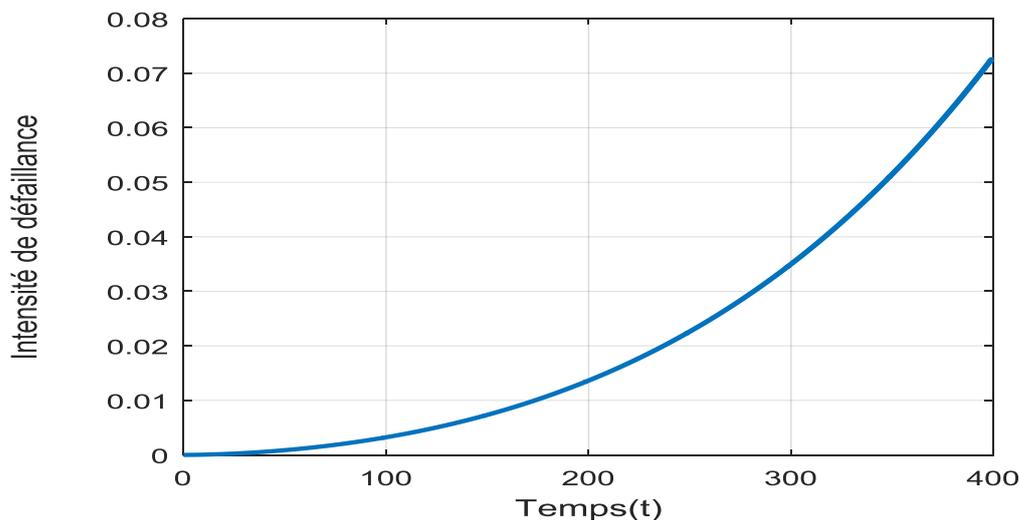
## II-3-6-1 Résultats de la simulation :



**Figure II. 7 : Intensité de défaillance configuration série**



**Figure II. 6 : Intensité de défaillance Configuration parallèle.**



**Figure II. 8 : Intensité de défaillance configuration complexe.**

Les résultats de la simulation sont portés dans les figures (2.5, 2.6, 2.7), ces derniers sont cohérents, pour la configuration série le taux de défaillance est le plus important puisque la défaillance d'un seul composant entraîne la défaillance de tout le système par contre quand il s'agit de la configuration parallèle, le taux de défaillance est le plus faible cela est due au fait que la défaillance du système se produit seulement si tous les composants de ce dernier sont défaillants, pour la configuration complexe le taux de défaillance se situe entre les deux autres configurations ce résultat peut être justifié par le fait que la défaillance d'un seul composant du système n'implique pas la défaillance de tout le système mais elle a une influence sur le système.

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons rappelé les méthodes classiques d'estimations de la fiabilité des systèmes multi-composants, par la suite nous nous sommes penché sur les réseaux bayésiens comme outils de modélisation des systèmes complexes, leurs définitions, les types des réseaux bayésiens et les méthodes d'inférence existantes, à la fin du chapitre nous avons vu une application sur MATLAB, les résultats des simulations et l'interprétation de ces derniers.

Le prochain chapitre sera consacré à la partie pratique où nous allons générer un système sous le logiciel Matlab pour enfin interpréter les différents résultats de simulation obtenus.

## **Chapitre III**

### **Modélisation et estimation des modèles d'efficacités de maintenance d'un système multi-composant**

### III-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons commencer par la présentation des méthodes d'ajustements des courbes obtenues, ensuite nous allons présenter Matlab ainsi que la boîte à outils que nous avons utilisés, par la suite nous verrons les résultats de la simulation pour les différents cas existants ainsi que l'interprétation de ses derniers.

### III-2 Estimation des paramètres de fiabilités et d'efficacités de maintenance

Dans le but d'estimer les paramètres de fiabilité ainsi que ceux de l'efficacité de maintenance nous avons besoin d'ajuster les courbes obtenus pour cela nous avons opté pour la méthode des moindres carrés plus précisément la méthode de régression non linéaire.

#### III-2-1 Méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés est une méthode mathématique qui permet d'ajuster un ensemble d'éléments pouvant avoir des erreurs afin d'avoir les données les plus proche de la réalité, elle sert à comparer des données expérimentales ayant des erreurs à un modèle mathématique pour interpréter ses dernières [9].

#### III-2-2 Régression non linéaire

La régression non linéaire a pour but d'ajuster un modèle non linéaire pour un ensemble de valeurs afin de déterminer la courbe qui se rapproche le plus de celle des données de Y en fonction de x, la fonction est créé par une série d'itérations qui peuvent provenir d'essais et d'erreurs, le but du model est de rendre la somme des carrés aussi petite que possible, la somme des carrés est une mesure qui suit dans quelle mesure les observations de Y varient dans la courbe utilisé pour prédire Y [10].

Le modèle de régression linéaire s'écrit :

$$y_i = f(x_i, \theta_i) + \varepsilon \quad ; \quad i = 1 \dots k \quad (3.1)$$

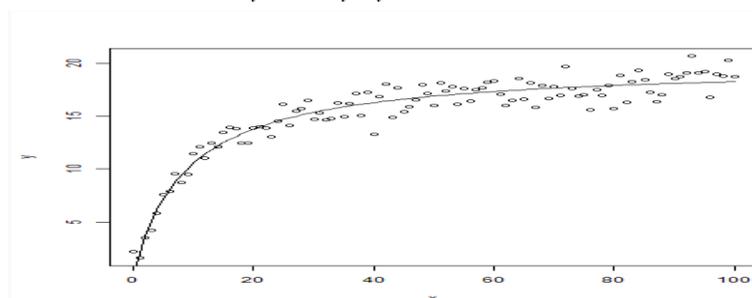


Figure III. 1 : Exemple d'une régression non linéaire.

**III-2-3 Le coefficient de détermination ( $R^2$ )**

Lors de l'établissement de la régression d'une courbe le coefficient de détermination  $R^2$  sert à déterminer le degré de précision de la régression :

- Si le  $R^2=0$  cela signifie que le modèle mathématique ne suit pas la distribution des points
- Si le  $R^2=1$  cela signifie que le modèle mathématique ainsi que les paramètres  $a$  et  $b$  calculé suivent la distribution des points

Cela veut dire qu'à chaque fois que le  $R^2$  est proche de 1 la courbe de régression ainsi que les résultats obtenus sont plus précis.

**III-3 Présentation de l'application**

On considère un système constitué de trois composants qu'on va configurer selon les trois configurations (série, parallèle, complexe), la génération des RBs se fait de la même façon que dans l'application à la fin du 2<sup>ème</sup> chapitre seulement pour cette fois nous allons prendre différent cas, une intervention de maintenance sera effectuer pour les trois composants du système, apres l'obtention des résultats nous procéderons à l'ajustement des différentes courbes obtenues par la méthode de régression non linéaire.

La structure des RBs générés est la même pour les trois configurations la figure 2.5 dans le précédent chapitre montre cette structure la seule différence réside dans les tables probabilités conditionnelles pour chaque configurations ses dernières sont présenté dans les tableaux (2.1, 2.2, 2.3) dans le deuxième chapitre.

**III-4 Implémentation du système**

Dans ce qui suit on va réaliser notre système, pour cela nous avons besoin d'un environnement logiciel, l'application a été développé sous « Matlab R2015b » nous avons aussi utilisé « BNT Toolbox »

- **MATLAB** : Le Matlab est un logiciel de calcul interactif développé par la société Math Works Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique, manipuler les matrices, afficher les courbes et créer des interfaces utilisateurs. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique

d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique.

- **BNT Toolbox** : La Bayes Net Toolbox (BNT) est une bibliothèque des fonctions Matlab, elle permet de définir, apprendre, manipuler et exploiter différents types de modèles graphiques probabilistes.

### III-5 Application Numérique

Dans le but de voir l'impact de l'intervention de maintenance sur le système, un ou plusieurs composants du système sont remplacés, nous allons effectuer à l'instant  $T=200$  en une action de maintenance sur le composant S1 ensuite sur les composants S1 et S2, enfin sur les 3 composants du système, l'effet de la maintenance sur le composant lui-même est une maintenance parfaite mais pour le système elle sera considéré comme étant une maintenance imparfaite, le tableau 3.1 représente les paramètres initiaux de la loi weibull des composants du système.

**Tableau III. 1 : Les paramètres de la loi weibull des composants.**

Composants	S1	S2	S3
Paramètre de forme ( $\beta$ )	$\beta_1 = 2.7$	$\beta_2 = 3.9$	$\beta_3 = 3.2$
Paramètre d'échelle ( $\eta$ )	$\eta_1 = 120$	$\eta_2 = 150$	$\eta_3 = 190$

#### III-5-1 Configuration série

Nous allons effectuer les différentes interventions de maintenance à l'instant  $T=200$  sur les composants pour 3 cas (intervention de maintenance sur S1, intervention de maintenance pour S1 et S2, intervention de maintenance pour tous les composants).

III-5-1-1 Résultat de la simulation

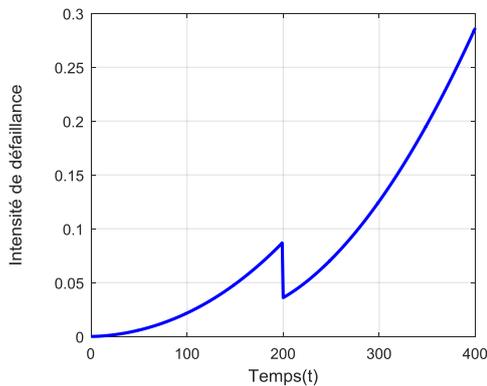


Figure III. 3 : Intensité de défaillance avec Maintenance S1

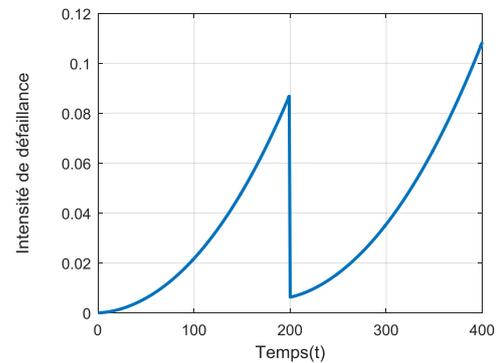


Figure III. 2 : Intensité de défaillance avec Maintenance S1 et S2.

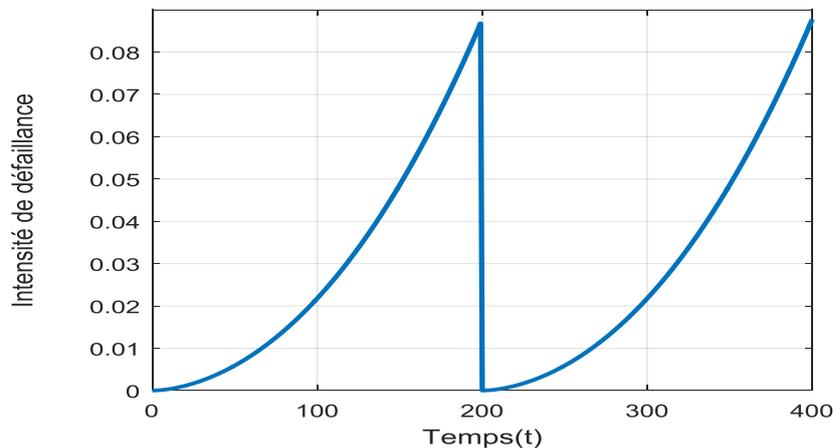


Figure III. 4 : Intensité de défaillance après maintenance sur  $S_1, S_2$  et  $S_3$ .

III-5-1-2 Interprétation des résultats de la simulation

A  $T=200$ , nous effectuons une action de maintenance pour le système lorsque les composants sont configurés en série. La figure 3.2 montre les résultats quand l'intervention de maintenance concerne seulement le composant  $S_1$ , la figure 3.3 quand l'action de maintenance concerne les composants  $S_1$  et  $S_2$  enfin la figure 3.4 montre les résultats lorsque tous les composants ont subi une intervention de maintenance. On remarque une diminution de l'intensité de défaillance à chaque fois que le nombre de composants ayant subi une intervention de maintenance augmente cela est due à la configuration série où le taux de défaillance représente la somme des taux de défaillance des composants.

III-5-2 Configuration parallèle

Nous allons effectuer les différentes interventions de maintenance à l'instant  $T=200$  sur les composants pour 3 cas (intervention de maintenance sur S1, intervention de maintenance pour S1 et S2, intervention de maintenance pour tous les composants).

III-5-2-1 Résultats de la simulation

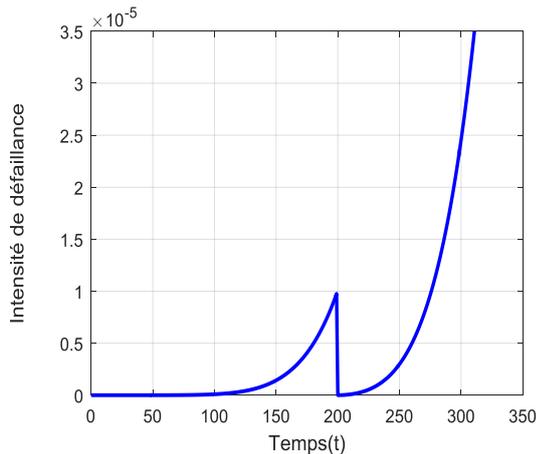


Figure III. 6 : Intensité de défaillance après Maintenance sur S1.

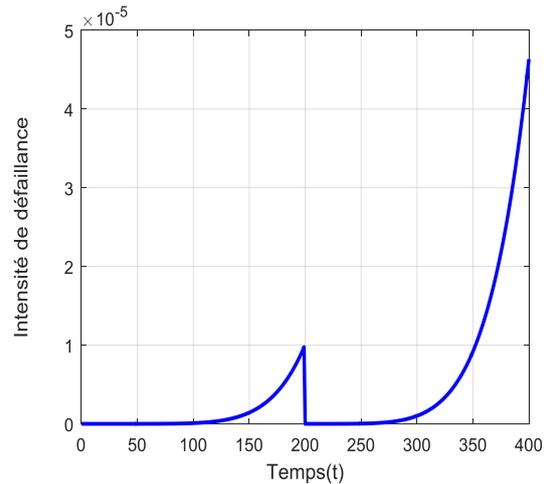


Figure III. 5 : Intensité de défaillance après Maintenance sur S1 et S2.

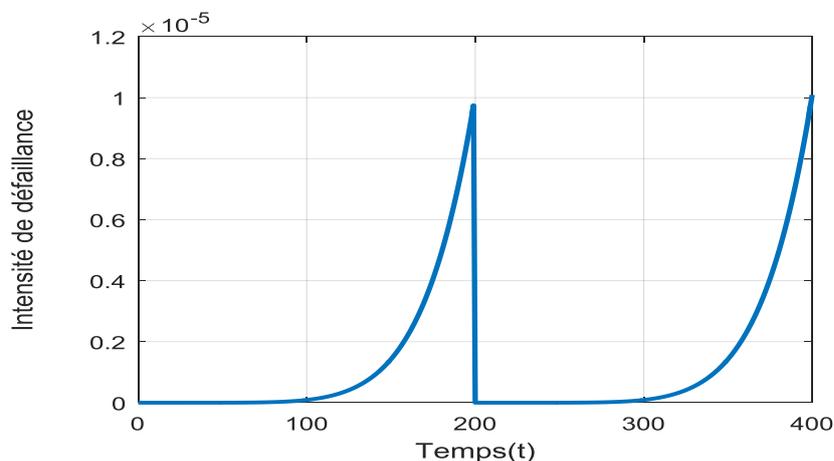


Figure III. 7 : Intensité de défaillance après maintenance sur  $S_1, S_2$  et  $S_3$

III-5-2-2 Interprétation des résultats

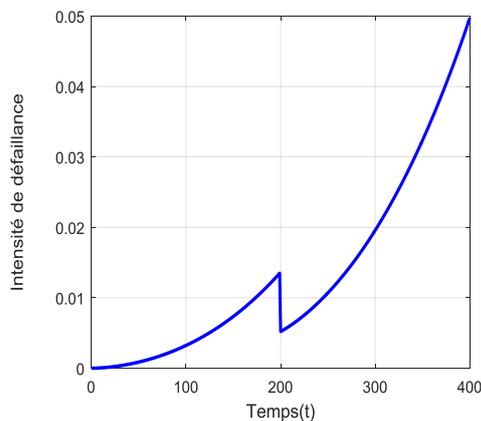
À  $T=200$ , nous effectuons une action de maintenance pour le système lorsque les composants sont configurés en parallèle. La figure 3.5 montre les résultats quand l'intervention de maintenance concerne seulement le composant s1, la figure 3.6 quand l'action de

maintenance concerne les composants S1 et S2, enfin la figure 3.7 montre les résultats lorsque tout les composants ont subi une intervention de maintenance. On remarque que si seulement un composant ai subi une intervention de maintenance l'intensité de défaillance s'annule cela est dû à la configuration des composants de façon parallèle où les composants sont indépendants, il suffit qu'un seul composant soit en marche pour que le système fonctionne.

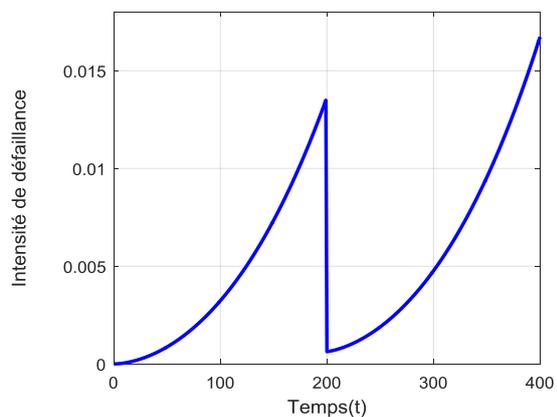
**III-5-3 Configuration complexe**

Nous allons effectuer les différentes interventions de maintenance à l'instant T=200 sur les composants pour 3 cas (intervention de maintenance sur S1, intervention de maintenance pour S1 et S2, intervention de maintenance pour tous les composants).

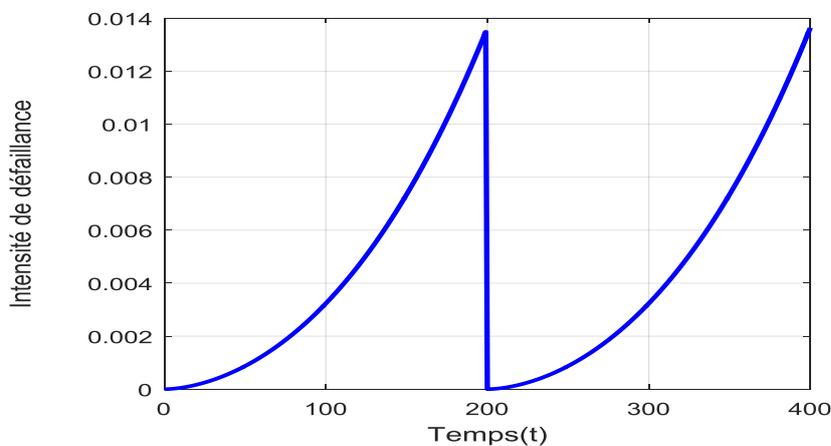
**III-5-3-1 Résultats de la simulation**



**Figure III. 8 : Intensité de défaillance après Maintenance sur S1.**



**Figure III. 9 : Intensité de défaillance après Maintenance sur S1 et S2.**



**Figure III. 10 : Intensité de défaillance après maintenance sur S1, S2 et S3.**

### III-5-3-2 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus pour le cas de la configuration complexe on le même comportement que ceux de la configuration série ceci peut être justifié par le fait que lors de l'établissement de la table des probabilités du système complexe, la défaillance d'un composant du système n'implique pas la défaillance de tout le système on peut déduire alors le cas contraire est vrai où le remplacement d'un seul composant du système ne remet pas l'intensité de défaillance à zéro.

### III-6 Ajustement des paramètres de weibull

Dans cette partie de l'application nous allons procéder à l'ajustement des courbes obtenues dans la section précédente pour trouver les paramètres  $\beta_0$  et  $\eta_0$  du système avant l'intervention de maintenance pour les trois configurations, le tableau 3.2 présente les paramètres initiaux pour chaque configuration.

**Tableau III. 2 : Paramètre initiaux pour les trois configurations.**

	$\beta_0$	$\eta_0$
Configuration série	2.999	111.3
Configuration parallèle.	5.5	1016
Configuration complexe.	3.062	208.7

### III-7 Ajustement des paramètres d'efficacité de maintenance

Dans cette partie de l'application nous allons estimer les paramètres d'efficacité de maintenance à partir des paramètres initiaux obtenus précédemment selon les modèles d'efficacités suivant :

- ✓ Réduction géométrique d'intensité :

$$\lambda_1(t) = \alpha\lambda_0(t) \quad (3.1)$$

- ✓ Réduction proportionnelle d'intensité :

$$\lambda_1(t) = \lambda_0(t) - \delta\lambda_0(t) \quad (3.2)$$

- ✓ Réduction proportionnelle d'âge virtuel :

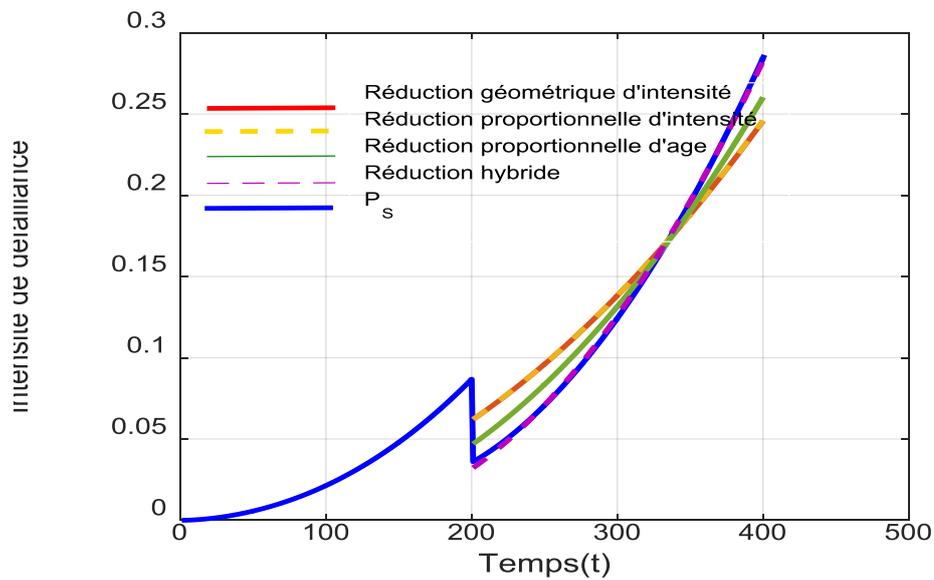
$$\lambda_1(t) = \lambda_0(t - bT) \quad (3.3)$$

✓ Réduction hybride :

$$\lambda_1(t) = \alpha * \lambda_0(t - bT) \tag{3.4}$$

### III-7-1 Configuration série

Pour la configuration série nous avons ajusté la courbe d'intensité de défaillance de la figure 3.2, le cas de maintenance du composant S1, les résultats de la simulation sont portés dans le tableau 3.3.



**Figure III. 11 : Ajustement des paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration série avec intervention de maintenance sur S1.**

**Tableau III. 3 : Paramètres des modèles de maintenance imparfaite pour la configuration série.**

Classe de maintenance imparfaite	Modèle	Paramètres	R <sup>2</sup>
Réduction géométrique d'intensité	$\lambda_1(t) = \alpha \lambda_0(t)$	$\alpha = 7077$	0.9164
Réduction proportionnelle d'intensité	$\lambda_1(t) = \lambda_0(t) - \delta \lambda_0(t)$	$\delta = 0.2923$	0.9164
Réduction proportionnelle d'âge	$\lambda_1(t) = \lambda_0(t - bT)$	$b = 0.2703$	0.9753
Réduction hybride	$\lambda_1(t) = \alpha * \lambda_0(t - bT)$	$\alpha = 1.441$ $b = 0.4989$	0.9997

**III-7-1-1 Interprétation des résultats**

- ✓ Pour le cas de *réduction géométrique d'intensité de défaillance* représenté en rouge dans la figure 3.11, nous avons obtenu un résultat cohérent en effet la courbe d'intensité de défaillance repart d'un point inférieur à celui avant l'intervention et l'allure est différente par rapport au courbe initial.
- ✓ Pour le cas de *réduction proportionnelle d'intensité de défaillance* représenté en jaune dans la figure 3.11, le résultat obtenu est cohérent puisque la courbe d'intensité de défaillance repart d'un point inférieur à celui avant l'intervention de maintenance et l'allure de la courbe d'intensité de défaillance est parallèle à la courbe initiale.
- ✓ Pour le cas de *réduction proportionnelle d'âge virtuel* représenté en vert dans la figure 3.11, nous avons obtenu un résultat logique en effet la courbe d'intensité de défaillance repart d'un point inférieur à celui avant l'intervention de maintenance ainsi qu'après l'action de maintenance la courbe d'intensité est différente de la courbe initial « âge du système est réduit ».
- ✓ Pour le cas de *réduction hybride* représenté en violet dans la figure 3.11, nous avons obtenu.
- ✓ Nous pouvons dire que les résultats de l'ajustement sont précis pour tous les modèles précédents puisque toutes les valeurs de  $R^2$  sont proches de l'unité.

**III-7-1-2 Choix du modèle**

Le modèle hybride est le plus adéquat puisque le  $R^2=0.9997$  du modèle est le plus proche de l'unité.

III-7-2 Configuration parallèle

Pour la configuration parallèle nous avons ajusté les paramètres de la courbe pour le cas de maintenance des composants S1 et S2, les résultats de la simulation sont portés dans le tableau 3.4.

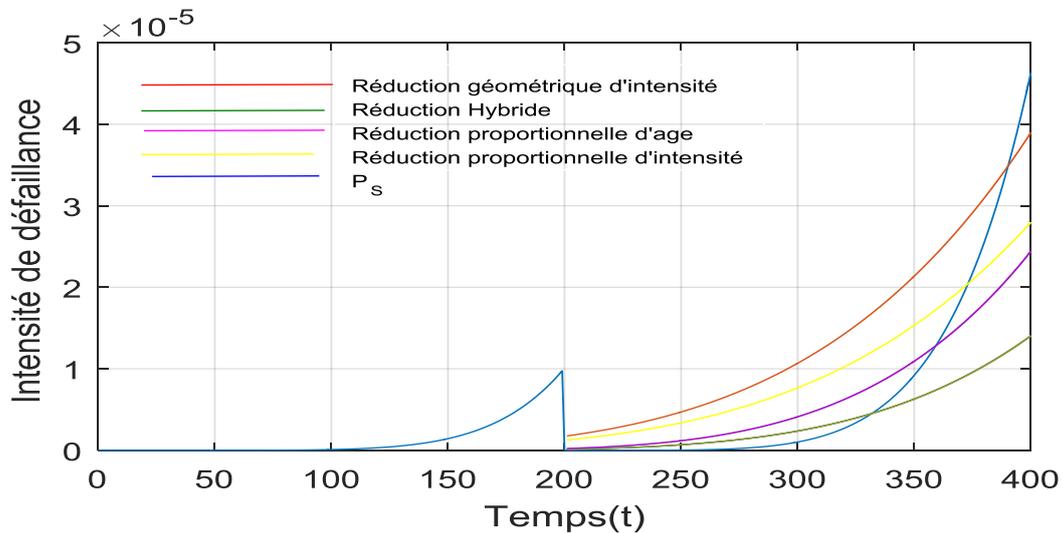


Figure III. 12 : Ajustement des paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration parallèle intervention de maintenance S1 et S2.

Tableau III. 4 : Paramètres des modèles d'efficacité de maintenance pour la configuration parallèle.

Classe de maintenance imparfaite	Modèle	Paramètres	R <sup>2</sup>
Réduction géométrique d'intensité	$\lambda_1(t) = \alpha\lambda_0(t)$	$\alpha = 0.4776$	0.4419
Réduction proportionnelle d'intensité	$\lambda_1(t) = \lambda_0(t) - \delta\lambda_0(t)$	$\delta = 0.6573$	0.7182
Réduction proportionnelle d'âge	$\lambda_1(t) = \lambda_0(t - bT)$	$b = 0.5$	0.7562
Réduction hybride	$\lambda_1(t) = \alpha * \lambda_0(t - bT)$	$\alpha = 0.5753$ $b = 0.4705$	0.3835

III-7-2-1 Interprétations des résultats

- ✓ Pour le cas de *réduction géométrique d'intensité de défaillance* représenté en rouge dans la figure 3.12 le résultat obtenu est logique, en effet la courbe obtenue repart de zéro du

fait qu'on est dans la configuration parallèle où la maintenance d'un seul composant suffit pour annuler l'intensité de défaillance on a aussi l'allure de la courbe d'intensité de défaillance est différente de celle du courbe initial.

- ✓ Pour le cas de *réduction proportionnelle d'intensité de défaillance* représenté en jaune dans la figure 3.12, le résultat obtenu est cohérent puisque la courbe d'intensité de défaillance repart d'un point inférieur à celui avant l'intervention de maintenance.
- ✓ Pour le cas de *réduction proportionnelle d'âge virtuel* représenté en violet dans la figure 3.12, on a obtenu un résultat logique en effet la courbe d'intensité de défaillance repart de zéro du fait que les composants sont configurés en parallèle, l'allure du courbe obtenu n'a pas la même allure que la courbe initiale ce qui veut dire que l'âge du système est réduit.
- ✓ Pour le cas de *réduction hybride* représenté en vert dans la figure 3.12, la courbe d'intensité de défaillance repart de zéro, cela est justifié par le fait que les composants sont configurés en parallèle, l'allure de la courbe montre qu'elle n'est pas parallèle à la courbe initiale et l'âge virtuel est réduit.
- ✓ Les résultats d'ajustement sont peu précis pour le modèle de réduction géométrique et le modèle hybride, puisque les valeurs du  $R^2$  sont respectivement 0.4419 et 0.3835 cela est dû à la méthode de régression qui n'est pas adéquate

### III-7-2-2 Choix du modèle

Pour la configuration parallèle le modèle le plus adéquat est le modèle de réduction proportionnelle d'âge du fait que ce dernier a le  $R^2$  le plus proche de l'unité comparé aux autres modèles.

### III-7-3 Configuration complexe

Pour la configuration complexe nous avons pris le cas de maintenance du composant S1, la maintenance des composants S1 et S2, ainsi que la maintenance des composants S1, S2, S3, les résultats de la simulation sont portés dans les tableaux (3.5, 3.6, 3.7).

III-7-3-1 Intervention de maintenance S1 :

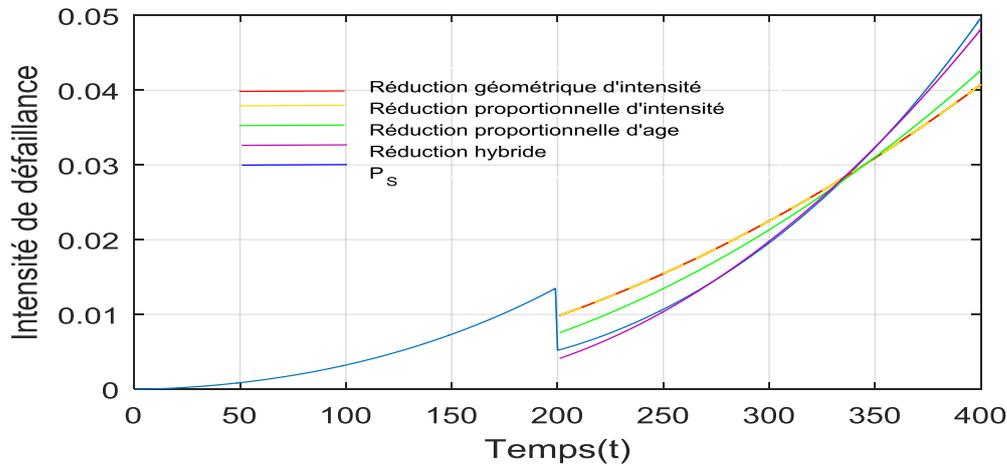


Figure III. 13 : Ajustement des paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1.

Tableau III. 5 : Paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1

Classe de maintenance imparfaite	Modèle	Paramètres	R <sup>2</sup>
Réduction géométrique d'intensité	$\lambda_1(t) = \alpha\lambda_0(t)$	$\alpha = 0.7264$	0.8921
Réduction proportionnelle d'intensité	$\lambda_1(t) = \lambda_0(t) - \delta\lambda_0(t)$	$\delta = 0.2736$	0.8921
Réduction proportionnelle d'âge	$\lambda_1(t) = \lambda_0(t - bT)$	$b = 0.2488$	0.9527
Réduction hybride	$\lambda_1(t) = \alpha * \lambda_0(t - bT)$	$\alpha = 1.718$ $b = 0.5716$	0.9985

III-7-3-1-1 Interprétations des résultats :

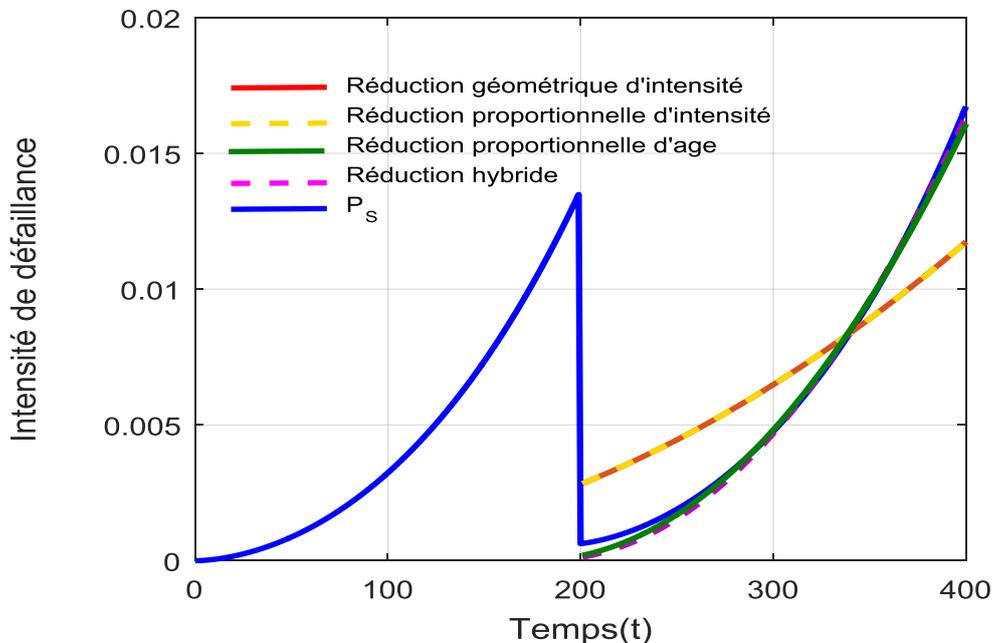
- ✓ Pour le cas de *réduction géométrique d'intensité de défaillance* représenté en rouge dans la figure 3.13, la courbe d'intensité de défaillance repart d'un point inférieur à celui avant l'intervention et l'allure est différente par rapport à la courbe initiale ce qui veut dire que le résultat est cohérent.

- ✓ La courbe d'intensité de défaillance du modèle de *réduction géométrique et proportionnelle d'intensité* de défaillance sont identiques du fait que la valeur d' $\alpha$  et  $\sigma$  est la même, ce qui nous donne le même résultat
- ✓ La courbe de *réduction proportionnelle d'âge virtuel* représenté en vert repart d'un point inférieur à celui d'avant et pas avec la même allure que la courbe initiale d'où le résultat est satisfaisant
- ✓ La courbe de *réduction hybride* représentée en violet dans la figure 3.13 repart d'un point inférieur à celui avant l'intervention de maintenance et l'allure n'est pas parallèle à la courbe initiale du fait que la valeur d' $\alpha$  est supérieure à 1 donc c'est un modèle hybride avec augmentation de la dégradation.
- ✓ Les résultats de l'ajustement sont précis puisque la valeur du  $R^2$  de tous les modèles est proche de l'unité.

### III-7-3-1-2 Choix du modèle

Le modèle hybride est le plus adéquat pour la configuration complexe avec intervention de maintenance sur un seul composant puisque le  $R^2=0.9985$ .

### III-7-3-2 Intervention de maintenance S1, S2 :



**Figure III. 14 : Ajustement des paramètres de weibull pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1 et S2.**

Tableau III. 6 : Paramètres des modèles de maintenance imparfaite pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1et S2

Classe de maintenance imparfaite	Modèle	Paramètres	R <sup>2</sup>
Réduction géométrique d'intensité	$\lambda_1(t) = \alpha\lambda_0(t)$	$\alpha = 0.2092$	0.7625
Réduction proportionnelle d'intensité	$\lambda_1(t) = \lambda_0(t) - \delta\lambda_0(t)$	$\delta = 0.7908$	0.7625
Réduction proportionnelle d'âge	$\lambda_1(t) = \lambda_0(t - bT)$	$b = 0.8999$	0.9972
Réduction hybride	$\lambda_1(t) = \alpha * \lambda_0(t - bT)$	$\alpha = 0.9312$ $b = 0.8705$	0.9979

### III-7-3-2-1 Interprétation des résultats

- ✓ La figure 3.14 montre que les courbes d'intensité de défaillance pour le *modèle hybride* et celui de *réduction proportionnelle d'âge virtuel* sont identiques, ceci peut être justifié par le fait que les valeurs de  $\alpha = 0.9312$  et  $b = 0.8705$  puisque pour ce cas de figure ou  $\alpha$  est compris entre 0 et 1, l'effet de la maintenance sera double « réduction de l'intensité de défaillance et de l'âge virtuel ».
- ✓ La figure 3.14 montre que les courbes de réduction d'intensité de défaillance (géométrique est proportionnelle) sont identiques ceci est peut-être expliqué par le fait qu'elles se sont deux classe d'un seul modèle de réduction.
- ✓ Le modèle le plus adéquat pour la configuration complexe est le modèle hybride (le R<sup>2</sup> est plus proche de l'unité).

### III-7-3-2-2 Choix du modèle

Le modèle le plus adéquat pour la configuration complexe est le modèle hybride puisque le R<sup>2</sup> est le plus proche de l'unité.

III-7-3-3 Intervention maintenance S1, S2, S3 :

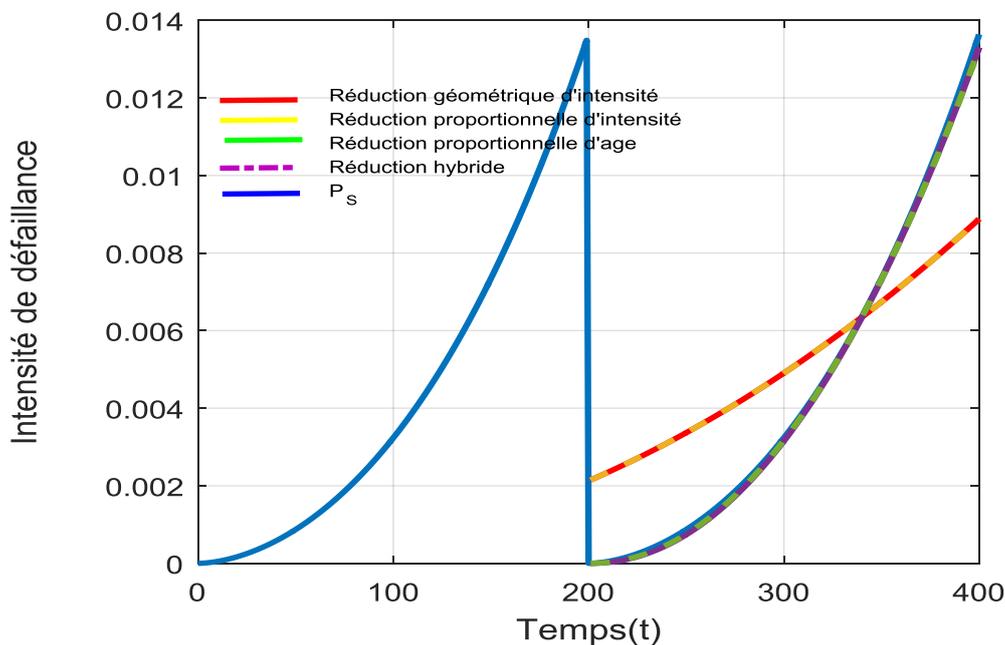


Figure III. 15 : Ajustement des paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1, S2, S3.

Tableau III. 7 : Paramètres d'efficacité de maintenance pour la configuration complexe intervention de maintenance sur S1, S2 et S3.

Classe de maintenance imparfaite	Modèle	Paramètres	R <sup>2</sup>
Réduction géométrique d'intensité	$\lambda_1(t) = \alpha\lambda_0(t)$	$\alpha = 0.1582$	0.6939
Réduction proportionnelle d'intensité	$\lambda_1(t) = \lambda_0(t) - \delta\lambda_0(t)$	$\delta = 0.8418$	0.6939
Réduction proportionnelle d'âge	$\lambda_1(t) = \lambda_0(t - bT)$	$b = 1.005$	0.9997
Réduction hybride	$\lambda_1(t) = \alpha * \lambda_0(t - bT)$	$\alpha = 0.9896$ $b = 1.001$	0.9979

III-7-3-3-1 Interprétation des résultats

- ✓ Nous remarquons que les courbes d'intensité de défaillance pour le modèle hybride et celui de réduction proportionnelle d'âge virtuel sont identiques, ceci peut être justifié par le fait que la valeur de  $\alpha = 0.9896$  comprise entre 0 et 1 donc l'effet de

la maintenance est double « réduction de l'intensité de défaillance et de l'âge virtuel ».

- ✓ La figure 3.15 montre que les courbes de réduction d'intensité de défaillance (géométrique est proportionnelle) sont identiques ceci est peut-être expliqué par le fait qu'elles se sont deux classe d'un seul modèle de réduction

### **III-7-3-3-2 Choix du modèle**

Pour le cas de la configuration complexe avec intervention de maintenance pour les trois composants, le modèle de réduction proportionnelle d'âge virtuel est le plus adéquat du fait que le  $R^2$  est plus proche de l'unité.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons en premier lieu présenté la méthode de régression non linéaire avec laquelle nous avons ajustée nos courbes ainsi que le coefficient de détermination  $R^2$ , ainsi que l'application et l'environnement logiciel avec lequel nous avons travaillé, enfin les différents résultats de simulation et leurs interprétations.

On ce qui concerne le choix des modèles le  $R^2$  nous a permis de choisir Pour chaque configuration un model adéquat

Le modèle hybride peut être adopté pour les configurations série et complexe, puisque le  $R^2$  est proche de l'unité pour ses configurations.

Le modèle de réduction proportionnelle d'âge virtuel est le plus adéquat pour la configuration complexe.

## **Conclusion générale**

L'objectif de ce projet de fin d'étude est de modéliser l'efficacité de maintenance d'un système complexe, pour ce nous avons fait un rappel des généralités sur la maintenance, en effet la définition de la maintenance, sa typologie, la notion de fiabilité, les différentes configurations des systèmes ainsi que quelques modèles d'efficacité de maintenance ont été abordés dans le premier chapitre du présent travail.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les différentes méthodes d'évaluation de la fiabilité des systèmes complexes, nous avons détaillé la méthode d'évaluation de la fiabilité par les RBs puisque c'est la méthode que nous avons utilisée dans ce travail, une application a été présentée à la fin du chapitre.

Dans le dernier chapitre, nous avons commencé l'étude de l'efficacité de maintenance d'un système multi composant pour cela nous avons pris les trois configurations (série, parallèle, complexe), au début nous avons estimé les paramètres de la loi weibull avant l'intervention de maintenance, pour les utiliser afin d'ajuster les courbes obtenues pour enfin choisir le modèle adéquat avec le coefficient de détermination  $R^2$ .

Nous avons conclu que pour la configuration série le modèle le plus précis est le modèle hybride, pour la configuration parallèle, le modèle le plus adéquat est celui de réduction proportionnelle d'âge virtuel, pour la configuration complexe, quand l'intervention de maintenance concerne le composant S1 seulement et quand l'intervention de maintenance concerne S1 et S2 le modèle le plus précis est le modèle hybride, cependant quand l'intervention de maintenance concerne tous les composants du système le modèle le plus adéquat est celui de réduction proportionnelle d'âge virtuel.

Les résultats peuvent nous conduire à porter les recherches sur la possibilité de combinaison de plusieurs modèles d'efficacité de maintenance dans un seul modèle.

## **Références bibliographiques**

### Bibliographie

- [1] AFNOR, FD X 60-000, Maintenance Industrielle-Fonction Maintenance
- [2] Ait Mokhtar Elhassene, Cour Master1 Maintenance Industrielle : « Introduction à la GMAO », Université de Bejaïa, 2020/2021
- [3] Monchy.F et Pichot.C, « Maintenance-méthodes et organisations Dunbod », 2003
- [4] Ait Mokhtar Elhassene, « Optimisation de la sûreté de fonctionnement et de la maintenance des systèmes complexes par les réseaux bayésiens. » thèse de doctorat de l'université A.Mira Bejaia, année 2016
- [5] LAGGOUNE.R cour Master 1 fiabilité des systèmes université A.Mira Bejaia 2019/2020
- [6] AIT MOKHTAR, Elhassene. Cour Master 2 Maintenance Industrielle : « Modèle de maintenance » Université de Bejaia 2020/2021
- [7] Perrine Broy, « évaluation de la sureté des systèmes dynamique hybride complexe Application aux systèmes hydraulique » thèse de doctorat de l'université de technologie de Troyes, année 2014
- [8] Zahra Fatma Zohra, « Utilisation des réseaux bayésien pour le calcul de la fiabilité des système », mémoire de magister de l'université Saad Dahleb Blida, année 2010.
- [9] Jonas Kibala Kuma, « Modèles de régression non linéaires : Éléments de Théorie et pratiques sur Logiciel », Centre de Recherches Economiques et Quantitatives de l'université de Kinshasa, 2019.
- [10] Jean-Luc Chabet, « Gauss et la méthode des moindres carrées », Revue histoire des sciences ,1989

## **Résumé**

Le présent projet de fin d'étude traite la modélisation et l'estimation de l'efficacité de maintenance des systèmes multi-composants, nous avons étudié plusieurs cas de qui nous ont permis de déduire un modèle adéquat pour chaque configuration, les réseaux bayésiens s'avèrent être un outil efficace pour l'optimisation de la fiabilité des systèmes complexes, ce qui nous a poussé à construire notre système à partir d'un réseau bayésien, ce qui nous a permis d'avoir des résultats obtenus sont cohérents pour la plupart des cas étudiés.

## **Abstract**

This dissertation talks about modeling and estimating the maintenance efficiency of multi-component systems, we studied several cases from which allowed us to deduce an adequate model for each configuration. Bayesian networks prove to be an effective tool for optimizing the reliability of complex systems, this is the reason why we built our system from a Bayesian network what allowed us to have a coherent result for the majority of the studied cases.