

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf : ...../2020



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

**Domaine** : Sciences et Technologie

**Filière** : Electromécanique

**Spécialité** : Electromécanique

**Présenté Par** : Guetatlia Mohamed

### Thème

**Amélioration de la sûreté de fonctionnement d'un système mécatronique : 'actionneur intelligent'**

Soutenu le 04/10 /2020

Devant le jury :

|                       |     |                      |
|-----------------------|-----|----------------------|
| Mme. BOUCERREDJ Leila | MCA | Président /Encadreur |
| M. BENLALOUI Idris    | MCB | Examineur principal  |
| Mme. BOUBIDI Assia    | MAA | Examineur            |
| Mme. CHAABI Lilia     | MAA | Examineur            |

**Année Universitaire : 2019/2020**

# Remerciement

---

Nous tenons tout d'abord à remercier DIEU le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre Encadreur Mme **LEILA BOUCERREDJ** pour l'orientation, la confiance et la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu mené au bon port.

Nous présentons nos remerciements pour les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail qui nous a aidé beaucoup et encourage toute à la longue de notre formation.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au chef de département Electrotechnique et Automatique, tous les enseignants, le staff administratif.

Enfin, toute personne avais élaborés de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Et notre section « 2020 »

# Dédicace

---

Je dédie ce modeste travail à la lumière de ma vie, au cœur le plus tendre et le plus doux, à celle qui s'est tellement sacrifiée pour me voir toujours meilleur ma très chère mère

A l'être le plus cher à mon cœur, à celui qui m'a toujours guidée par ses conseils et qui m'a encouragée à poursuivre mes études Mon père

Toute ma famille .Tous mes camarades de classe que j'aime beaucoup A tous ceux qui méconnaissent et dont la compagnie m'a été si agréable sur cette terre qui m'a vu naître.

La mécatronique est définie par l'utilisation simultanée et en étroite symbiose de la mécanique, de l'électronique, de l'informatique,... pour concevoir et produire de produits toujours plus innovants. Leur principal avantage est la flexibilité logicielle dont dispose le concepteur pour implémenter des nouvelles fonctions. Toutefois, ceci a contribué à accroître leur complexité et à diminuer la maîtrise de leurs fiabilités, d'où la nécessité d'effectuer des études de Sûreté de Fonctionnement afin de garantir un bon niveau de sécurité.

L'objectif de ce travail est l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques. Nous avons proposé une méthode dans le but de faire face aux problèmes engendrés par les spécificités de ces systèmes lors de l'étude de la fiabilité. La première partie de la méthode proposée est l'analyse qualitative qui fournit toutes les informations nécessaires sur le fonctionnement et le dysfonctionnement du système. La deuxième partie de la méthodologie est l'analyse quantitative qui permet d'estimer et de quantifier la fiabilité des composants du système mécatronique étudié.

Dans le cas d'application étudié "**actionneur intelligent**", nous avons procédé à une description succincte de la structure du système ainsi que sa décomposition en plusieurs sous-systèmes, cette tâche nous a facilité la compréhension du rôle et de la fonction de chaque composant, nous avons effectué une analyse basée sur l'utilisation des lois probabilistes, qui nous a permis d'analyser et d'évaluer la sûreté de fonctionnement et la fiabilité du système mécatronique étudié.

**Mots-clés:** sûreté de fonctionnement, fiabilité, système mécatronique, loi de fiabilité, méthode de modélisation, simulation.

Mechatronic is defined by the simultaneous use and in close symbiosis of mechanics, electronics, IT, ... to design and produce ever more innovative products. Their main advantage is the software flexibility available to the designer to implement new functions. However, this contributed to increase their complexity and reduce control over their reliability, hence the need to carry out Operational Safety studies in order to guarantee a good level of safety. The objective of this work is the evaluation of the dependability of mechatronic systems. We have proposed a method in order to face the problems generated by the specificities of these systems during the reliability study.

The first part of the proposed method is the qualitative analysis which provides all the necessary information on the operation and malfunction of the system. The second part of the methodology is the quantitative analysis which makes it possible to estimate and quantify the reliability of the components of the studied mechatronic system.

In the case of application studied `` **intelligent actuator** ', we proceeded to a brief description of the structure of the system as well as its decomposition into several subsystems, this task facilitated the understanding of the role and the function of each component, we carried out an analysis based on the use of probabilistic laws, which allowed us to analyze and assess the operational safety and reliability of the mechatronic system studied.

**Keywords:** dependability, reliability, mechatronic system, reliability law, modeling method, simulation.

يعرف الميكاترونيك بأنه الاستخدام المتزامن والتعايش الوثيق للميكانيك، والإلكترونيات، وتكنولوجيا المعلومات، ... لتصميم وإنتاج منتجات أكثر ابتكارًا ، ميزتهم الرئيسية هي مرونة البرامج المتاحة للمصمم لتنفيذ وظائف جديدة. ومع ذلك، فقد يجهاهم ذلك في زيادة تعقيدها وتقليل التحكم في موثوقيتها، و هو ما يدفع إلى إجراء دراسات السلامة التشغيلية بغية ضمان مستوى جيد من السلامة.

الهدف من هذا العمل هو تقييم اعتمادية أنظمة الميكاترونيك ، وقد اقترحنا طريقة للتعامل مع المشكلات الناتجة عن خصوصيات هذه الأنظمة أثناء دراسة الموثوقية. بحيث كان الجزء الأول من الطريقة المقترحة هو التحليل النوعي الذي يوفر جميع المعلومات الضرورية عن تشغيل النظام وعطله ، فيما تمثل الجزء الثاني من المنهجية في التحليل الكمي الذي يجعل من الممكن تقدير وقياس موثوقية مكونات نظام الميكاترونيك المدروس.

في حالة التطبيق المدروس " المشغل الذكي "، قمنا بوصف موجز لهيكل النظام وتحليل عدة أنظمة فرعية منه، وهي المهمة التي سهلت فهم دور ووظيفة كل مكون، من ثم أجرينا تحليلًا يعتمد على استخدام القوانين الاحتمالية، التي سمحت لنا بتحليل وتقييم سلامة التشغيل وموثوقية نظام الميكاترونيك المدروس.

**الكلمات المفتاحية:** الاعتمادية، الموثوقية، نظام الميكاترونيك، قانون الموثوقية، طريقة النمذجة، المحاكاة.

## Table des matières

|                     |    |
|---------------------|----|
| Liste des figures   |    |
| Liste des tableaux  |    |
| Liste des acronymes |    |
| Introduction .....  | 01 |

### **Chapitre 1      La Sûreté de Fonctionnement**

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 1.1 Introduction .....                          | 04 |
| 1.2 Historique.....                             | 04 |
| 1.3 Définition.....                             | 04 |
| 1.4 Le but de la sûreté de fonctionnement.....  | 05 |
| 1.5 Mesures de la sûreté de fonctionnement..... | 05 |
| 1.5.1 Fiabilité .....                           | 05 |
| 1.5.2 Maintenabilité.....                       | 08 |
| 1.5.3 Disponibilité.....                        | 08 |
| 1.5.4 Sécurité.....                             | 09 |
| 1.6 Quelques lois usuelles.....                 | 09 |
| 1.6.1 Loi exponentielle.....                    | 09 |
| 1.6.2 La loi de Weibull.....                    | 10 |
| 1.6.3 Loi gamma.....                            | 12 |
| 1.6.4 Loi Normale.....                          | 13 |
| 1.6.5 Loi Log-Normale.....                      | 16 |
| 1.7 Conclusion.....                             | 17 |

### **Chapitre 2      Méthodes d'analyse de la SdF**

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Introduction .....                                                                           | 19 |
| 2.2 Définition.....                                                                              | 19 |
| 2.3 Principales méthodes.....                                                                    | 20 |
| 2.3.1 Analyse Préliminaire des Dangers (APD).....                                                | 20 |
| 2.3.2 Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets et de leurs Criticité<br>(AMDEC)..... | 22 |
| 2.3.3 Méthode du Diagramme de Succès ou de Fiabilité (MDS ou MDF).....                           | 25 |
| 2.3.4 Méthode de la Table de Vérité (MTV).....                                                   | 27 |

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.5 Méthode de l'Arbre des Causes (MAC).....                | 30 |
| 2.3.6 Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR)..... | 33 |
| 2.3.7 Méthode de l'Arbre des Conséquences (MACQ).....         | 34 |
| 2.3.8 Méthode du Diagramme Causes-Conséquences (MDCC).....    | 36 |
| 2.3.9 Méthode de l'Espace des Etats (MEE).....                | 38 |
| 2.4 Conclusion .....                                          | 39 |

### **Chapitre 3                    Système Mécatronique**

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Introduction.....                                                             | 41 |
| 3.2 Historique.....                                                               | 42 |
| 3.3 Définition.....                                                               | 42 |
| 3.4 Architecture des systèmes mécatroniques.....                                  | 43 |
| 3.5 Domaines d'application.....                                                   | 43 |
| 3.6 Démarche de conception mécatronique.....                                      | 44 |
| 3.6.1 L'ingénierie collaborative.....                                             | 44 |
| 3.6.2 L'ingénierie concourante.....                                               | 45 |
| 3.7 Cycle de développement.....                                                   | 46 |
| 3.7.1 Analyse/Spécification.....                                                  | 47 |
| 3.7.2 Conception.....                                                             | 48 |
| 3.7.3 Réalisation.....                                                            | 48 |
| 3.7.4 Vérification.....                                                           | 48 |
| 3.7.5 Validation.....                                                             | 48 |
| 3.8 Evolution des produits électromécaniques vers des systèmes mécatroniques..... | 49 |
| 3.9 Exemples des systèmes mécatroniques.....                                      | 51 |
| 3.10 Conclusion.....                                                              | 52 |

### **Chapitre 4   Evaluations de la SdF d'un Système actionneur intelligent**

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| 4.1 Introduction.....                          | 55 |
| 4.2. Méthodologie proposée.....                | 55 |
| 4.2.1 Analyses fonctionnelle et organique..... | 55 |
| 4.2.2 Analyse dysfonctionnelle.....            | 56 |
| 4.2.3 Recueils d'informations.....             | 56 |
| 4.2.4 Modélisation qualitative.....            | 56 |



|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 4.2.5 Modélisation dynamique.....                 | 57 |
| 4.2.6 Simulation et analyse des résultats.....    | 57 |
| 4.3. Application sur un système mécatronique..... | 57 |
| 4.3.1 Présentation de système.....                | 57 |
| 4.4. Conclusion.....                              | 63 |
| Conclusion générale .....                         | 64 |
| Bibliographie.....                                | 65 |

## Liste des figures

|              |                                                                                      |    |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 .1: | Fonctionnement d'un équipement .....                                                 | 06 |
| Figure 1.2:  | courbe en baignoire.....                                                             | 07 |
| Figure 1.3:  | Système série .....                                                                  | 07 |
| Figure 1.5:  | Densité de probabilité de la Loi exponentielle .....                                 | 10 |
| Figure 1.6:  | Fonction de répartition de la Loi exponentielle .....                                | 10 |
| Figure 1.7:  | Papier de Weibull.....                                                               | 12 |
| Figure 1.8:  | Densité de probabilité de la loi gamma .....                                         | 13 |
| Figure 1.9:  | Fonction de répartition de la loi gamma .....                                        | 13 |
| Figure 1.10: | densité normal avec $\sigma$ .....                                                   | 14 |
| Figure 1.11: | Densité de probabilité $\mu=0$ .....                                                 | 17 |
| Figure 1.12: | Fonction de répartition $\mu=0$ .....                                                | 17 |
|              |                                                                                      |    |
| Figure 2.1 : | Organisation de la méthode AMDEC .....                                               | 24 |
| Figure 2.2 : | Exemple d'un digramme de fiabilité .....                                             | 25 |
| Figure 2.3 : | MdF d'un système série .....                                                         | 26 |
| Figure 2.4 : | MdF d'un système parallèle .....                                                     | 26 |
| Figure 2.5 : | MdF d'un système k/n .....                                                           | 27 |
| Figure 2.6 : | Démarche à suivre pour construire un arbre de défaillances .....                     | 32 |
| Figure 2.7:  | Démarche de la MCPR .....                                                            | 33 |
| Figure 2.8 : | Schématisation d'un arbre d'événement .....                                          | 36 |
| Figure2.9 :  | Diagramme « causes-conséquences» d'une situation dangereuse .....                    | 37 |
| Figure 2.10: | Diagramme causes-conséquences (Diagramme d'Ishikawa ou des 5M ....                   | 38 |
| Figure 2.11: | Graphe d'état .....                                                                  | 39 |
|              |                                                                                      |    |
| Figure 3.1:  | Diagramme de Venn de la mécatronique .....                                           | 41 |
| Figure 3.2:  | Disciplines d'un système mécatronique .....                                          | 43 |
| Figure 3.3 : | Architecture des systèmes mécatroniques .....                                        | 43 |
| Figure 3.4:  | Les différents domaines d'application des systèmes mécatroniques .....               | 44 |
| Figure 3.5   | Cycle en V .....                                                                     | 47 |
| Figure 3.6 : | Développement historique des systèmes mécaniques, électriques et électroniques ..... | 49 |

|              |                                                                                                        |    |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 3.7 : | Interactions entre les différentes disciplines composant la mécatronique ..                            | 50 |
| Figure 3.8 : | Systèmes mécaniques intégrant l'électronique en interaction avec<br>l'information et la puissance..... | 50 |
| Figure 3.9 : | Exemple de systèmes mécatroniques .....                                                                | 52 |
| Figure 4.1:  | Actionneur Intelligent .....                                                                           | 58 |
| Figure 4.2 : | Fiabilité bobine .....                                                                                 | 59 |
| Figure 4.3 : | Fiabilité inducteur .....                                                                              | 60 |
| Figure 4.4:  | Fiabilité sonde .....                                                                                  | 60 |
| Figure 4.5:  | Fiabilité palier de guidage .....                                                                      | 61 |
| Figure 4.6:  | Fiabilité carte de commande .....                                                                      | 61 |
| Figure 4.7:  | Fiabilité carte de conditionnement .....                                                               | 62 |
| Figure 4.8 : | Fiabilité des compensent du système .....                                                              | 62 |

## Liste des tableaux

|               |                                                         |    |
|---------------|---------------------------------------------------------|----|
| Tableau 2.1 : | Exemple de tableau utilisé en gestion des risques ..... | 22 |
| Tableau 2.2:  | Table de vérité 1 variable .....                        | 28 |
| Tableau 2.3 : | Table de vérité 3 variables .....                       | 28 |
| Tableau 2.4 : | Table de vérité 4 variables .....                       | 29 |
| Tableau 2.5 : | Table de vérité .....                                   | 29 |
| Tableau 2.6 : | Diagramme de Karnaugh .....                             | 30 |
| Tableau 2.7 : | Portes de logiques .....                                | 32 |
|               |                                                         |    |
| Tableau 4.1 : | Composition de l'actionneur intelligent .....           | 58 |
| Tableau 4.2 : | Taux de défaillance des composants .....                | 59 |

## Liste des acronymes

APR : Analyse Préliminaire des Risques

AdD : Arbres de Défaillances

AMDE : Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets

FMDS : Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité

RAMS: Reliability, Availability, Maintainability and Safety

Sdf : Sûreté de fonctionnement

MTTF : Mean Time To Failure

MTBF : Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement

MTBF : Mean Time Between Failure

TBF : Temps de Bon Fonctionnement

TA : Temps d'Arrêts

MTTR: Moyenne des Temps de Taches de Réparation

TMD: temps moyen de disponibilité

MUT : Mean Up Time

TMI : temps moyen d'indisponibilité

MDT : Mean Down Time

APD : Analyse Préliminaire des Dangers

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets et de leurs Criticité

MDS : Méthode du Diagramme de Succès ou de Fiabilité (MDF)

MTV : Méthode de la Table de Vérité

MAC : Méthode de l'Arbre des Causes

MCPR : Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées

PRI : Pannes Résumées Internes

PRE : Pannes Résumées Externes

PRG : Pannes Résumées Globales

MACQ : Méthode de l'Arbre des Conséquences

MDCC : Méthode du Diagramme Causes-Conséquences

MEE : Méthode de l'Espace des Etats

AAE : Analyse par Arbre d'Evénement

RDM : Résistance des Matériaux

IHM : Interface Homme-Machine

PLM : Product Life cycle Management

IC : Ingénierie Concourante

V: Vie

A: Actuators

E Embedded Control

S: Sensors

C: Communication

ABS: Anti Blocking System

ESP: Electronic Stability Program

# Introduction générale

---

## Introduction :

La Sûreté de Fonctionnement (SdF) est déployée historiquement dans les domaines d'aéronautique, aérospatiale, nucléaire, ferroviaire, connaît maintenant un fort développement dans tous les milieux industriels stratégiques notamment l'informatique, l'électronique, énergie [1], La SdF est une science définie par de nombreuses méthodes et concepts mathématiques. La plupart des études réalisées pour obtenir quantitativement les paramètres de sûreté de fonctionnement (Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité, Sécurité) sont des études asymptotiques à taux constants [2].

Les études de sûreté de fonctionnement utilisent un ensemble d'outils et de méthodes (arbres de défaillance, arbres d'événements, diagrammes de fiabilité) qui permettent d'identifier et d'évaluer les combinaisons des événements menant à l'occurrence d'une catastrophe, dans tous les phases de vie d'une entité, de s'assurer que celle-ci va accomplir ou accomplit les missions pour lesquelles elle a été conçue, et ce dans des conditions de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité prédéfinies. Ces études consistent généralement à analyser les effets des pannes, dysfonctionnements, erreurs d'utilisation ou agressions de l'entité étudiée [3].

La mécatronique est la combinaison synergique et systémique de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique. L'intérêt de ce domaine d'ingénierie interdisciplinaire est de concevoir des systèmes automatiques puissants et de permettre le contrôle de systèmes hybrides complexes. La part grandissante de l'électronique et de l'informatique n'est pas sans conséquences sur les méthodes de conception. La complexité croissante des systèmes mécatroniques nécessite une adaptation des processus, méthodes et outils existants par rapport aux spécificités de ces systèmes pour mieux répondre aux exigences, notamment celles liées à la sûreté de fonctionnement [4]. En effet, la préoccupation des industriels est de proposer à leurs clients des produits intégrant les nouvelles innovations technologiques avec une qualité et des performances de plus en plus améliorées mais aussi des produits de plus en plus sûrs. La criticité de ces systèmes nécessite de garantir un niveau de fiabilité et de sécurité convenable

L'objectif de ce mémoire est l'analyse et l'évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système mécatronique "**actionneur intelligent**". Le présent mémoire est organisé comme suit :

# Introduction générale

---

Dans le premier chapitre nous introduirons quelques notions relatives à sûreté de fonctionnement des systèmes pour décrire les concepts de base et les différentes mesures de la sûreté de fonctionnement des systèmes.

Le deuxième chapitre présente une généralité sur les différentes méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement.

Le troisième chapitre traite les caractéristiques des systèmes mécatroniques, en présentant leurs contextes et problématiques. Les principales caractéristiques de ces systèmes ainsi que les difficultés liées à leur analyse sont passées en revue.

Le quatrième chapitre traite un exemple d'application permettant d'illustrer la méthodologie proposée.





# **Chapitre 1**

## **Sûreté de fonctionnement**

## 1.1 Introduction :

Les préoccupations dites de sécurité sont très présentes dans le monde des machines outils ou dans les procédés continus comme la pétrochimie. Dans les applications de type manufacturier, les préoccupations sont plutôt liées à la disponibilité. Dès lors que la sécurité ou la disponibilité d'un système est mise en défaut, on incrimine sa fiabilité. Enfin, en cas de dysfonctionnement, il convient de remettre le système en conditions de fonctionnement initial ; c'est là qu'intervient la maintenabilité. Ces quatre caractéristiques constituent la sûreté de fonctionnement (Sdf) d'un dispositif, ce à quoi s'attache l'essentiel de ce chapitre, en passant en revue les composantes fondamentales. Par ailleurs quelques événements ou dates clefs permettent de fixer l'évolution chronologique de la sûreté de fonctionnement [4].

## 1.2 Historique :

1940 -1950 : une discipline se développe sous le nom de «théorie de la fiabilité», suite à la comparaison des fréquences des pannes des avions utilisés pendant la deuxième guerre mondiale. Elle est appliquée à l'électronique dans l'aéronautique, la défense et le nucléaire.

1960 - 1970 : généralisation de cette approche probabiliste à d'autres composants : mécaniques, hydrauliques, électriques, puis aux hommes, aux logiciels... et développement de nouvelles méthodes (APR, Arbres de défaillances(AdD), AMDE...) permettant de maîtriser les risques.

1980 : Formalisation de l'approche globale de la sûreté de fonctionnement dans le cadre de la conception des systèmes complexes et l'apparition de plusieurs approfondissements qui se manifestent dans le développement : des bases de données de fiabilité, des méthodes d'analyse et de modélisation, des logiciels de calculs, des logiciels de modélisation, ...etc [3].

## 1.3 Définition :

La sûreté de fonctionnement (dependability en anglais) d'un système (SdF) est défini comme la qualité du service délivré par un système, qualité telle que les utilisateurs de ce service puissent placer une confiance justifiée dans le système qui le délivre.

Son objectif est connaître et maîtriser les risques de dysfonctionnement des produits et des systèmes complexes, et en particulier leur fiabilité en mettant en œuvre des méthodes prévisionnelles, expérimentales et opérationnelles appropriées. Elle est caractérisée par quatre principales composantes : Fiabilité (Reliability), Maintenabilité (Maintainability), Disponibilité (Availability) et la Sécurité (Safety) et se nomme alors FMDS (RAMS).

En plus, l'évolution technologique a contribué à l'apparition d'autres attributs à savoir : la qualité, le facteur humain et l'ergonomie.

Cette discipline intervient non seulement au niveau de systèmes déjà construits mais aussi au niveau conceptuel pour la réalisation des systèmes [5].

## 1.4 Le but de la sûreté de fonctionnement :

L'objectif de la sûreté de fonctionnement : mesurer la qualité de service délivré par un système, de manière à ce que l'utilisateur ait en lui une confiance justifiée.

Cette confiance justifiée s'obtient à travers une analyse qualitative et quantitative des différentes propriétés du service délivré par le système, mesurée par les paramètres probabilistes associées : fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité [6].

## 1.5 Mesures de la sûreté de fonctionnement :

Généralement, la sûreté de fonctionnement est considérée comme la science des défaillances est définie par les paramètres suivants :

### 1.5.1. Fiabilité :

La fiabilité  $R(t)$  est l'aptitude d'un système S à accomplir une fonction requise [2], dans des conditions données sur l'intervalle  $[0, t[$

$$R(t) = P\{S \text{ non défaillant sur } [0, t[ \} \quad (1.1)$$

La fiabilité est l'appui à favoriser pour augmenter la disponibilité tout en tenant compte de l'objectif d'optimisation du coût. Cette grandeur peut être quantifiée par ces deux indicateurs :

La durée moyenne sans panne (MTTF), et la moyenne des temps de bon fonctionnement entre défaillances consécutives (MTBF).

Elle représente la probabilité  $R(t)$  que l'entité E accomplissant ses fonctions dans l'intervalle  $[0, t]$ . Elle est caractérisée par sa courbe  $R(t)$  appelée « loi de survie » et son taux de défaillance  $\lambda(t)$ .

$$R(t) = [E \text{ non défaillante sur } [0, t]] \quad (1.2)$$

Dans ce contexte, on introduit également le terme de la dé-fiabilité ou la fonction de défaillance, noté  $F(t)$ , qui est, à l'inverse de la fiabilité, représente la probabilité que l'entité E ait connu une défaillance avant l'instant  $t$ .

$$F(t) = P[E \text{ défaillante sur } [0, t]] \quad (1.3)$$

Il va de soi que la fonction de défaillance ne peut être que le complément de la fonction de fiabilité [3].

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

➤ **Calcul de la MTBF :**

La fiabilité peut se caractériser par la Moyenne des temps de bon fonctionnement ou MTBF (Mean Time Between Failure).

Il se calcule ainsi :

Si le MTBF est calculé suite à un TBF

$$MTBF = \text{Temps total d'opération} / \text{Nombre d'arrêts} + 1 \quad (1.5)$$

Si le MTBF est calculé suite à un TA

$$MTBF = \text{Temps total d'opération} / \text{Nombre d'arrêts} \quad (1.6)$$

➤ **Exemple :**

Fonctionnement d'un équipement sur 24 heures

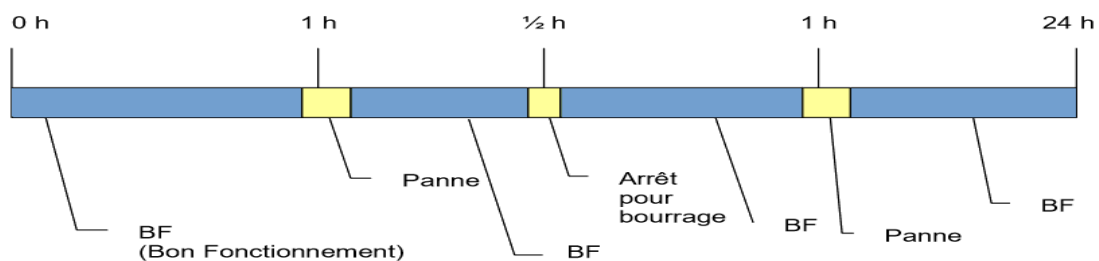


Figure (1.1): Fonctionnement d'un équipement.

$$MTBF = 21,50 / 4 = 5,375 \text{ heures.}$$

➤ **Taux de défaillance  $\lambda$  :**

Le taux de défaillance instantané est le taux de défaillance d'un système ayant fonctionné pendant une durée  $t$  [7].

Appelé également taux de panne, il est égal à l'unité de temps sur la MTBF.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (1.7)$$

Généralement, pour mesurer la fiabilité, on fait appel à la fonction du taux de défaillance.

Elle représente le taux de défaillance exprimé comme le pourcentage de défauts ou de pannes [3]. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\lambda(t) = \frac{P[E \text{ défaillante sur } [t, t + dt] | \text{sans d'être défaillante sur } [0, t]]}{P[E \text{ non défaillante sur } [0, t]]} \quad (1.8)$$

Pour un équipement (système réparable) le taux de défaillance se traduit souvent par une courbe dite « courbe en baignoire » [7], mettant en évidence 3 époques :

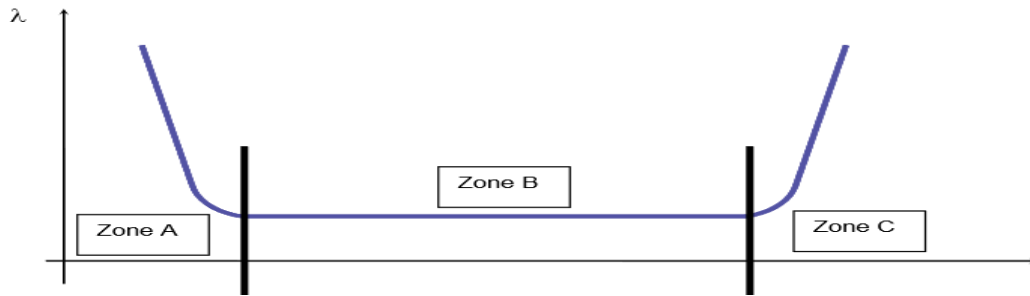


Figure (1.2): courbe en baignoire.

- Zone A => époque de maturité, fonctionnement normal, défaillance aléatoire indépendante du temps
- Zone B => époque de jeunesse
- Zone C => époque d'obsolescence, défaillances d'usure ou pannes de vieillissement.

### ➤ Fiabilité des systèmes :

#### Système en série :

Un système série se caractérise par l'enchaînement linéaire de n éléments (Figure 1.3).

D'après sa structure, la défaillance de l'un de ses n composants entraîne la défaillance du système complet car chaque élément dépend de l'élément qui le précède [3].

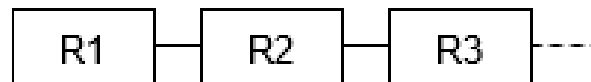


Figure (1.3) : Système série.

La fiabilité du système en série se calcul :

$$R(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times R_3(t) \times \dots \times R_n(t) \quad (1.9)$$

#### Système en parallèle :

Un système est dit en parallèle s'il suffit qu'un seul des éléments fonctionne pour que le système fonctionne.

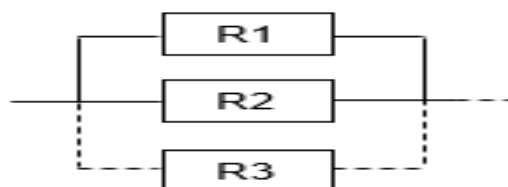


Figure (1.4) : Système parallèle.

La fiabilité résultante est donnée par

$$R(t) = 1 - \sum_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (1.10)$$

La fiabilité du système en parallèle se calcule ainsi :

$$R(t) = 1 - ((1 - R_1(t)) \times (1 - R_2(t)) \times \dots \times (1 - R_n(t)))$$

➤ **Remarque :**

Plus il y a des composantes en parallèle, la fiabilité est meilleure.

Habituellement, on utilise cette propriété pour accroître la sécurité de fonctionnement d'un système [7].

➤ **Exemple :**

- système de freins d'urgence sur une automobile
- deux pompes en parallèle.

### 1.5.2. Maintenabilité :

La maintenabilité s'entend, pour une entité utilisée dans des conditions données, comme la probabilité pour qu'une opération donnée de maintenance puisse être effectuée sur un intervalle de temps donné, lorsque la maintenance est assurée dans des conditions données et avec l'utilisation de procédures et moyens prescrits.

L'indicateur MTTR : temps moyen pour réparer, exprime la moyenne des temps de tâches de réparation. Il est calculé en additionnant les temps actifs de maintenance ainsi que les temps annexes de maintenance, le tout divisé par le nombre d'interventions [8].

Les principaux indicateurs de la maintenabilité sont :

MTTR: moyenne des temps de réparation (Moyenne des Temps de Taches de Réparation).

$\mu$ : taux de réparation.

$$MTTR = \frac{\text{Somme des temps de réparation}}{\text{Nombre de réparations}} \quad (1.11)$$

En considérant que  $\mu$  est constant dans le temps [9].

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (1.12)$$

### 1.5.3. Disponibilité :

La disponibilité est la probabilité pour qu'une entité soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à instant t, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée [10]. On la note D(t) ou A(t).

$$D(t) = A(t) = P(\text{système non défaillant à l'instant } t) \quad (1.13)$$

Le fonctionnement à l'instant t ne nécessite pas forcément le fonctionnement sur [0, t], pour un système réparable ; c'est là que se situe la différence fondamentale avec la fiabilité.

Les grandeurs moyennes associées à la disponibilité les plus courantes sont :

— Le temps moyen de disponibilité (TMD) ou durée de bon fonctionnement après réparation, ou Mean Up Time (MUT) : durée moyenne de fonctionnement après la réparation et la défaillance suivante ;

— Le temps moyen d'indisponibilité (TMI) ou durée moyenne d'indisponibilité,

Ou Mean Down Time (MDT) : durée moyenne entre une défaillance et la remise en état suivante :

— La durée moyenne entre défaillance notée MTBF (Mean Time Between Failure) : durée moyenne entre deux défaillances consécutives de l'entité. En général, on a la relation :

$$MTBF = MUT + MDT \quad (1.14)$$

$$MTBF = \frac{\text{Temps de bon fonctionnement}}{\text{nombre de périodes de bon fonctionnement}}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (1.15)$$

Pour les industries disposant d'équipes performantes de maintenance [11], la valeur de (A) est supérieure à 80 %.

## 1.5.4 Sécurité :

La sécurité (Safety en anglais) est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Elle est caractérisée par la probabilité  $S(t)$  que l'entité E ne laisse pas apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

$$S(t) = P [E \text{ évité des événements critiques ou catastrophiques sur } [0, t]] \quad (1.16)$$

Il est à noter que dans le domaine de l'informatique la sécurité a souvent deux facettes :

La sécurité-innocuité (Safety en anglais) qui vise à se protéger des défaillances catastrophiques et la sécurité-confidentialité (Security en anglais) qui correspond à la prévention d'accès ou de manipulations non autorisées de l'information et concerne la lutte contre les fautes intentionnelles [12].

## 1.6. Quelques lois usuelles :

### 1.6.1. Loi exponentielle :

Cette loi peut modéliser de différents phénomènes dans plusieurs domaines. En radioactivité, chaque atome radioactif possède une durée de vie qui suit une loi exponentielle.

En fiabilité électronique, elle est la loi la plus couramment utilisée lorsque le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant [13]. Notamment, la loi

exponentielle modélise les systèmes qui ont une durée de vie qui ne se dégrade pas et qui ne s'améliore pas.

Cela s'interprète par une absence de vieillissement et une absence de rajeunissement pendant la durée de vie utile d'un composant. Elle décrit la zone B de la courbe en baignoire (Voir figure 1.2).

Elle se caractérise par un seul paramètre, le taux de défaillance  $\lambda$ . Sa fonction de répartition prend la forme :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1.17)$$

Sa fonction de densité est exprimée :

$$f(t) = F'(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.18)$$

Or la fiabilité est définie comme le complément de la fonction de répartition, alors :

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.19)$$

La durée de vie moyenne ou MTTF.

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (1.20)$$

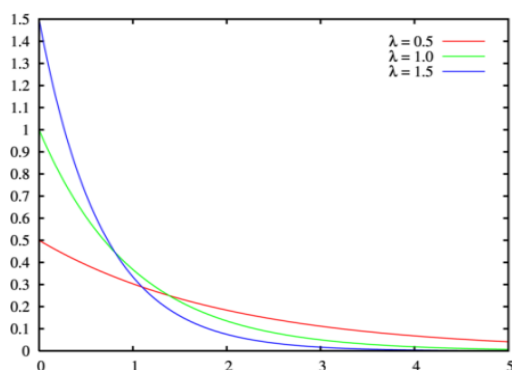


Figure (1.5): Densité de probabilité.

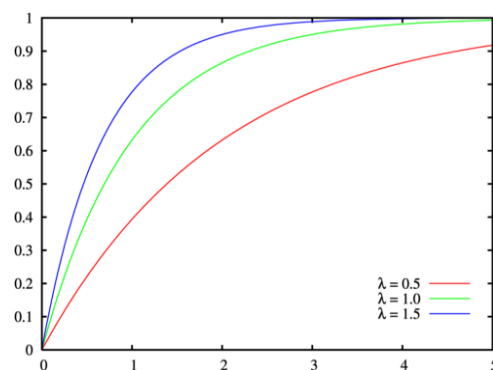


Figure (1.6): Fonction de répartition.

## 1.6.2. La loi de Weibull :

Le modèle Weibull standard est très souple et peut s'adapter avec d'autres lois de fiabilité car étant doté de trois paramètres [14].

C'est pour cette raison qu'il est universellement utilisé dans les études de fiabilité des équipements ou des composants.

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Si } t > \delta \quad (1.21)$$

$$F(t) = 0 \quad \text{Si } t \leq \delta$$

Elle comporte 3 paramètres :

- $\beta$  : paramètre de forme  $\in ]0, +\infty[$ .



- $\eta$ : Paramètre d'échelle  $\in ]0, +\infty[$ .
- $\gamma$ : paramètre de localisation par rapport à l'origine  $\in ]-\infty, +\infty[$ .

La fonction de la fiabilité, le taux de défaillance et de probabilité de la loi de Weibull est la suivante [15] :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta} \quad (1.22)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (1.23)$$

$$f(t) = \lambda(t)R(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta} \quad (1.24)$$

➤ **Papier de Weibull :**

Le papier de Weibull sert à lire graphiquement les paramètres d'une loi dans le cas  $\gamma = 0$ . En effet, la fonction de répartition associée à une loi de Weibull de paramètres  $\beta, \gamma = 0$ ,  $F$  est définie par :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (1.25)$$

$$\ln(1 - F(t)) = -\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \quad (1.26)$$

$$-\ln(1 - F(t)) = \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$$

$$\ln\left(-\ln(1 - F(t))\right) = \beta \ln \frac{t}{\theta}$$

$$\ln\left(-\ln(1 - F(t))\right) = \beta \ln t - \beta \ln \theta$$

$$y = \beta x - \beta \ln \theta \quad (1.27)$$

La dernière équation obtenue est l'équation d'une droite dans le repère rouge (O ; X ; Y) (voir figure 1.7), où O est le point correspondant à  $X = 0$  et  $Y = 0$  soit à  $t = 1$  et  $F(t) = 1 - 1/e$ . Le paramètre se lit directement à l'intersection de la droite précédente avec l'axe des abscisses puisque celui-ci est gradué en échelle logarithmique [16], ce qui est montré sur les figures 1.7

Le paramètre est le coefficient directeur de la droite précédente, il suffit de tracer une droite parallèle à la précédente et de lire directement le coefficient directeur de cette droite sur l'axe d'équation  $X = -1$ .

➤ **Echelles utilisées sur le papier de Weibull :**

- Abscisse haute : échelle naturelle en X
- Abscisse intermédiaire : échelle logarithmique (lecture du paramètre t)
- Abscisse basse : échelle logarithmique (on fait correspondre à chaque valeur de t son logarithme népérien  $\ln t$ ).
- Ordonnée gauche : on place les valeurs de  $F(t)$  en pourcentage en échelle

$\text{Ln} (- \ln (1 - F (t)))$

- Ordonnée sur l'axe X = -1 (lecture du paramètre) : ce sont les valeurs.

$\text{Ln} (- \ln (1 - F (t)))$

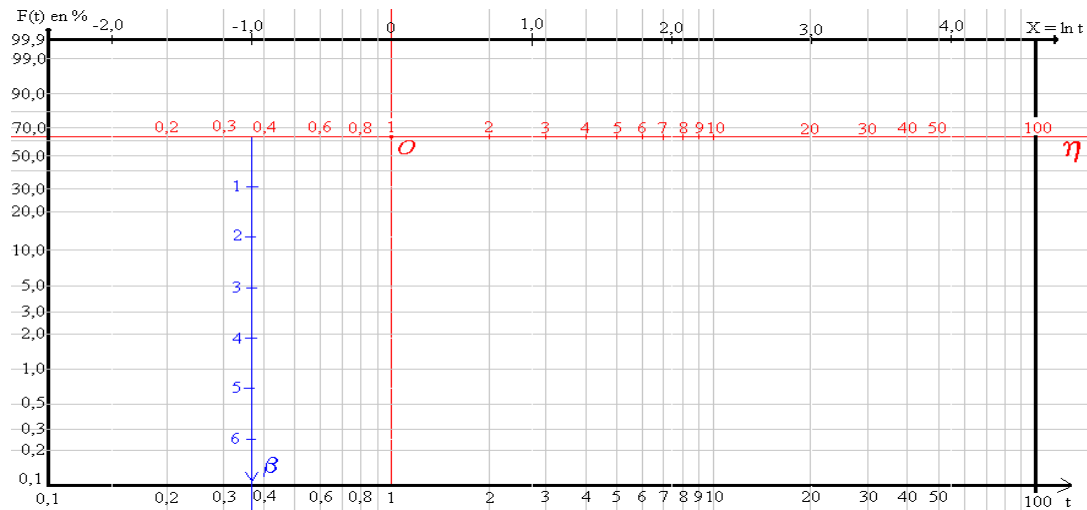


Figure (1.7) : Papier de Weibull.

### 1.6.3. Loi Gamma :

La loi Gamma est une loi de probabilité de densité de paramètre  $\lambda > 0, s > 0$ , Elle est notée  $\Gamma(s, \lambda)$ .

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(s)} (\lambda t)^{s-1} e^{-\lambda t} \quad (1.28)$$

- $\lambda$  : est le taux ou débit de réponse
- $s$  : est le nombre de réponses qu'on attend

Le temps d'attente moyen sera donc de :

$$\mu = s \times \frac{1}{\lambda} (\text{Unités de temps}) \quad (1.29)$$

Comme nous l'avons fait pour les modèles poissoniens, nous pouvons construire un modèle du débit de réponse à partir d'une ou de plusieurs variables indépendantes.

La moyenne d'un Gamma s'écrit

$$\mu = \frac{s}{\lambda}$$

on peut définir un modèle de régression inverse :

$$\mu = \frac{s}{\lambda} = \frac{s}{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p}$$

peut aussi s'écrire :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\beta_0}{s} + \frac{\beta_1}{s} X_1 + \dots + \frac{\beta_p}{s} X_p = \beta_0^* + \beta_1^* X_1 + \beta_p^* \quad (1.30)$$

Régression Gamma (lien log), Nous pouvons aussi observer que si  $\mu = \frac{s}{\lambda}$ , alors :

$$\ln \mu = \ln s - \ln \lambda \quad (1.31)$$

Si nous pensons que l'effet des variables sur le temps d'attente est non plus additif mais multiplicatif (effet d'apprentissage ou d'accumulation) :

$$\lambda = e^{\beta_0} e^{\beta_1 X_1} e^{\beta_2 X_2} \dots e^{\beta_p X_p} = e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p} \quad (1.32)$$

Alors on a un modèle log linéaire [17].

$$\ln \mu = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p \quad (1.33)$$

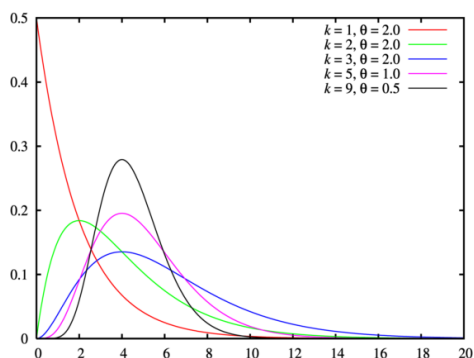


Figure (1.8): Densité de probabilité.

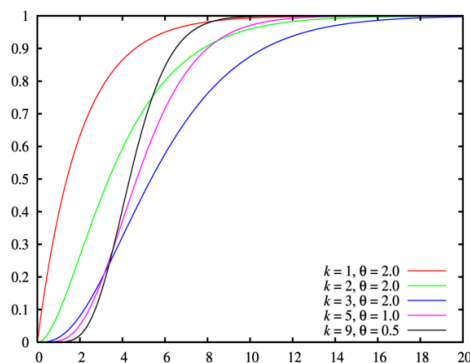


Figure (1.9): Fonction de répartition.

### 1.6.4. La Loi Normale :

Une variable aléatoire réelle X suit une loi normale (ou loi gaussienne, loi de Laplace-Gauss) d'espérance  $\mu$  et d'écart type  $\delta$  (nombre strictement positif, car il s'agit de la racine carrée de la variance  $\delta^2$ ) si cette variable aléatoire réelle X admet pour densité de probabilité la fonction  $p(x)$  définie, pour tout nombre réel x [18], par :

$$p(x) = \frac{1}{(\sigma \cdot \sqrt{2\pi})} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (1.34)$$

La loi normale est la loi statistique la plus répandue et la plus utile. Elle représente beaucoup de phénomènes aléatoires. De plus, de nombreuses autres lois statistiques peuvent être approchées par la loi normale [19].

Tout spécialement dans le cas des grands échantillons. Son expression mathématique est la suivante :

$$n(x) = \frac{n}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.35)$$

- $\mu$ : est la moyenne
- $\sigma$ : l'écart type

- $n$ : le nombre total d'individus dans l'échantillon
- $n(x)$ : le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur  $x$

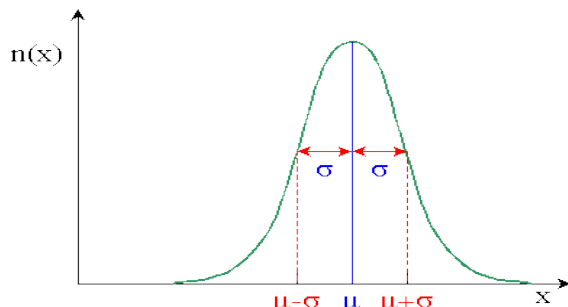


Figure (1.10): densité normal avec  $\sigma$ .

### ➤ Calcul de la Moyenne et de la Variance

Nous allons montrer que la moyenne d'une variable qui suit une loi normale est égale à  $\mu$ , et que sa variance est égale à  $\sigma^2$ . La démonstration est uniquement calculatoire et pourra être omise [20].

La moyenne est, par définition, égale à :

$$E(X) = \frac{1}{(\sigma \times \sqrt{2\pi})} \int_{-\infty}^{+\infty} X e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dX \quad (1.36)$$

Pour calculer cette intégrale, faisons le changement de variable, classique pour les calculs sur la loi normale :

$$u = \frac{(x-\mu)}{\sigma} \quad (1.37)$$

Il vient :

$$E(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (\mu - \sigma u) e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (1.38)$$

$$E(X) = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} u e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

La seconde intégrale est nulle. Quant à la première, elle est égale à  $\sqrt{2\pi}$ , ce qui se montre en posant :

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (1.39)$$

$$I^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}(x^2+y^2)} dx dy \quad (1.40)$$

Que l'on intègre facilement en passant en coordonnées polaires. D'où finalement :

$$E(X) = \mu \quad (1.41)$$

De la même façon

$$E[(X - \mu)^2] = \frac{1}{(\sigma \times \sqrt{2\pi})} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (1.42)$$

Qui devient, après changement de variable :

$$E[(X - \mu)^2] = \frac{\sigma^2}{\sqrt{(2\pi)}} \int_{-\infty}^{+\infty} u^2 e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

L'intégrale se calcule par parties, et il vient :

$$E[(X - \mu)^2] = \sigma^2$$

➤ **La loi normale centrée réduite**

On appelle densité de probabilité de Laplace-Gauss [21], la fonction  $F$  définie sur  $\mathbf{R}$  par:

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (1.43)$$

On dit que la variable aléatoire  $X$  suit une loi normale centrée réduite, notée  $N(0, 1)$  si sa densité de probabilité est égale à la fonction  $F$ . Sa fonction de répartition  $F$  est donc définie par :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x F(t) dt \quad (1.44)$$

- Le nombre  $F(a)$  représente l'aire du domaine délimité par cette courbe en cloche l'axe des abscisses et la droite  $x = a$ .
- La fonction  $F$  peut être considérée comme la primitive de la fonction  $F$  qui vérifie  $F(0) = 0,5$ .
- Avant l'arrivée des calculatrices, on avait des tables donnant les valeurs de  $F(a)$  pour les valeurs de  $a$  positives.

Si une variable aléatoire  $X$  suit une loi normale centrée réduite alors pour tous réels  $a$  et  $b$  tels que  $a \leq b$ .

On a:

$$P(a \leq X \leq b) = F(b) - F(a) \quad (1.45)$$

$$P(X \geq a) = 1 - F(a)$$

$$P(X \leq -|a|) = 1 - F(|a|)$$

➤ **Théorème Central Limite :**

Soit  $X_1, \dots, X_i, \dots, X_n$ , une suite de  $n$  variables aléatoires indépendantes suivant la même loi d'espérance  $m$  et de variance  $\delta^2$ . Notons :

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (1.46)$$

Alors la suite de variables aléatoires  $\frac{\bar{X}_n - \mu}{\delta/\sqrt{n}}$  converge en loi vers la loi normale centrée réduite  $N(0,1)$ , ce qui signifie que [22].

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{\bar{X}_n - \mu}{\delta/\sqrt{n}} < x\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (1.47)$$

➤ **La loi normale comme modèle**

Prenons l'exemple du fonctionnement d'un tour. Le réglage du tour a pour but d'obtenir des pièces présentant une cote bien définie ; mais on sait que de multiples causes perturbatrices agissent au cours de l'usinage d'une pièce : vibrations, usures, variations de courant ... Or si les causes perturbatrices sont nombreuses, si leurs effets interviennent de façon additive, enfin si la dispersion provoquée par chacune d'elles reste faible par rapport à la dispersion totale, alors le théorème central limite signifie qu'on doit observer une fluctuation globale très voisine de la loi normale. Et, comme ce mécanisme d'intervention de causes perturbatrices est très répandu dans la nature, il en résulte que la loi normale occupe en statistique une place privilégiée [20].

**1.6.5. Loi Log-Normale :**

La loi de Galton s'appelle également loi log-normale ou loi gausse-logarithmique car son expression est proche de celle de la loi normale à une anamorphose près de type logarithmique [23], sur la variable. On peut, en effet lui donner la représentation suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad (1.48)$$

Où :

- x : est la variable qui est dans notre cas la pluie maximale journalière
- u : est la variable centrée réduite

$$u = \frac{\ln(xi) - M}{\sigma y} \quad (1.49)$$

M : est la moyenne des logarithmes de la variable Pi :

$$M = \frac{\sum_i^N \ln(pi)}{N} \quad (1.50)$$

$\sigma y$  : est l'écart type :

$$\sigma y = \frac{\sum_i^N \ln(xi - M)^2}{N+1} \quad (1.51)$$

$Cv(y)$  : Le coefficient de variation :

$$Cv = \frac{\sigma y}{M} \quad (1.52)$$

- r : coefficient de corrélation :

$$r = \frac{\sum_i^N (xi - \bar{x})(yi - \bar{y})}{\sum_1^N (xi - \bar{x})^2 \sum_1^N (yi - \bar{y})^2} \quad (1.53)$$

La droite de Galton ou loi log normale :

$$\ln x = \overline{\ln x} + u\sigma_{\ln x} \quad (1.54)$$

$$P_{max, j}(10\%) = e^{\overline{\ln x} + u\sigma_{\ln x}}$$

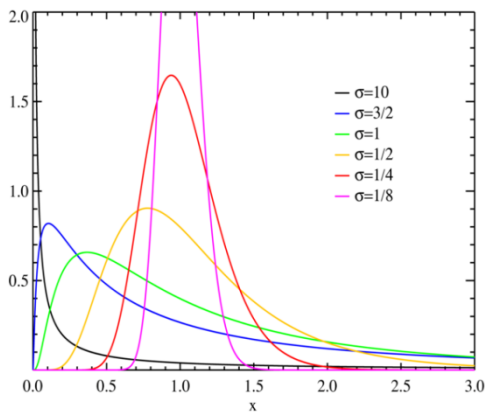


Figure (1.11):Densité de probabilité  $\mu=0$ .

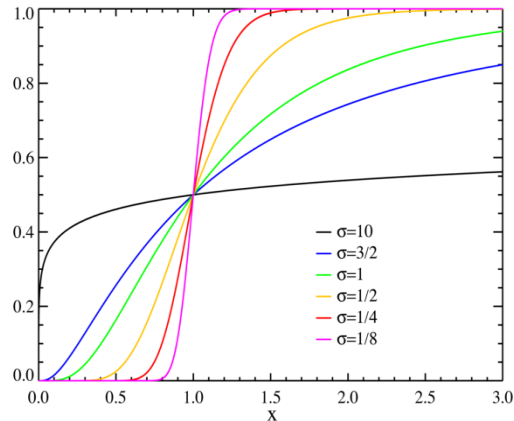


Figure (1.12):Fonction de répartition  $\mu=0$ .

## 1.7. Conclusion :

La sûreté de fonctionnement, est un terme générique rassemblant la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité, Elle est utilisable pour tous les systèmes et moyens de production.

L'étude de la fiabilité passe par plusieurs lois, parmi lesquelles, loi exponentielle, loi de weibull, loi gamma, loi normale et la loi log normale, Ces études facilitent le dialogue entre la conception, l'exploitation et le soutien.

A decorative horizontal scroll graphic with a black outline and rounded ends. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curving upwards. The text is centered within the scroll.

## **Chapitre2**

### **Méthodes d'analyse de la SdF**



## 2.1 Introduction :

La Sûreté de Fonctionnement (SdF) est une discipline qui s'appuie sur un support méthodologique applicable aux systèmes technologiques tout au long de leur cycle de vie:

- Expression du besoin, conception, industrialisation, production, utilisation,
- Diffusion, maintenance, voire même retrait de service.

Ces démarches bénéficient du support de méthodologies rigoureuses et d'outils pratiques et puissants. Les méthodes de la sûreté de fonctionnement ont toutes au moins trois points communs, qui peuvent être résumés en trois types d'action :

- Identifier les processus pouvant affecter la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité ou la sécurité,
- Modéliser ces différents processus afin de faciliter la compréhension des mécanismes mis en jeu,
- Valoriser les résultats des analyses en utilisant les modèles obtenus pour apprécier le niveau de sûreté de fonctionnement du système étudié, en relever les éventuelles insuffisances par rapport aux objectifs de performances poursuivis, en hiérarchiser les points forts et les points faibles.

Les connaissances requises pour une telle analyse de la sûreté de fonctionnement sont multiples :

- Une bonne connaissance technique du système.
- Un retour d'expérience sur l'exploitation et les éventuelles défaillances observées du système ou d'un système similaire.
- Une bonne expérience des méthodes d'analyse de sûreté qui requièrent de l'intuition et du bon sens de la part de l'analyste.

On peut diviser une analyse de sûreté de fonctionnement de système en plusieurs étapes principales à savoir :

- L'analyse structurelle et fonctionnelle du système
- L'analyse qualitative du système
- L'analyse quantitative du système
- La synthèse des analyses précédentes et une conclusion [24].

## 2.2 Définition :

Une analyse de sûreté de fonctionnement est un processus d'étude d'un système Réel de façon à produire un modèle abstrait du système relatif à une caractéristique de sûreté de

fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité). Les éléments de ce modèle seront des événements susceptibles de se produire dans le système et son environnement, tels par exemple :

- Des défaillances et des pannes des composants du système.
- Des événements liés à l'environnement.
- Des erreurs humaines en phase d'exploitation.

Le modèle permet ainsi de représenter toutes les défaillances et les pannes des composants du système qui compromettent une des caractéristiques de sdf [5].

### 2.3 Principales méthodes:

Il y'a plusieurs méthodes d'analyse ont été mises au point. Les principales sont :

#### 2.3.1 Analyse Préliminaire des Dangers (APD) :

L'analyse préliminaire des dangers, parfois appelée aussi analyse préliminaire des risques (APR) est une méthode d'identification et d'évaluation des risques au stade initial de la conception d'un système. Elle peut être aussi utilisée avec profit pendant toute la durée de vie de ce dernier. L'APR a été développée aux Etats-Unis au début des années 1960 dans les domaines aéronautique et militaire.

Après plusieurs rappels terminologiques et conceptuels sur les risques, cet ouvrage présente les principes et méthodes de l'APR permettant de construire la cartographie des situations dangereuses, d'élaborer les cartographies des risques, d'évaluer les rapports bénéfice / risques et de réaliser les allocations préliminaires de sécurité.

Enfin, des exemples d'applications et de mises en œuvre sont présentés dans le secteur industriel et dans le domaine de la santé [25].

#### ❖ Principe :

L'APR nécessite dans un premier temps d'identifier les éléments dangereux de l'installation. Ces éléments dangereux désignent le plus souvent

- des substances ou préparations dangereuses, que ce soit sous forme de matières premières, de produits finis, d'utilités...
- des équipements dangereux comme par exemple des stockages, zones de réception/expédition, réacteurs, fournitures d'utilités (chaudière...)
- des opérations dangereuses associées au procédé.

L'identification de ces éléments dangereux est fonction du type d'installation étudiée, et se fonde sur la description fonctionnelle réalisée avant la mise en œuvre de la méthode.

A partir de ces éléments dangereux, l'APR vise à identifier, pour un élément dangereux, une ou plusieurs situations de dangers.

Une situation de dangers est définie comme une situation qui, si elle n'est pas maîtrisée, peut conduire à l'exposition de cibles à un ou plusieurs phénomènes dangereux [26].

### ❖ Objectifs :

La méthode du L'APD a pour objectifs :

- de forcer le projet à pratiquer une décomposition fonctionnelle de base, de tout le concept de l'instrument, y compris les softs, pendant la phase de design.
- l'identification des erreurs et des non-conformités de design en comparaison aux spécifications d'origine.
- l'identification très tôt dans le déroulement du projet, des modes de pannes possibles et en particulier des pannes à effet catastrophique sur le système, ces dernières sont traitées en priorité.
- l'apport de modifications pour réduire le nombre d'éléments critiques et, plus généralement, pour réduire les risques de pannes [27].

### ❖ La méthodologie de l'analyse :

L'utilisation d'un tableau de synthèse constitue un support pratique pour mener la réflexion et résumer les résultats de l'analyse. Ce tableau peut être adapté en fonction des objectifs fixés par le groupe de travail.

Dans la phase de description des installations, différentes fonctions sont identifiées. Les éléments de la décomposition issus de l'analyse fonctionnelle sont passés en revue, en examinant les situations de danger potentielles de manière systématique. Les expériences et les idées de chacun vont permettre une étude des risques la plus complète possible.

Le groupe de travail peut alors adopter une démarche systématique sous la forme suivante :

- sélectionner les fonctions à étudier à partir de la description fonctionnelle réaliser ;
- sélectionner les composants ou éléments en rapport avec la fonction ;
- pour cet équipement, considérer une première situation de dangers (modes de défaillances ou événements redoutés) ;
- pour cette situation de dangers, envisager toutes les causes et les conséquences possibles en identifiant les barrières de sécurité existantes sur l'installation ;
- la criticité C et ensuite calculée en multipliant la note F fréquence des défaillances par la note G gravité des défaillances ;

## Chapitre 2

## Méthodes d'analyse de la SdF

- si le risque ainsi estimé est jugé inacceptable, formuler des propositions d'améliorations (actions de réduction des risques) ;
- une nouvelle évaluation réalisée après avoir réalisé les améliorations, donnera lieu à une nouvelle évaluation (note F' x note G' = nouvelle criticité C').

Dans ce tableau, d'autres colonnes sont envisageable, par exemple une colonne de commentaires ou d'observations à droite du tableau. La décomposition fonctionnelle est représentée dans tableau 2.1.

|                                      |                            |                                                       |                            |                                                                 |                                                                      |                                     |                    |                                                                    |                       |
|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| F<br>o<br>n<br>c<br>t<br>i<br>o<br>n | Composant<br>Ou<br>Elément | Mode de<br>défaillance<br>ou<br>événement<br>réduites | Cause<br>de<br>défaillance | Effet<br>Prévisible<br>sur les<br>procédé<br>ou le<br>processus | Effet<br>Prévisible<br>sur les<br>personnes<br>et<br>l'environnement | Moyens<br>de<br>détection<br>prévus | Criticité<br>C=GxF | Action<br>De<br>correction<br>ou de<br>réduction<br>des<br>risques | Criticité<br>C'=F'×G' |
|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|

Tableau 2.1 : Exemple de tableau utilisé en gestion des risques.

Cette étude est faite par un groupe de travail pluridisciplinaire réunissant les acteurs les plus concernés par le sujet étudié :

- responsable qualité du projet ;
- chef de projet ;
- Ingénieur système ;
- responsables techniques ;
- responsables Assurance Produit ;
- responsables des méthodes ;
- et toute personne concernée capable d'apporter une valeur ajoutée.

L'APD n'étant pas formalisée par des normes, il en résulte que les résultats obtenus dépendent de l'analyse, d'où l'importance de l'action collective évoquée ci-dessus et du bon sens de chacun [28].

### 2.3.2 Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets et leurs Criticité(AMDEC):

L'AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) permet d'anticiper et de gérer les risques dans l'entreprise. C'est l'un des outils les plus fameux de l'amélioration continue en qualité. À l'origine utilisée essentiellement dans les entreprises industrielles et plus particulièrement dans le secteur de l'automobile, l'AMDEC s'est étendue à

toutes les entreprises qui mettent en œuvre les normes ISO 9000 et qui s'orientent vers la satisfaction client [29].

### ❖ Principe :

L'AMDEC est fondée sur une démarche inductive (compréhension du comportement) consistant à analyser les effets au niveau équipement puis sous-système et système de panne de composants élémentaires.

Les modes des défaillances considérés peuvent être définis au niveau composant ou bloc fonctionnel (constitué de quelques composants assurant une fonction élémentaire). Ils sont issus de normes, de bases de données ou résultent d'une démarche déductive d'analyse de défaillance.

La liste des modes de défaillance des composants est vaste et recouvre notamment les types de panne suivants :

- Court-circuit, circuit ouvert, dérive d'un paramètre électrique... pour des composants électroniques élémentaire.
- rupture, déformation, grippage, usure, pollution... pour des composants mécanique.
- modes, déterministes ou aléatoires pour des composants électroniques intégrés [30].

### ❖ Objectifs :

L'objectif d'une AMDEC est d'identifier les effets des modes de bris d'équipement, de système ou d'usine. Cette analyse produit généralement des recommandations qui conduisent à une amélioration de la fiabilité de l'équipement.

L'AMDEC joue un rôle essentiel dans un programme d'assurance fiabilité. Cette méthode peut s'appliquer à un large éventail de problèmes survenant dans les systèmes techniques. Elle peut être plus ou moins approfondies ou modifiées en fonction du but à atteindre. Cette analyse, qui est peu utilisée pendant les phases d'étude, de planification et de définition, est largement employée au cours de la conception et de la mise en œuvre. Il faut, toutefois, rappeler que l'AMDEC n'est qu'une étape du programme de fiabilité et de maintenabilité qui requiert d'effectuer de multiples tâches dans des domaines variés [31].

### ❖ La méthodologie de l'analyse :

La méthodologie doit être établie pour le système dans son ensemble.

Elle se détaille comme suit :

- Chaque composant est considéré séparément ;
- On envisage divers mode de défaillance (rupture, corrosion) ;
- On analyse les conséquences pour le système ;

- On fournit des recommandations pour améliorer la maintenabilité.

La méthode comprend des aspects qualitatifs et quantitatifs.

Les aspects qualitatifs sont :

- Le recensement des défaillances potentielles ;
- L'indentification des causes ;
- L'indentification des effets sur les clients ou utilisateurs et sur l'environnement.

Les aspects quantitatifs sont :

- L'estimation du risque (ou l'impact sur le client) associé à la défaillance afin de hiérarchiser les défaillances potentielles ;
- La hiérarchiser des actions correctrices.

L'application de la méthode comprend 7 étapes principales qui s'agencent de la façon décrite dans l'ordinogramme de la figure 2.1 [32].

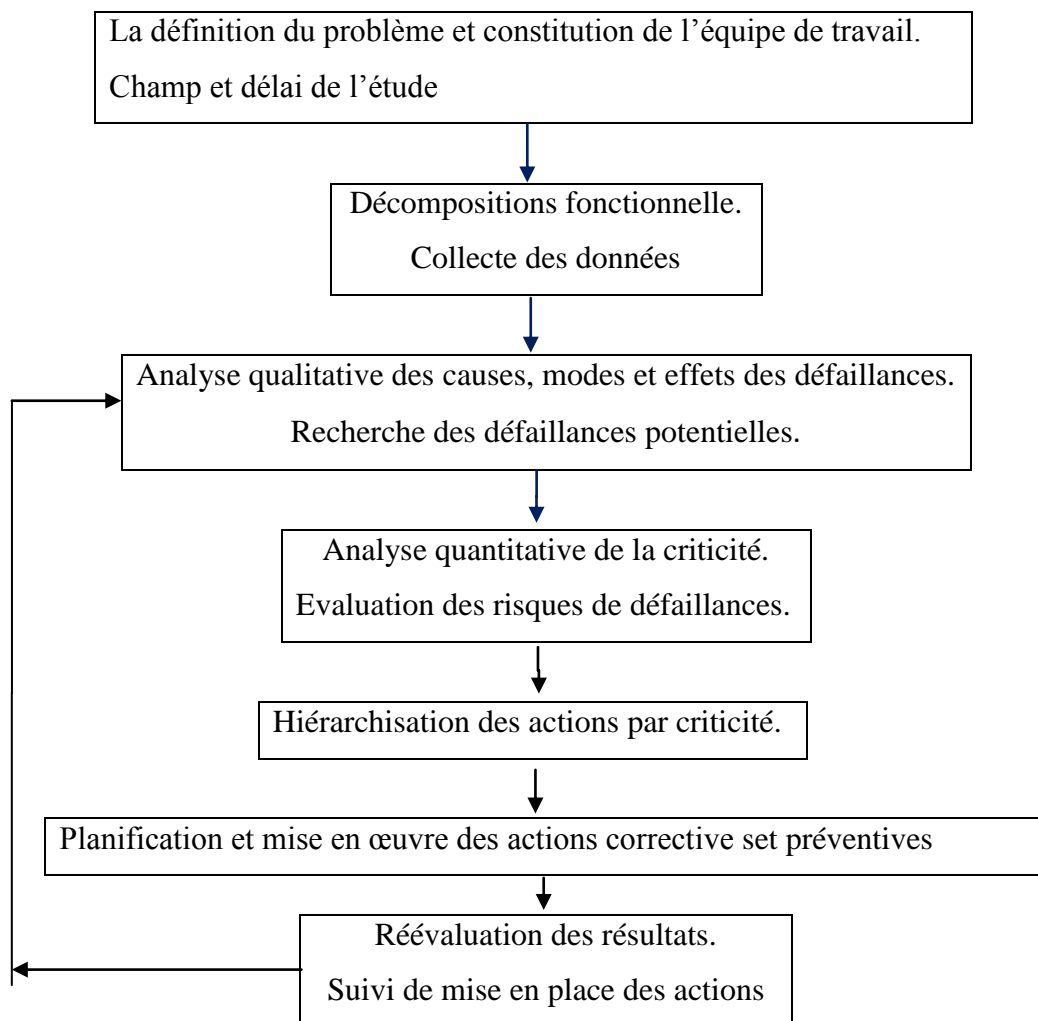


Figure 2.1 : Organisation de la méthode AMDEC.

### 2.3.3 Méthode du Diagramme de Succès (MDS) :

Une Méthode de Diagramme de Succès (MDS) ou de Fiabilité (MDF) permet le calcul de la disponibilité ou la fiabilité du système modélisé. C'est un diagramme composé de blocs, chacun d'eux représentant une entité (composant, sous-système, voire fonction) reliés par des lignes orientées indiquant les dépendances des entités entre elles. Le comportement des entités est binaire (fonctionnement/ défaillance). Les diagrammes sont constitués d'une entrée E, d'un corps diagrammatique et d'une sortie S. On suppose qu'un signal est émis en E et est transmis par les lignes jusqu'à la sortie S, la défaillance d'une entité entraînant l'arrêt du signal au niveau du bloc qui lui est associé (figure 2.2). S'il n'existe aucun chemin d'accès permettant le passage du signal de E vers S, le système est défaillant, sinon il fonctionne. Un tel diagramme est une représentation statique du système. L'étude consiste à chercher les combinaisons de défaillances d'entités élémentaires conduisant à la défaillance du système, appelées « coupes ». Les « coupes » ne contenant aucune autre coupe sont dites « minimales » (la notion de chemins minimaux est aussi utilisée pour ce type d'étude). Ces dernières sont essentielles pour les calculs probabilistes découlant de cette première analyse [33].

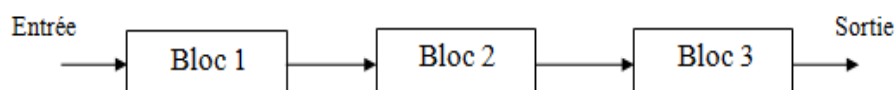


Figure 2.2 : Exemple d'un digramme de fiabilité.

#### ❖ Principe:

La méthode d'analyse par diagramme de fiabilité repose sur une décomposition du système en sous-systèmes ; chaque entité étant modélisée par des blocs [34].

- Les sous-systèmes
- Les fonctions
- Les composants

#### ❖ Objectif :

La méthode du « diagramme de succès » ou de « fiabilité » aboutit à une modélisation fonctionnelle d'un système en considérant que les fonctions globales de ce système résultent d'une mise en série et/ou en parallèle de fonctions élémentaires. Chaque composant du système, considéré comme indépendant, réalise une fonction autonome. L'évaluation de la fiabilité du système est déduite de cette modélisation fonctionnelle [35].

❖ **La méthodologie de l'analyse :**

Les MdF sont ainsi utilisés dans de nombreux domaines industriels pour les systèmes non réparables, mais ils peuvent également, sous certaines conditions, être utilisés pour les calculs de fiabilité de systèmes réparables [36].

➤ **Diagramme en série :**

La panne de l'un des éléments  $E_i$  du système entraîne la panne du système (figure 2.3). Si nous désignons par  $R_S$  la fiabilité du système et  $R_i$  la fiabilité du composant  $E_i$ , alors la fiabilité du système est donnée par :

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \tag{2.1}$$

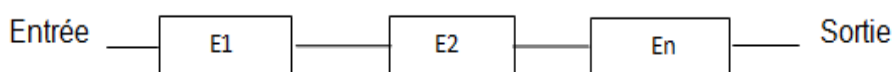


Figure 2.3 : MdF d'un système série.

➤ **Diagramme en parallèle :**

La panne de tous les éléments  $E_i$  du système entraîne la panne du système (figure 2.4). Si un seul des éléments fonctionne alors il conduit au fonctionnement du système.

Dans ce cas, la fiabilité du système est donnée par :

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \tag{2.2}$$

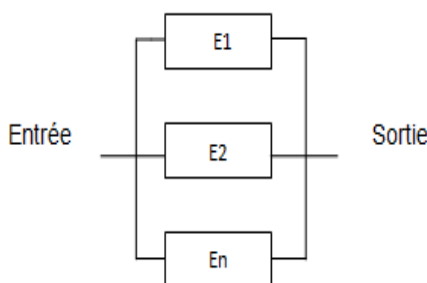


Figure 2.4 : MdF d'un système parallèle.

➤ **Diagramme en redondance partielle k/n :**

Les systèmes à  $n$  composants qui fonctionnent si et seulement si au moins  $k$  de leurs composants fonctionnent, sont appelés des systèmes  $k$  parmi  $n$  ( $k/n$ ) (figure 2.5).

On ne dispose pas d'une expression générale de la fiabilité d'un système  $k/n$ . Néanmoins, dans le cas où tous les composants du système ont la même fiabilité  $R$ , la fiabilité totale du système est donnée par :

$$R_S = \sum_{i=k}^n C_n^i R^i (1 - R)^{n-i} \tag{2.3}$$

avec :

$$C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!} \tag{2.4}$$



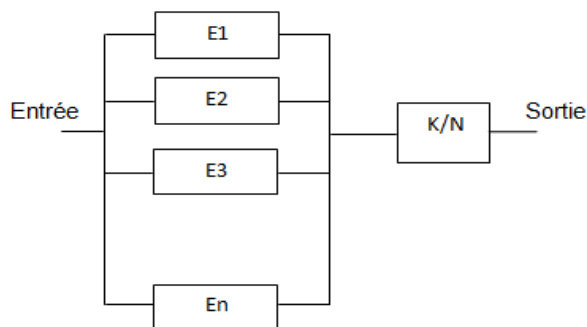


Figure 2.5 : MdF d'un système k/n.

### 2.3.4 Méthode de la Table de Vérité (MTV):

L'ensemble des valeurs prises par une fonction logique pour toutes les combinaisons possibles de ses variables est rangé dans un tableau, appelé table de vérité, comportant autant de colonne que de nombre de variables, plus une colonne pour ranger les valeurs de la fonction, et autant de ligne qu'il est possible de faire des combinaisons différentes avec les variables [37].

#### ❖ Principe :

Le principe de cette méthode consiste à décomposer le système et à recenser les modes de défaillances des différents composants, ainsi que leurs états de panne. Chaque composant est caractérisé par un état de fonctionnement ou par un état de panne.

Etablir la Table de Vérité d'un système consiste à analyser les effets de tous les vecteurs des états des composants et à déterminer tous les mauvais fonctionnements du système.

A partir de cette table, il est facile de déduire les combinaisons de défaillance et les pannes conduisant à un événement indésirable [38].

#### ❖ Objectif :

La table de vérité vise à représenter le fonctionnement logique du système considéré avec identifier tous les états du système à partir de comportements binaires [39].

#### ❖ La méthodologie de l'analyse :

Une table de vérité est composée d'une colonne pour chaque variable (A B C D par exemple), et d'une colonne où sont inscrits tous les résultats possibles de l'opération logique représentée par le tableau (A et B et C et Non D par exemple). Chaque ligne de la table de vérité contient ainsi une des configurations possibles des variables imputées (par exemple : A=vrai, B=vrai, C=vrai, D=faux), ainsi que le résultat de l'opération pour ces valeurs.

Ce type de table de vérité est couramment utilisée en informatique selon un code d'entrée binaire (0/1, faux/vrai).

## Chapitre 2

## Méthodes d'analyse de la SdF

Elle est également utilisée en électronique avec la configuration de chaque variable à Éteint/Allumé.

Quelque soit le nombre de variables, le principe est d'avoir toutes les combinaisons possibles dans la table de vérité [40].

➤ **Exemple 1 variable :**

| A | Résultat |
|---|----------|
| 0 | Action1  |
| 1 | Action2  |

Tableau 2.2:Table de vérité 1 variable.

➤ **Exemple 3 variables :**

| A | B | C | Résultat |
|---|---|---|----------|
| 0 | 0 | 0 | Action1  |
| 0 | 0 | 1 | Action2  |
| 0 | 1 | 0 | Action3  |
| 0 | 1 | 1 | Action4  |
| 1 | 0 | 0 | Action5  |
| 1 | 0 | 1 | Action6  |
| 1 | 1 | 0 | Action7  |
| 1 | 1 | 1 | Action8  |

Tableau 2.3 : Table de vérité 3 variable.

➤ Exemple 4 variables

| A | B | C | D | Résultat |
|---|---|---|---|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | Action1  |
| 0 | 0 | 0 | 1 | Action2  |
| 0 | 0 | 1 | 0 | Action3  |
| 0 | 0 | 1 | 1 | Action4  |
| 0 | 1 | 0 | 0 | Action5  |
| 0 | 1 | 0 | 1 | Action6  |
| 0 | 1 | 1 | 0 | Action7  |
| 0 | 1 | 1 | 1 | Action8  |
| 1 | 0 | 0 | 0 | Action9  |
| 1 | 0 | 0 | 1 | Action10 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | Action11 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | Action12 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | Action13 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | Action14 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | Action15 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | Action16 |

Tableau 2.4 : Table de vérité 4 variable.

➤ Le diagramme de Karnaugh :

Un tableau de Karnaugh peut être vu comme une table de vérité particulière, à deux dimensions, destinées à faire apparaître visuellement les simplifications possibles. Supposons  $2^n$  ou  $2^{n+1}$  variables : on assignera par exemple  $n$  ou  $n+1$  variables au repérage des lignes, les  $n$  autres variables au repérage des colonnes. Chaque case élémentaire correspond alors à une seule ligne et à une seule colonne, donc à une seule combinaison des variables. Examinons le cas d'une fonction  $S$  des quatre variables  $A, B, C, D$ , les variables  $A$  et  $B$  étant assigné aux lignes,  $C$  et  $D$  aux colonnes de la table ci-dessous :

| S  | CD | 00 | 01 | 11 | 10 |
|----|----|----|----|----|----|
| AB |    |    |    |    |    |
| 00 |    | 0  | 1  | 1  | 0  |
| 01 |    | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 11 |    | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 10 |    | 0  | 1  | 1  | 0  |

Tableau 2.5 : Diagramme de Karnaugh.

Les valeurs du tableau de Karnaugh considéré correspondent aux valeurs de la table de vérité suivante [41].

| A | B | C | D | S |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tableau 2.6 : Table de vérité.

### 2.3.5 Méthode de l'Arbre des Causes (MAC):

Un arbre des causes (arbre de défaillance) est un schéma utilisé dans le domaine des risques professionnels pour étudier a posteriori tout événement indésirable (accident du travail, mais aussi défaillance d'un processus, etc.).

La méthode de l'arbre des causes est -notamment- utilisée dans les entreprises pour déterminer de la manière la plus exhaustive possible les causes d'un accident ou d'un incident, pour en établir les liens de causalité en vue de remédier aux conditions nécessaires à l'accident.

Un arbre des causes vise à comprendre un accident, que celui-ci soit un accident du travail ou non, la démarche ne consiste pas à « juger », ni à « trouver un coupable » mais à identifier les causes de l'évènement.

Une fois identifiées les causes, il faut identifier les facteurs ayant généré l'évènement, qu'ils soient d'ordre technique, organisationnel ou humain [42].

#### ❖ Principe :

Le principe de l'utilisation des arbres des causes est de mettre en pratique cette maxime en réunissant les éléments ayant joué un rôle dans un événement et en restituant à chacun sa place dans le déroulement de l'évènement. La compréhension de tout événement sortant du

strictement prévu, normal, habituel est une source de progrès. Il faut pour cela en produire une analyse rigoureuse [43].

### ❖ Objectif :

L'objectif « qualitatif » est de construire une synthèse de tout ce qui peut conduire à un événement redouté et d'évaluer l'effet d'une modification du système, de comparer les conséquences des mesures qui peuvent être envisagées pour réduire l'occurrence de l'événement redouté étudié [44].

### ❖ La méthodologie de l'analyse :

C'est une analyse déductive qui demande une grande connaissance des divers modes de dégradation des systèmes. On part de la défaillance présumée des systèmes et on recherche toutes les causes ou agencement (combinaison) de causes qui peuvent conduire à cette défaillance. Un certain nombre de symboles sont utilisés pour construire l'arbre. La construction de l'arbre de défaillances repose sur l'étude des événements entraînant un événement redouté. Les deux étapes suivantes sont réalisées successivement en partant de l'E.R. et en allant vers les événements élémentaires.

- Dans un premier temps définir l'événement redouté (l'événement intermédiaire, ou l'événement élémentaire) analysé en spécifiant précisément ce qu'il représente et dans quel contexte il peut apparaître
- Puis dans un deuxième temps représenter graphiquement les relations de cause à effet par des portes logiques (ET, OU) qui permettent de spécifier le type de combinaison entre les événements intermédiaires qui conduisent à l'événement analysé.

Pour pouvoir appliquer cette méthode il est nécessaire de :

- Vérifier que le système a un fonctionnement cohérent.
- Connaître la décomposition fonctionnelle du système.
- Définir les limites du système (le degré de finesse de notre étude dépend des objectifs).
- Connaître la mission du système et son environnement pour déterminer le ou les événements redoutés qui est nécessaire à étudier.
- Connaître les modes de défaillance des composants c'est par exemple en s'appuyant sur une analyse de type AMDEC que les branches de l'arbre pourront être construites.

Les calculs reposent sur : les équations logiques tirées de la structure de l'arbre de défaillances et des probabilités d'occurrence des événements élémentaires [45].

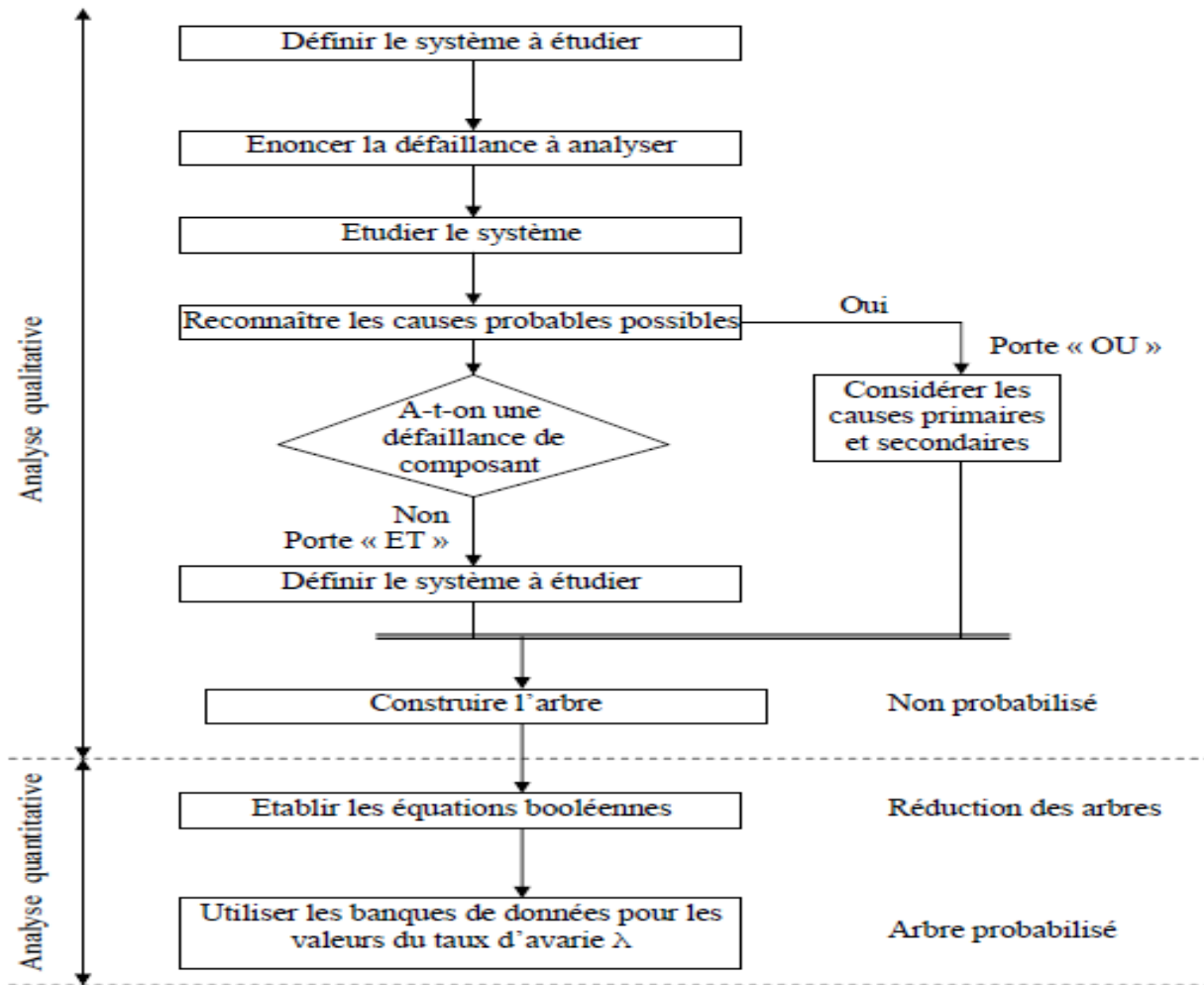


Figure 2.6 : Démarche à suivre pour construire un arbre de défaillances.

Les portes logiques permettent de représenter la combinaison logique des événements intermédiaires qui sont à l'origine de l'événement décomposé.


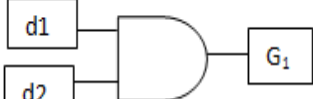
|                                                                                                                                                                                                           |                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p align="center"><b>Porte OU</b></p> <p>L'événement <math>G_1</math> se produit de manière indépendante si l'un ou l'autre des événements élémentaires <math>d_1</math>, ou <math>d_2</math> existe.</p> |  |
| <p align="center"><b>Porte ET</b></p> <p>L'événement <math>G_1</math> ne se produit que si les Evénements élémentaires <math>d_1</math> et <math>d_2</math> existent simultanément</p>                    |  |

Tableau 2.7 : Portes de logiques.

### 2.3.6 Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR) :

La méthode des combinaisons de pannes résumées est justement une méthode permettant de déterminer de manière inductive de telles combinaisons de défaillances, débutant par l'AMDE et se poursuivant par le regroupement des pannes et de leurs combinaisons jusqu'à l'obtention de tous les fonctionnements anormaux des systèmes à analyser; elle se présente ainsi comme une extension et une généralisation de l'AMDE.

La MCPR, est une méthode purement inductive, analyse en premier lieu les effets des modes de défaillances des composants puis étudie les combinaisons de ces modes de défaillances afin de définir des ensembles de pannes correspondant à des fonctionnements anormaux ou à des événements indésirables pour les systèmes à analyser [46].

#### ❖ Principe :

Le principe de cette méthode est le regroupement des pannes ayant les mêmes effets et les critères de sélection des combinaisons des pannes [12].

#### ❖ Objectif :

La méthode des Combinaison de Panne Résumée permet de mettre en évidence les combinaisons de défaillance conduisant à des événements indésirables ainsi que de regrouper les pannes ayant les mêmes effets et de tenir compte des systèmes élémentaires. En plus faciliter de construire d'un Arbre des Causes dans le but d'aborder l'aspect quantitatif manquant à cette méthode.

#### ❖ La méthodologie de l'analyse :

L'utilisation de la MCPR nécessite la mise en œuvre de quatre phases :

- décomposition du système et élaboration d'une AMDE
- élaboration des pannes résumées internes (PRI)
- élaboration des pannes résumées externes (PRE)
- élaboration des pannes résumées globales (PRG) :

La méthode MCPR complète une analyse AMDE et regroupe les pannes ayant les mêmes effets et tient compte des interactions entre les différents sous-systèmes [38].

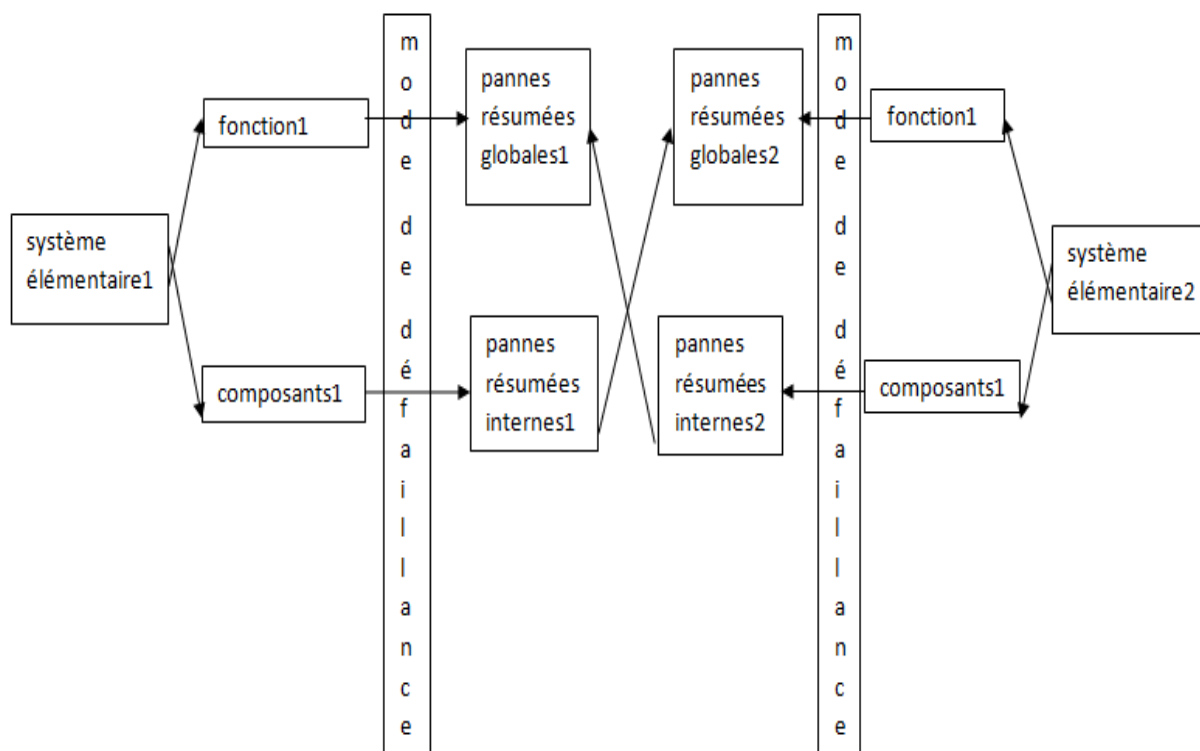


Figure 2.7 : Démarche de la MCPR.

### 2.3.7 Méthode de l'Arbre des Conséquences (MACQ) :

La méthode de l'arbre des conséquences (ou la méthode de l'arbre d'événements) de l'arbre et on déduit l'ensemble des combinaisons des conséquences découlant de l'occurrence de cet événement. On l'utilise fréquemment pour rechercher l'ensemble des conséquences d'un événement non souhaité.

La méthode de l'arbre d'événement trouve ses applications dans les études de sûreté de fonctionnement des systèmes à fonctionnement approximativement binaire (marche ou défaillance), discret (les événements ou les évolutions sont ponctuels dans le temps) et à évolution chronologique. Cette méthode est décrite de nombreux ouvrages [47].

#### ❖ Principe :

L'Analyse par Arbre d' Evénement évalue le potentiel d'accident résultant d'une défaillance d'un équipement ou d'un dérangement de procédé (événement initiateur). À la différence de l'analyse par arbre de panne (une approche déductive) l'AAE est un raisonnement inductif où l'analyste commence par un événement initiateur et développe la séquence probable d'événements qui conduisent aux accidents potentiels, en tenant compte tant du succès que de la défaillance des barrières de sécurité au fur et à mesure que l'accident progresse. Les arbres d'événements fournissent une façon systématique d'enregistrer les



séquences d'accidents et de définir la relation entre les événements initiateurs et la séquence d'événements qui peut résulter en accidents.

### ❖ Objectif :

Les arbres d'événements sont utilisés pour identifier les divers accidents qui peuvent se produire dans un système complexe. À la suite de l'identification des séquences d'accidents individuels, les combinaisons spécifiques de défaillance qui peuvent conduire à des accidents peuvent être déterminées à l'aide de l'arbre d'événements. L'arbre d'événements permet :

- de rechercher toutes les causes et les combinaisons de causes conduisant à l'événement de tête;
- de déterminer si chacune des caractéristiques de fiabilité du système est conforme à l'objectif prescrit;
- de vérifier les hypothèses faites au cours d'autres analyses à propos de l'indépendance des systèmes et de la non-prise en compte de certaines défaillances;
- d'identifier le(les) facteur(s) qui a (ont) les conséquences les plus néfastes sur une caractéristique de fiabilité ainsi que les modifications nécessaires pour améliorer cette caractéristique;
- d'identifier les événements communs ou les défaillances de cause commune [48].

### ❖ La méthodologie de l'analyse :

La démarche généralement retenue pour réaliser une analyse par arbre d'événement est la suivante :

- Définir l'événement initiateur (point de départ de l'arbre) ;
- Identifier et caractériser les barrières de sécurité mises en place pour y faire face ;
- Construire l'arborescence ;
- Décrire les séquences d'événements pour déterminer la nature des événements identifiés en sortie de l'arbre ;
- Quantifier l'arbre, c'est-à-dire évaluer les fréquences d'occurrence des événements en sortie de l'arbre [49].

La figure 2.8 représente un arbre d'événement pour lequel on retient la branche supérieure si le système est dans un état opérationnel quand il est sollicité. L'événement initiateur initie le scénario. Les actions correctrices de l'événement générique peuvent atténuer ou aggraver l'événement initiateur. Une branche particularise les événements génériques en fonction du passé et en fonction de conditions initiales de la séquence. Une séquence est un chemin qui conduit aux conséquences acceptables ou inacceptables.

L'évaluation quantitative des arbres d'événements est simple et rapide. Connaissant pour tous les événements les probabilités de se trouver dans une configuration échec ou défaillance, il est facile de calculer la probabilité d'apparition d'un des scénarios de défaillances [35].

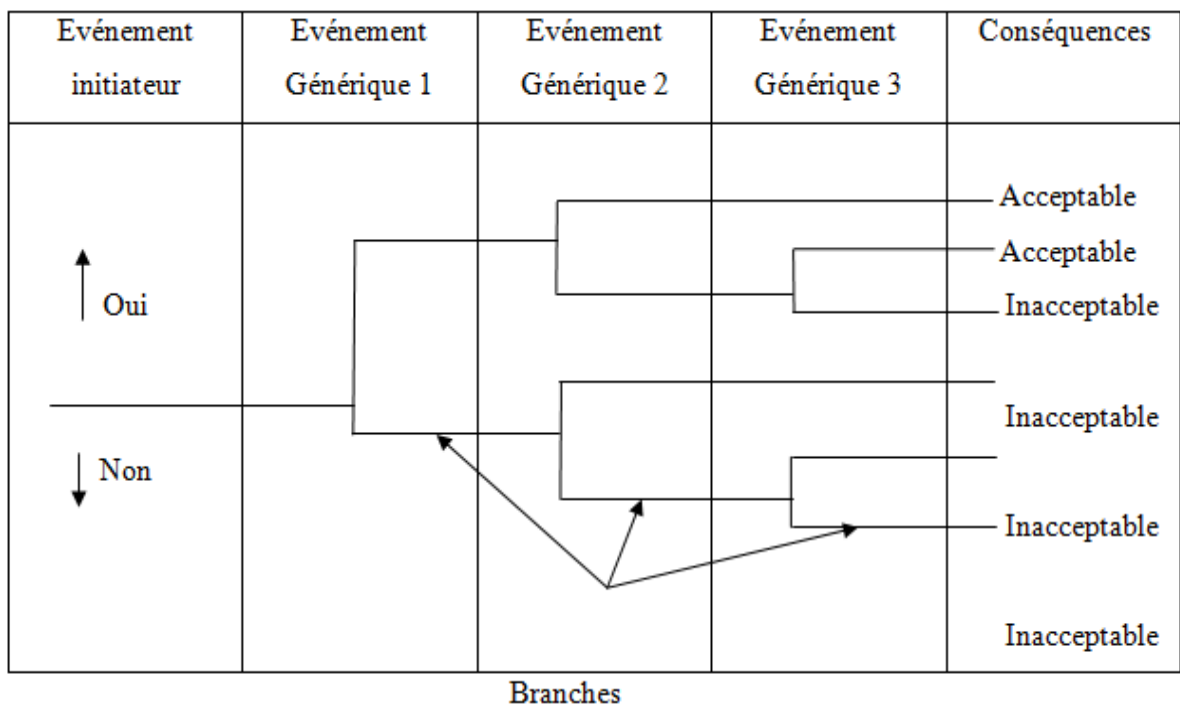


Figure 2.8: Schématisation d'un arbre d'événement.

### 2.3.8 Méthode du Diagramme Causes-Conséquences (MDCC) :

C'est une représentation graphique des liaisons logiques entre les causes et les conséquences d'un scénario d'accident [50]. La probabilité d'occurrence de chacune des conséquences peut être évaluée.

Le diagramme causes conséquences est formé de deux parties :

- le diagramme des conséquences dont on peut déduire de manière directe un arbre d'événements équivalent,
- les diagrammes de causes qui sont les arbres des défauts explicitant la défaillance des diverses branches du diagramme des conséquences précédent,

#### ❖ Principe :

La méthode du diagramme causes-conséquences combine les principes utilisés par la MAC et la MACQ [51]. Les principes de l'élaboration de ce diagramme sont les suivantes :

- sélection d'un événement initiateur, événement critique ou redouté ;
- recherche des causes de l'événement initiateur(MAC) ;
- recherche des conséquences de l'événement initiateur(MACQ) ;

- diagramme causes-conséquences ou diagramme de nœud papillon ;

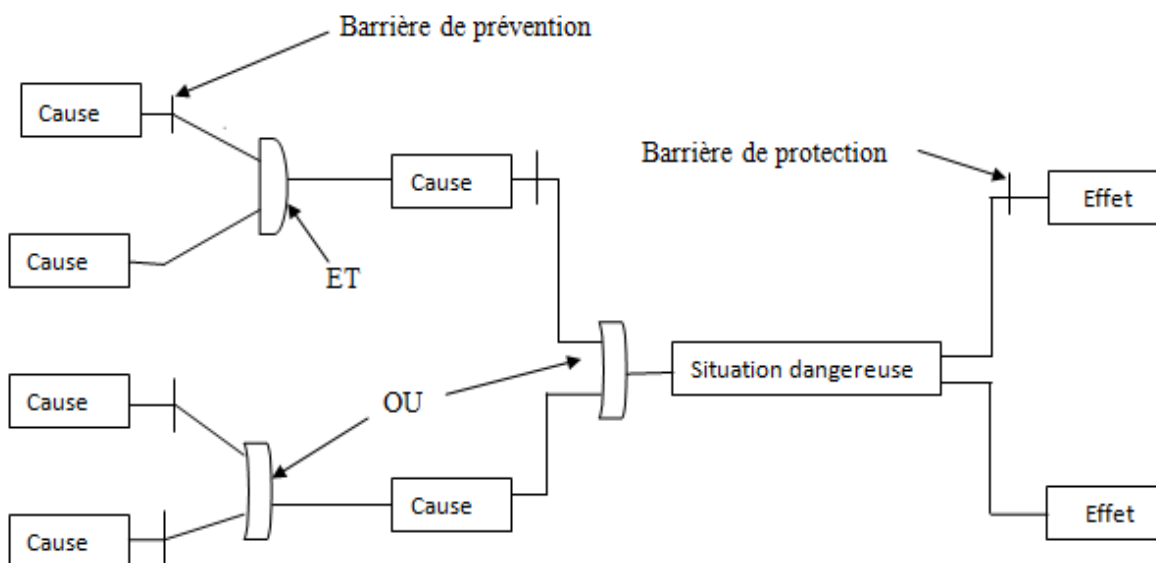


Figure 2.9 : Diagramme « causes-conséquences » d'une situation dangereuse.

### ❖ Objectif :

La méthode du Diagramme Causes-Conséquences a pour objectif de décrire les scénarios d'accident à partir d'événements initiateurs [35].

### ❖ La méthodologie de l'analyse :

Le déroulement du diagramme peut se décrire en cinq étapes

- Placer une flèche horizontale, pointée vers le problème.
- Classifier les causes recherchées en grandes familles
  - ✓ Matière : matière première, fourniture, pièces, ensemble, qualité,
  - ✓ Matériel : machines, outils, équipement, maintenance, ... recense les causes qui ont pour origine les supports techniques et les produits utilisés.
  - ✓ Main d'œuvre : directe, indirecte, motivation, formation, absentéisme, expérience, problème de compétence,
  - ✓ Milieu : environnement physique, lumière, bruit, poussière, localisation, aménagement, température, législation,
  - ✓ Méthode : instructions, manuels, procédures, modes opératoires utilisés,

Ou peut ajouter aux 5M deux critères supplémentaires (Management et Moyens financiers) pour obtenir les 7M.

- Flèches secondaires : Ces flèches secondaires correspondent au nombre de familles de causes identifiées. Il faut les raccorder à la flèche horizontale. Chaque flèche identifie une des familles de causes potentielles.
- Minis flèches : Les causes rattachées à chacune des familles sont inscrits sur des minis flèches. Il faut avoir toutes les causes potentielles.
- Finalisation : Il faut rechercher parmi les causes potentielles, les causes réelles du problème. Il faut agir dessus, les corriger en proposant des solutions [52].

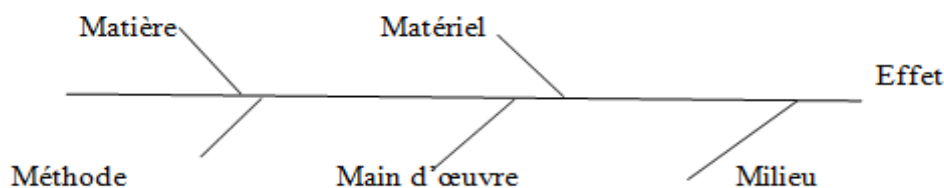


Figure 2.10: Diagramme causes-conséquences (Diagramme d'Ishikawa ou des 5M).

### 2.3.9 Méthode de l'Espace des Etats (MEE) :

La Méthode de l'espace des états permet quant à elle de tenir compte de l'évolution temporelle des composants. De ce fait, elle est par excellence dédiée aux systèmes à composants réparables. Elle possède des états de fonctionnements capables d'identifier les états où la fonction du système est réalisée, des composants du système pouvant être en panne, et des états de pannes capables d'identifier les états où la fonction du système n'est plus réalisée, un ou plusieurs composants du système étant en panne [45].

#### ❖ Principe :

Pour calculer la fiabilité ou la disponibilité d'un système dont les taux de hasard  $h_{ij}$  (défaillance, réparation, ou défaillance à la sollicitation) ne dépendent que de l'état où il se trouve, indépendamment du passé, il faut :

Recenser et identifier les  $n$  états  $E_i$  (opérationnels ou non) occupés par le système au cours de son évolution dans le temps.

- Tracer le graphe sagittal des transitions possibles entre états, exclusifs les uns des autres.
- Affecter les taux de hasard  $h_{ij}$  convenant à celles-ci, et écrire la matrice  $H$  des taux associés au graphe du problème posé (fiabilité ou disponibilité).
- Calculer les probabilités instantanées du vecteur d'état, en intégrant le système différentiel [53].

### ❖ Objectif :

La Méthode de l'Espace d'Etat (MEE) a été développée pour l'analyse de sûreté de fonctionnement de système réparable.

### ❖ La méthodologie de l'analyse :

Construction d'un modèle Considérons un système composé de  $n$  composants, chaque composant ayant un nombre fini d'états de fonctionnement et de panne ; ce système est supposé réparable et chaque composant est réparé après constatation de la panne. Il est composé par : des états de fonctionnement et des états de pannes

La construction du modèle se fait en 3 étapes :

- recensement de tous les états du système. Si chaque composant a 2 états (ok ou panne) et si le système a  $n$  composants, le nombre maximal d'états est  $2^n$ . Au cours de la vie du système, des états de panne peuvent apparaître à la suite de défaillance ou disparaître à la suite de réparation ;
- recensement de toutes les transitions possibles entre ces différents états et l'identification de toutes les causes de ces transitions. Les causes des transitions sont  $g$  en érafflement des défaillances des composants ou la réparation de composants ;
- calcul des probabilités de se trouver dans les différents états au cours d'une période de vie du système, calcul des temps moyens (MTTF, MTBF, MTTR) [54].

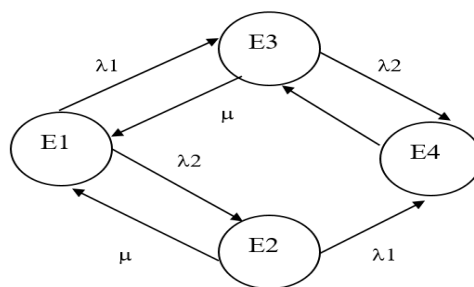


Figure 2.11 : Graphe d'état.

### 2.4 Conclusion :

L'étude de la sûreté de fonctionnement traversez à partir des plusieurs méthodes d'analyses sont faciles à mettre en place, ces outils décrivent et analyse les mécanismes qui conduisent aux incidents et défaillances des systèmes et propose et évalue les solutions à mettre en œuvre pour parer ces problèmes.



**Chapitre 3**  
**Systeme Mécatronique**

## 3.1 Introduction :

D'après la norme française NF E 01-010 [4], un produit mécatronique doit, comme le montre la figure 3.1, pouvoir percevoir son milieu environnant, traiter l'information, communiquer et agir sur son milieu, présenter un niveau complet d'intégration mécatronique, autrement dit associant les domaines de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique, du point de vue fonctionnel et physique. Le processus d'intégration du produit mécatronique est, comme précisé précédemment, un phénomène à deux dimensions: on parle en effet d'intégration fonctionnelle, correspondant au degré d'interaction du dispositif avec les autres dispositifs, et physique, représentant le degré de rapprochement de technologies hétérogènes au sein d'un module.

Depuis quelques années, on voit apparaître un accroissement de l'interaction fonctionnelle avec l'interaction physique, bien qu'il n'existe pas de corrélation entre ces deux aspects. L'essor de la mécatronique est cependant très lié avec celui de l'informatique et la miniaturisation des circuits imprimés, qui permettent d'accroître l'intégration des éléments électroniques dans les corps mécaniques [55].

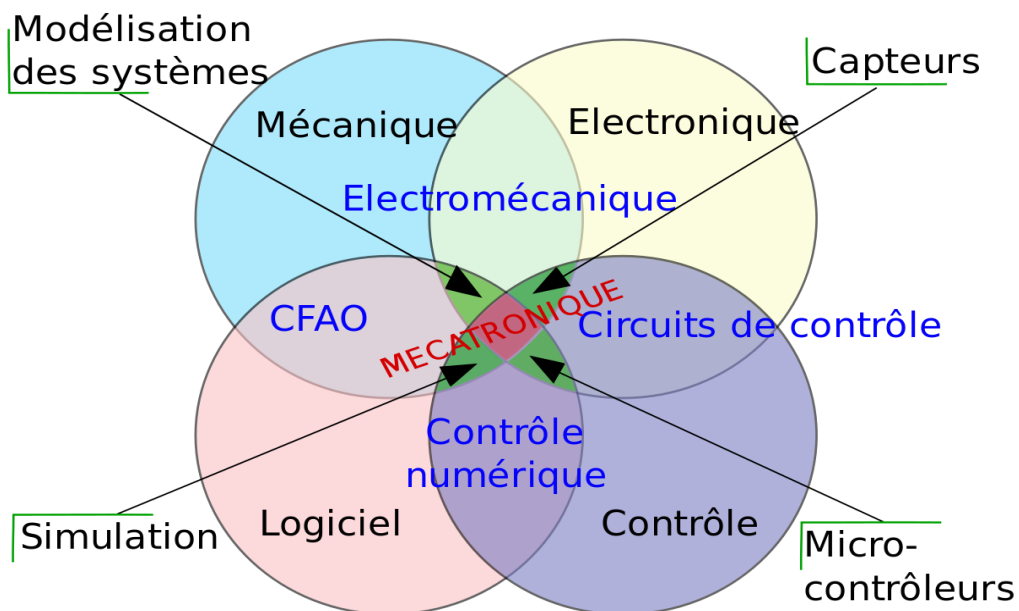


Figure 3.1:Diagramme de Venn de la mécatronique.

## 3.2 Historique :

Avant 1950, les systèmes complexes sont essentiellement des ensembles électromécaniques.

Les années cinquante voient l'apparition de semi-conducteurs. L'électronique de commande et de puissance est née.

Dans les années 1960-1970, l'apparition de calculateurs fiables permet la conception de systèmes de contrôle-commande plus performants et plus flexibles car programmables.

C'est en 1969 qu'apparaît chez Yaskawa Electric Corporation (Japon) le qualificatif «Mécatronique» (mechatronic en anglais) pour caractériser un système intégrant étroitement des mécanismes et une électronique programmable. Plus récemment, le développement des microcontrôleurs à haute intégration et des mémoires Flash ainsi que l'usage de langages de programmation évolués ont permis la conception de systèmes mécatroniques très performants dans des délais très courts.

Aujourd'hui, les systèmes mécatroniques font principalement appel à quatre champs disciplinaires :

-la mécanique, sous la forme de mécanismes et de matériaux (statique, dynamique, RDM...), mais également d'hydraulique et de pneumatique [56].

## 3.3 Définition :

La mécatronique est l'intégration de différentes sciences et techniques de la mécanique, de l'automatique, de l'électronique et de l'informatique. L'évolution rapide des marchés concurrents exige la diminution du temps de développement d'un produit tout en augmentant la qualité et la performance du système. Il est donc nécessaire d'augmenter l'efficacité du processus de conception. Pour répondre à cette nécessité, en complément des outils d'analyse, la simulation, et spécialement le prototypage virtuel, est devenue l'une des clés technologiques.

Il est difficile de trouver des outils de simulation capables d'analyser des systèmes pluridisciplinaires dépendants de différents domaines. Pourtant, un environnement qui permet une simulation intégrée multidisciplinaire de systèmes mécatroniques est nécessaire pour une évaluation fonctionnelle plus précise de la conception du produit et pour améliorer la qualité et l'efficacité de cette conception. La présente contribution décrit une méthode de conception et de simulation des systèmes mécatroniques. On identifie d'abord le modèle de comportement et le modèle géométrique 3D associé. Ensuite, le modèle de



comportement est vu comme un système dynamique hybride formé de deux automates hybrides couplés (Partie Opérative, Partie Commande) [57].

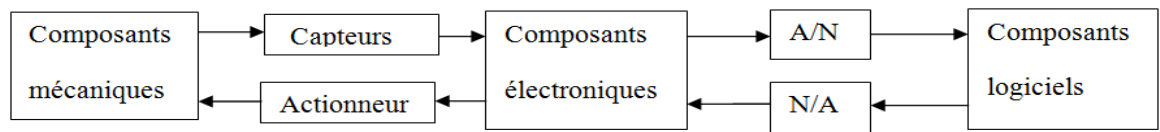


Figure 3.2: Système mécatronique.

### 3.4 Architecture des systèmes mécatroniques :

Malgré la grande diversité de domaines concernés et de déclinaisons applicatives, il est possible de synthétiser de manière générique la description de l'architecture d'un système mécatronique (figure 3.3).

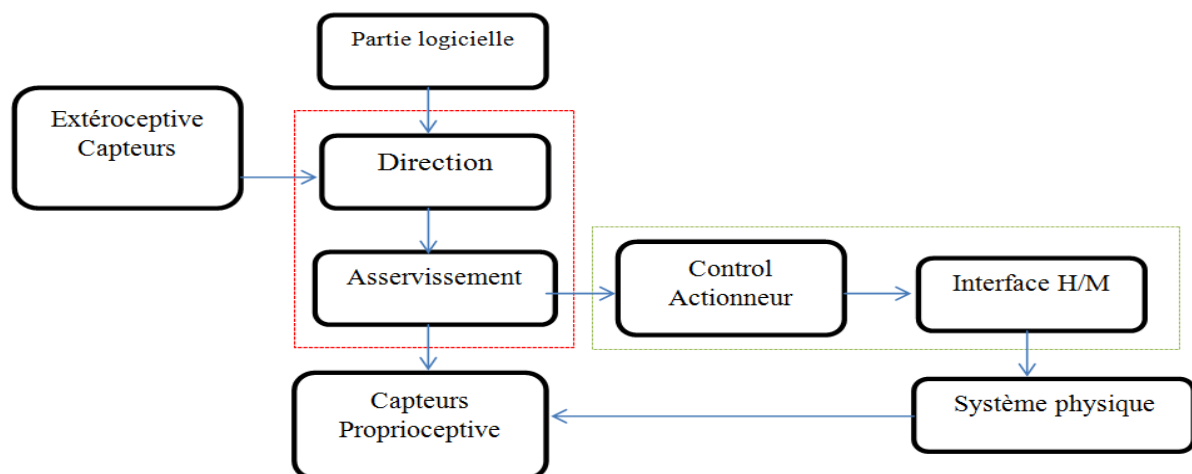


Figure 3.3 : Architecture des systèmes mécatroniques.

Un système mécatronique peut être vu comme des chaînes d'actionneurs supervisées par des algorithmes de commande, potentiellement pilotés par une IHM (Interface Homme-Machine). La chaîne d'actionnement représente la partie opérative du système piloté, ce dernier étant constitué de l'ensemble chaîne d'actionnement + électronique de commande + informatique [58].

### 3.5 Domaines d'application :

Aujourd'hui, de nombreuses applications des systèmes mécatroniques sont développées aussi bien dans notre vie quotidienne (aspirateur, machine à café, machine à laver, ...etc) que dans le secteur industriel (machine-outil, chaîne d'assemblage, ...etc). Nous présentons dans la Figure (3.4) quelques applications des systèmes mécatroniques dans différents domaines tels que la fabrication, le transport, la médecine [59].

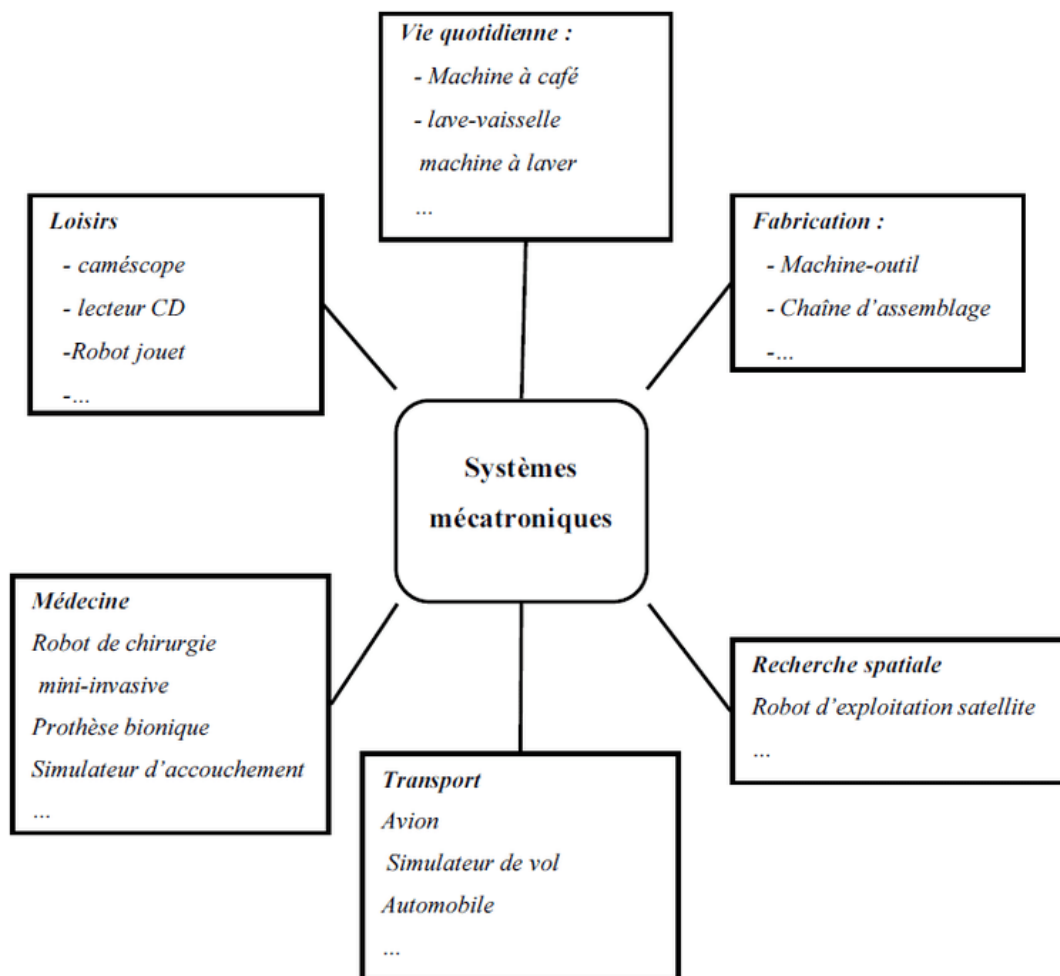


Figure 3.4: Les différents domaines d'application des systèmes mécatroniques.

### 3.6 Démarche de conception mécatronique :

La démarche de conception d'un système mécatronique peut être abordée comme une déclinaison de l'ingénierie des systèmes avec ses spécificités.

Elle fait appel à deux concepts d'ingénierie utilisés dans le PLM (Product Life cycle Management) :

#### 3.6.1 L'ingénierie collaborative :

Aujourd'hui, l'ingénierie collaborative est devenue une nécessité pour les entreprises. Celle-ci doit permettre la création, la gestion et le partage d'informations pertinentes durant tout le cycle de vie du produit.

Cet objectif passe, tout d'abord, par la mise en œuvre de démarches permettant l'utilisation des nouveaux outils informatiques de conception, de calcul et de simulation, dans le respect des règles et des contraintes rattachées au bureau d'étude. De plus, il n'est pas envisageable de faire de l'ingénierie collaborative sans partager les données. Une fois

de plus, cet aspect nécessite l'utilisation d'outils spécifiques dont l'usage ne peut se faire qu'au travers de procédures garantissant la sauvegarde des échanges et l'intégrité des données [60].

L'ingénierie collaborative est l'ensemble des méthodes de travail permettant de :

- Capitaliser l'ensemble des données valides rattachées à chaque projet
- Capitaliser également l'historique du projet sur toute sa durée de vie (choix de conception, décisions...),
- Organiser l'ensemble des tâches nécessaires à la création des données rattachées à un projet (définition et répartition),
- Planifier et optimiser l'exécution de ces tâches afin de minimiser le temps alloué à leur réalisation.
- Bien sûr, cet ensemble de spécifications doit être compatible avec les méthodes de travail imposées par le projet (en d'autres termes, les processus de développement de produits ou ceux rattachés à une étude). Elles doivent également permettre une utilisation optimale des outils informatiques générant les données de chaque projet. Par conséquent, la mise en œuvre de l'ingénierie collaborative ne pourra se faire qu'à la condition de trouver le meilleur compromis entre le trinôme collaboration, processus projet, spécificités des outils [61].

### **3.6.2 L'ingénierie concourante :**

L'ingénierie concourante PLM (Product Life cycle Management) :

L'ingénierie concourante (IC), ou l'ingénierie Simultanée est une logique de conduite de projet qui implique la participation de différents acteurs de la construction en phase de conception et de décision. En partant plus en amont pour finir très vite, selon une logique de « bon du premier coup », elle cherche à réduire les délais des projets.

L'IC implique donc les phases de conception, de construction, d'exploitation-maintenance et de fin de vie dès l'amont du projet. L'ingénierie concourante remplace peu à peu l'ingénierie séquentielle, réglée et linéaire, qui consiste à rechercher des solutions optimales par discipline et/ou par profession pour atteindre la solution globale avec une prise en compte partielle de leur complexité et de leurs interdépendances [62].

L'ingénierie Simultanée se caractérise par :

- Par une notion de simultanéité, qui consiste à une mise en parallèle (dès que possible), des phases de développement du produit permettant d'éviter ainsi tout

gaspillage des temps nécessaires au passage d'une étape à l'autre. Les gains obtenus par cette gestion en « juste à temps » du cycle de développement des produits, permettent une réduction notable des temps de mise sur le marché des produits.

- Par une notion de parallélisme, c'est-à-dire par le découpage du projet « produit » en sous-projets, permettant ainsi l'étude simultanée et coordonnée de sous-ensembles bien identifiés du projet complet. L'équipe de projet définit alors de manière claire les interfaces et interdépendances entre les sous-projets, afin d'assurer une parfaite cohérence de l'ensemble ;
- Par une notion de concurrence, c'est-à-dire l'étude et l'évaluation simultanée de plusieurs alternatives en termes de solutions, afin d'être à même de réaliser les meilleurs choix au plus tôt et éviter ainsi des coûts importants d'itération ;
- Enfin par une notion d'intégration, qui consiste à faire intervenir de manière simultanée l'ensemble des compétences et contraintes relatives au développement d'un produit, grâce à la création d'une équipe de projet multifonctions et multi-savoir-faire. L'ingénierie simultanée permet ainsi des gains notables en favorisant une convergence rapide vers une solution optimisée tout en évitant de nombreux cycles de modifications et itérations [63].

### 3.7 Cycle de développement :

Les systèmes industriels complexes se caractérisent par le fait qu'ils résultent d'une combinaison de sous-systèmes de technologies différentes [1→4]. Le cycle en V, présente sur la figure 3.5, a d'abord été utilisé comme modèle de développement dans les différentes technologies : la mécanique, l'électronique ou le logiciel. Le cycle en V a été ensuite généralisé au développement des systèmes complexes, en particulier des systèmes mécatroniques, afin d'avoir une terminologie commune et de proposer une méthodologie globale, avec des étapes communes aux différentes technologies. Plusieurs auteurs ont montré l'intérêt du cycle en V. Il existe d'autres types de cycles de développement, les plus connus étant les cycles en V, en cascade ou en spirale. Le modèle de développement selon le cycle en V positionne les différentes phases de développement, depuis la spécification jusqu'à la validation produit comme le montre la figure 3.5 [64].

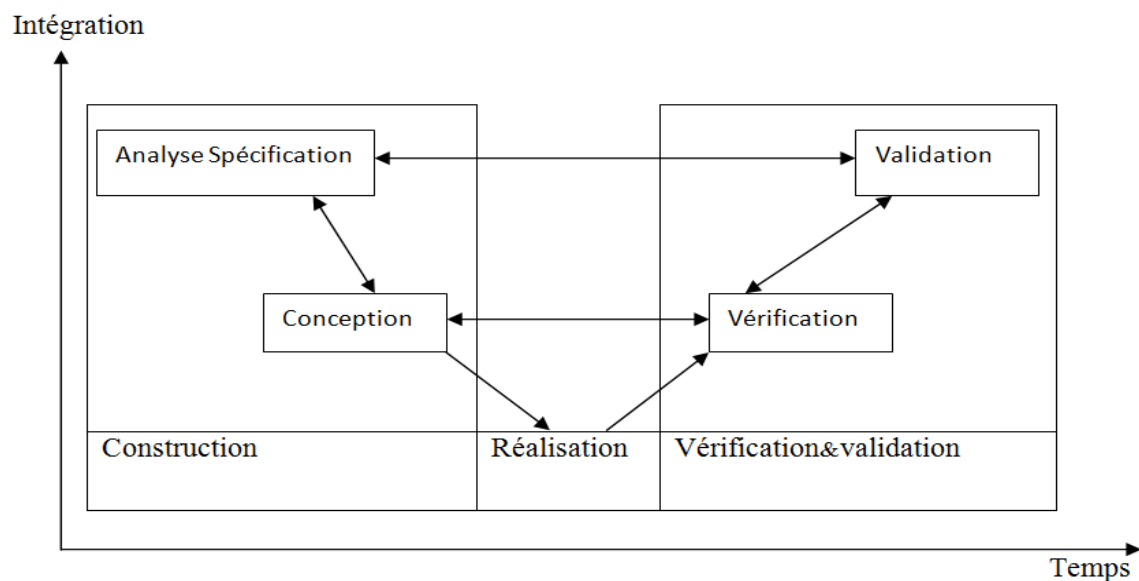


Figure 3.5 : Cycle en V.

Le modèle du cycle en V a été présenté par un axe horizontal en fonction du temps et par un axe vertical selon le niveau d'intégration du système à concevoir. Le développement commence par le bloc de construction du système étudié, la partie descendante de ce modèle, ou les systèmes est graduellement décomposé en divers sous-systèmes et modules jusqu'au niveau composant. La partie montante du cycle en V comprend le bloc de vérification et validation (V et V) du système où les instruments une fois réalisés sont intégrés dans des sous-systèmes graduellement plus grands, jusqu'à ce que le système complet soit construit. Le modèle en V devient un outil général conceptuel pour plusieurs spécialités de l'ingénierie industrielle [65].

### 3.7.1 Analyse/Spécification :

La première phase de développement d'un système consiste dans la réalisation de l'analyse des besoins et des spécifications. Cette phase propose la définition des fonctionnalités, des interfaces, des contraintes et des exigences du système, la préparation du plan qualité, du plan de validation, de l'étude de faisabilité, la définition du niveau de la fiabilité souhaité du système.

Pour un système mécatronique la difficulté majeure est la traduction de la spécification système en spécifications particulières pour chaque composant selon les différentes technologies.

### 3.7.2 Conception :

Suite à l'analyse/spécification, la deuxième phase de développement d'un système est la conception, qui débute par la définition de l'architecture du système, puis des sous-systèmes et de leur fonctionnement, du plan de tests et d'essais et de l'analyse des risques.

Dans le cas des systèmes mécatroniques, une simulation du futur système englobant toutes les technologies est effectuée. La complexité du système, l'interprétation des spécifications par les différentes équipes, sont des points sensibles à prendre particulièrement en considération dans la phase de conception [12].

### 3.7.3 Réalisation :

Cette phase de développement conduit à la réalisation de l'architecture retenue, avec la réalisation de sous-systèmes et l'assemblage progressif, avec en parallèle la réalisation des modules de commande et leur interprétation.

### 3.7.4 Vérification :

Cette phase de développement vise à tester les produits et les composants fabriqués par rapport aux spécifications de la conception, à ce stade, il reste certaines spécifications (exemples le temps de réponse, la synchronisation) qui ne peuvent pas être vérifiées auparavant [65].

### 3.7.5 Validation :

La deuxième phase de V&V est la validation du système final. Il s'agit d'une validation fonctionnelle, une phase importante, où sont constatées les fonctionnalités et le niveau de qualité par rapport aux spécifications/analyse de besoins. Pour un système mécatronique, la validation est un point sensible dû à la combinaison, à la synchronisation et à l'interaction des différentes technologies. Ces contraintes rendent plus difficiles le diagnostic et l'entretien du système mécatronique.

Lors du développement d'un système, le constructeur spécifie non seulement les fonctionnalités, mais aussi les objectifs à atteindre en termes de sûreté de fonctionnement. Ainsi, il est de plus en plus nécessaire d'intégrer la sûreté de fonctionnement dans l'approche système, très en amont dans les projets, dès la première phase du cycle de développement. Cette intégration conduit non seulement à démultiplier les études de fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité et de sécurité, mais aussi à mettre en place une méthodologie transversale qui favorise leur prise en compte dans les projets et à travers les différents étiers liés au développement du système mécatronique.

La spécification des objectifs de sûreté de fonctionnement est accompagnée d'une procédure de validation pour vérifier que ces objectifs ont été atteints. Tout au long du développement du système mécatronique, des méthodes et des techniques spécifiques de la sûreté de fonctionnement devront être appliquées pour atteindre les objectifs exigés [4].

### 3.8 Evolution des produits électromécaniques vers des systèmes mécatroniques :

Les systèmes mécaniques développés depuis les années 80 ont évolué de systèmes électromécaniques présentant des fonctions mécaniques et électriques juxtaposées vers des systèmes intégrant des capteurs, des actionneurs et des systèmes micro-électroniques pilotés par des modules logiciels de plus en plus évolués (Figure 3.6). Ces systèmes intégrés, généralement composés de constituants matériels et logiciels, sont appelés systèmes mécatroniques. La figure 3.7 illustre les différents domaines impliqués lors de la conception de systèmes mécatroniques.

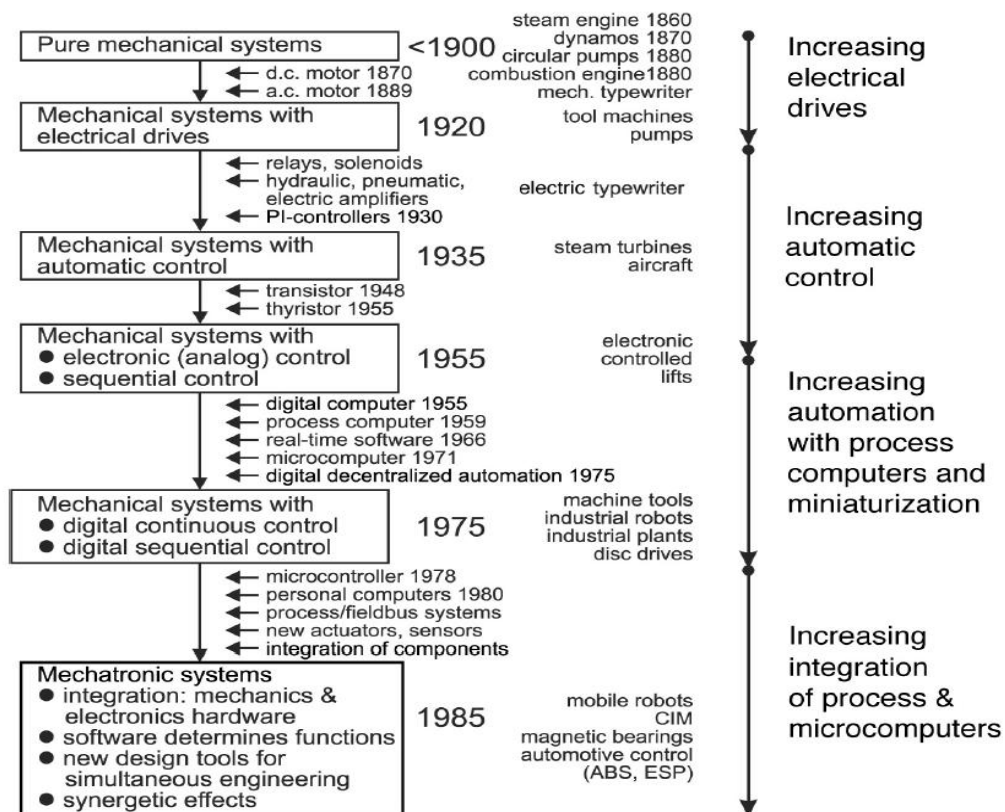


Figure 3.6 : Développement historique des systèmes mécaniques, électriques et électroniques.

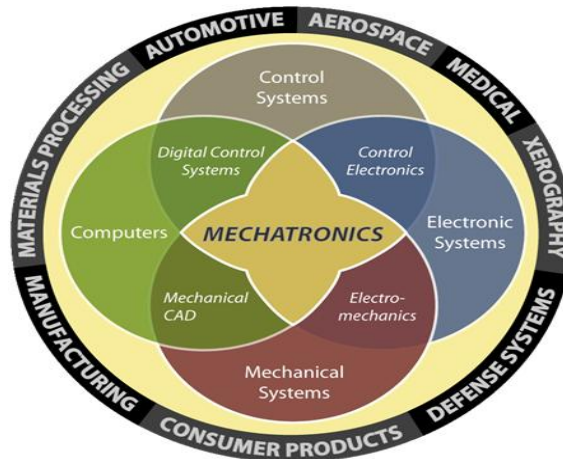


Figure 3.7 : Interactions entre les différentes disciplines composant la mécatronique. Les différentes étapes de cette évolution :

La première étape l'ajout d'actionneurs (Actuators – A). Ils permettent d'augmenter les forces et vitesses d'actionnement. Cette action est menée conjointement par les domaines électronique et mécanique. Afin de fournir la puissance électrique nécessaire à ces actionneurs.

La seconde étape correspond couramment à l'introduction de contrôle embarqué (Embedded Control – E). Cette étape permet d'automatiser et de rendre plus systématiques certains fonctionnements et est menée conjointement par les domaines électronique et informatique.

La troisième étape correspond à l'introduction de capteurs (Sensors – S), permet d'obtenir des informations précises sur le fonctionnement du système ou sur son environnement. Cette phase est généralement sous la responsabilité des domaines mécanique et informatique.

La dernière étape est l'intégration de fonctionnalités de communication (Communication – C) [66], permet l'intégration du sous-système dans un système de plus haut niveau.

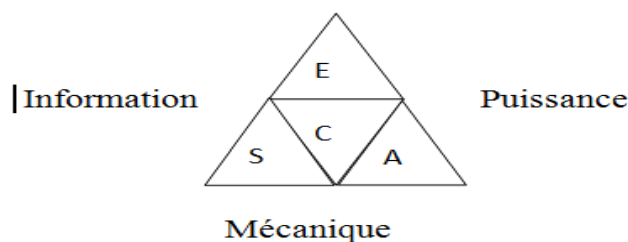


Figure 3.8 : Systèmes mécaniques intégrant l'électronique en interaction avec l'information et la puissance.



## 3.9 Exemples des systèmes mécatroniques :

Pour répondre aux enjeux qualité/coûts/délais imposés par le marché, une nouvelle approche de conception des systèmes est nécessaire pour permettre l'intégration des différentes technologies (la mécatronique) sûres de fonctionnement dès la première phase de développement.

La mécatronique est un mélange de technologies différentes, elle exige pour son développement des équipes pluridisciplinaires avec des langages et des méthodes très différentes [4]. Ce système est utilisé dans tous les domaines industriels intelligents modernes

Comme exemples réels de systèmes mécatroniques, on peut citer les cas présentés sur le schéma de la figure 3.9

- Véhicule automobile moderne : système anti-blocage (ABS: Anti Blocking System), programme de stabilité électronique (ESP: Electronic Stability Program), direction assistée ;
- Avion de chasse;
- Machine-outil à commande numérique;
- Disques durs;
- Les systèmes d'amortissement actif de vérin de pelle mécanique;
- Machines à laver intelligentes;
- Ferroviaire ;

|                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Aéronautique : commandes de vol et actionneur électriques</p>                                                                                    |  <p>Automobile : aides à la conduite, sécurité active, accessoires</p>                                      |
|  <p>Conception d'une commande électronique pour piloter la vitesse de déplacement d'un vérin hydraulique et amortir ses arrêts en fin de course</p> |  <p>Ferroviaire : bogies intelligents (suspension, inclinaison de caisse, essieu radiant, freinage...)</p> |

Figure 3.9 : Exemple de systèmes mécatroniques.

### 3.10 Conclusion :

Les systèmes mécatroniques sont de plus en plus utilisés dans l'industrie. Tous les secteurs sont concernés : l'automobile, l'aéronautique, le nucléaire, le spatial et même des domaines comme le bancaire ou le médical.

Le développement d'un système mécatronique est envisagé selon l'approche de l'ingénierie concourante dans le cadre d'un cycle de développement, est une démarche méthodologique pour maîtriser la conception des systèmes et produits complexes.

La complexité importante de systèmes mécatroniques et la réduction des coûts de conception et d'exploitation incitent les industriels à maîtriser davantage la sûreté de fonctionnement.

Notre objectif est l'étude et l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques, c'est le but de chapitre 4.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

## **Chapitre 4**

# **Evaluations de la SdF d'un Système actionneur intelligent**

## 4.1 Introduction :

L'apparition des systèmes mécatroniques depuis une vingtaine d'années peut être considérée comme une révolution pour le monde industriel. L'utilisation de ces systèmes s'est généralisée rapidement et influence actuellement la quasi-totalité des secteurs de l'industrie [67]. Le concept de démarche mécatronique se caractérise principalement par la notion de couplage entre différentes technologies, différentes disciplines scientifiques ou domaines physiques. Le fondement de la mécatronique est d'exploiter au maximum ces couplages pour offrir des performances techniques et économiques toujours plus élevées, sources de valeur ajoutée. L'augmentation des niveaux de couplages entraîne inéluctablement une explosion de la complexité des systèmes, de leur contrôle, et des processus de conception et fabrication.

Et avant d'aborder « la fiabilité Mécatronique » qui représente le thème central de ce travail, essayons de faire un tour d'horizon afin de cerner ce que la bibliographie entend par le terme « Mécatronique ».

La complexité des systèmes mécatroniques est un défi majeur pour la Sûreté de Fonctionnement (SdF), puisque la mécatronique est une combinaison synergique et systémique de mécanique des solides et des fluides, d'électronique, et d'informatique en temps réel...qui reflète cette complexité. L'intérêt de ce domaine d'ingénierie interdisciplinaire est de concevoir des systèmes automatiques puissants et de permettre le contrôle de systèmes complexes [68].

Dans la suite de notre travail, lors d'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatronique, on définit l'interaction multi domaine comme étant l'influence de la dégradation ou de la défaillance d'un composant d'un domaine (électrique, électronique...) sur un autre composant d'un domaine différent (ex : mécanique) et sur la défaillance de ce dernier. Il s'agit donc d'une relation mutuelle cause/effet de dysfonctionnement, entre divers domaines (mécanique, électronique, logiciel...) dans le même système mécatronique [69].

## 4.2. Méthodologie proposée :

La méthodologie proposée est basée sur l'analyse quantitative du système mécatronique étudié, afin d'évaluer la fiabilité de système à par de ses composants, nous proposons une méthodologie décrite par les étapes suivantes :

### 4.2.1 Analyses fonctionnelle et organique :

L'analyse fonctionnelle permet la description des modes de fonctionnement du système étudié et des sous systèmes identifiés ainsi que la connaissance de ses fonctions externes et

internes à partir du profil de mission. L'analyse fonctionnelle est décomposée en deux parties:

- L'analyse fonctionnelle externe permet d'illustrer les relations entre le système et son milieu extérieur.
- L'analyse fonctionnelle interne a pour but de réaliser une décomposition arborescente du système en éléments. Elle décrit les fonctions du système mais aussi les relations entre les composants et par conséquent les interactions physiques entre les différentes entités du système. Elle doit également mettre en évidence les caractères hybride, dynamique et reconfigurable définis à ce niveau de l'analyse.

#### **4.2.2 Analyse dysfonctionnelle :**

L'analyse dysfonctionnelle a pour objectif d'identifier les différents modes de défaillance et de dégradation des différents composants du système et d'en voir l'effet sur le système. De plus, elle permet d'évaluer les modes de défaillance les plus critiques. Pour effectuer l'analyse dysfonctionnelle, nous avons besoin des informations obtenues suite à l'analyse fonctionnelle. En d'autres termes, les sorties ou les résultats de l'analyse fonctionnelle et constitue les entrées ou les bases de l'analyse dysfonctionnelle.

#### **4.2.3 Recueils d'informations :**

Le dysfonctionnement du système est provoqué par la défaillance d'un ou plusieurs composants. Les systèmes mécatroniques sont des systèmes complexes qui regroupent différentes technologies. Il est donc nécessaire de déterminer la fiabilité des différents types de composants qui constituent le système mécatronique. Il existe plusieurs sources d'informations où est synthétisée toute la connaissance disponible sur les paramètres influençant la fiabilité des composants. Parmi les sources les plus utilisées nous citons : les recueils d'informations, les avis d'experts.

#### **4.2.4 Modélisation qualitative :**

La modélisation qualitative permet de construire, un modèle fonctionnel et dysfonctionnel et ainsi de représenter le comportement du système durant son fonctionnement nominal et en présence de fautes. Les résultats de ces deux analyses constituent le point de départ dans la construction du modèle de fiabilité.

#### **4.2.5 Modélisation dynamique :**

La modélisation dynamique constitue la première étape de l'analyse quantitative qui consiste à évaluer la probabilité d'apparition d'un événement pouvant se produire sur un système. Cette modélisation consiste, d'une part, à construire un modèle (représentant le système avec ses interactions fonctionnelles et physiques) ; d'autre part, de construire les lois de distribution de la fiabilité des composants constituant le système mécatronique. Les modélisations dynamiques fonctionnelle et dysfonctionnelle du système, tenant compte du profil de mission, et les résultats de la modélisation qualitative fonctionnelle et dysfonctionnelle permettent de connaître les variables internes et les temps de fonctionnement de chaque composant. Habituellement, pour les composants électroniques, la loi exponentielle est tout à fait adaptée pour représenter les défaillances. Pour les composants logiciels, le modèle de Musa peut être utilisé. Enfin, pour les composants mécaniques standards, la loi normale peut être appliquée dans certains cas de dégradation, et on peut utiliser les recueils de données. La loi de Weibull avec ses différentes extensions (2 ou 3 paramètres, composée, mixée) est très riche et peut être utilisée pour différentes technologies et pendant les différentes phases du cycle de vie du produit.

#### **4.2.6 Simulation et analyse des résultats :**

La simulation consiste d'identifier les différents états de fonctionnement du système considérés dans le modèle : fonctionnement normal, fonctionnement dégradé (en présence de défaillance), fonctionnement défaillant, et d'estimer la fiabilité du système à partir de la simulation de la fiabilité de ses composants.

L'analyse des résultats de simulation consiste à évaluer les valeurs de fiabilité obtenues et de comparer ces valeurs afin d'améliorer la fiabilité du système.

### **4.3. Application sur un système mécatronique :**

#### **4.3.1 Présentation de système :**

Comme exemple de système mécatronique, on se propose un système « actionneur intelligent » présenté sur la figure 4.1. L'interaction étudiée est celle entre le palier et la bobine dans le système d'actionneur intelligent « Voice Coil » [69]. Ce dernier produit de la société Pack'Aero, est destiné à la réalisation de la fonction de déchargement de wagonnets. Le doigt de l'actionneur se met en obstacle pour ouvrir le volet et libérer le chargement du wagonnet sans arrêt [70].

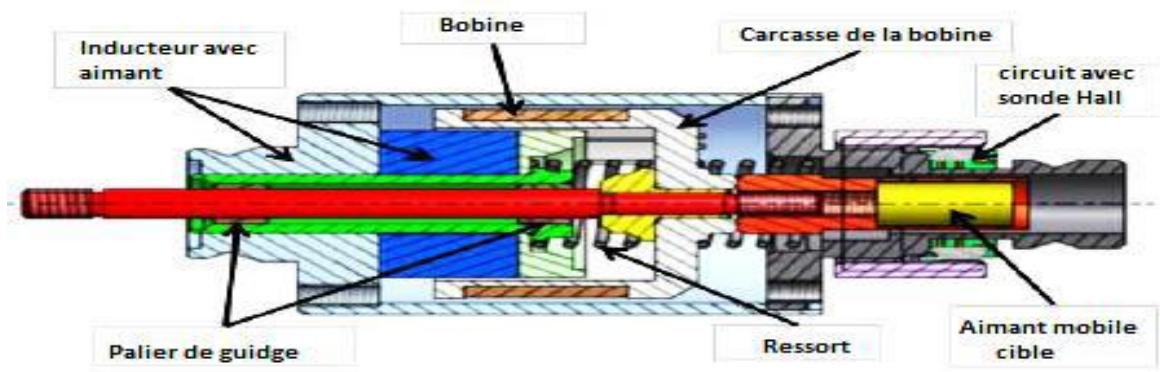


Figure 4.1 : Actionneur Intelligent.

L'architecture organique a pour objectif de décomposer le système en sous-systèmes et composants comme le montre la table 4.1 [69].

|                                                                                                       | Sous-systèmes                                                     | Composants                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| A<br>C<br>T<br>I<br>O<br>N<br>N<br>E<br>U<br>R<br>I<br>N<br>T<br>E<br>L<br>L<br>I<br>G<br>E<br>N<br>T | Carte de commande et de gnostic actionneur intelligent            | Alimentation régulée                              |
|                                                                                                       |                                                                   | Microcontrôleur (HW+SW)                           |
|                                                                                                       |                                                                   | Capteur de courant                                |
|                                                                                                       |                                                                   | Pont en H                                         |
|                                                                                                       | Carte de conditionnement de la sonde à effet Hall                 | Carte de conditionnement de la sonde à effet Hall |
|                                                                                                       | Corps de l'actionneur                                             | Palier de guidage                                 |
|                                                                                                       |                                                                   | Sonde (capteur à effet Hall)                      |
|                                                                                                       |                                                                   | Inducteur avec aimant                             |
|                                                                                                       |                                                                   | Ressort de rappel                                 |
|                                                                                                       | Equipage mobile                                                   | Bobine + carcasse bobine                          |
| Aimant (capteur à effet Hall)                                                                         |                                                                   |                                                   |
| Tige                                                                                                  |                                                                   |                                                   |
| Poussoir (butée)                                                                                      |                                                                   |                                                   |
| Faisceau électrique                                                                                   | Alimentation électrique/ corps actionneur                         |                                                   |
|                                                                                                       | Alimentation entre la carte et l'équipage mobile                  |                                                   |
| Support mécanique de la carte électronique/ corps de l'actionneur                                     | Support mécanique de la carte électronique/ corps de l'actionneur |                                                   |
| Fixation du corps de l'actionneur sur la machine                                                      | Fixation du corps de l'actionneur sur la machine                  |                                                   |

Tableau 4.1 : Composition de l'actionneur intelligent



Dans le Tableau 4.2, nous présentons les distributions dysfonctionnelles associées aux composants, celons le recueil d'expérience cité dans [68], sur la nature des composants (électriques, mécaniques, électroniques, logiciels, ...) du système étudié.

| Composant                | Taux de défaillance         |
|--------------------------|-----------------------------|
| Carte de commande        | $1.72E - 07 \text{ h}^{-1}$ |
| Carte de conditionnement | $1.16E - 06 \text{ h}^{-1}$ |
| Bobine                   | $5.10E - 05 \text{ h}^{-1}$ |
| Inducteur                | $5.10E - 05 \text{ h}^{-1}$ |
| Palier de guidage        | MTTF= $1.31E+04 \text{ h}$  |
|                          | Beta =1.5                   |
| Sonde à effet Hall       | $1.21E - 07 \text{ h}^{-1}$ |

Tableau 4.2 : Taux de défaillance des composants.

Les figures ci dessous représentent le développement de la fiabilité des composants du système utilisant le logiciel Matlab.

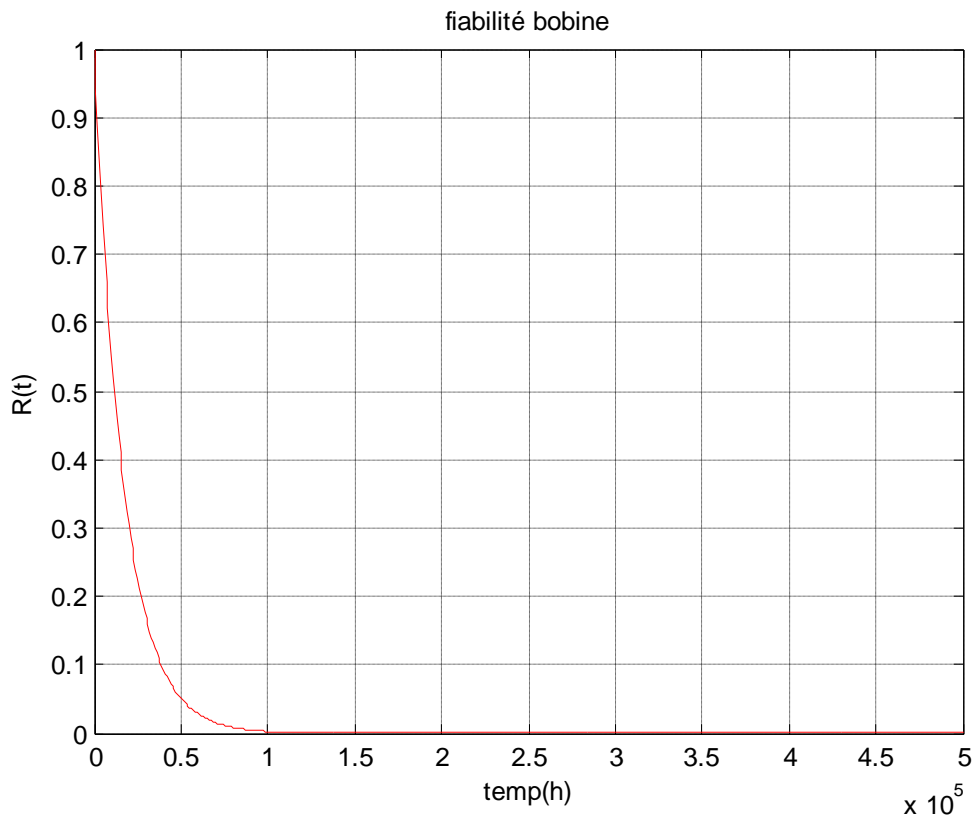


Figure 4.2 : Fiabilité bobine.

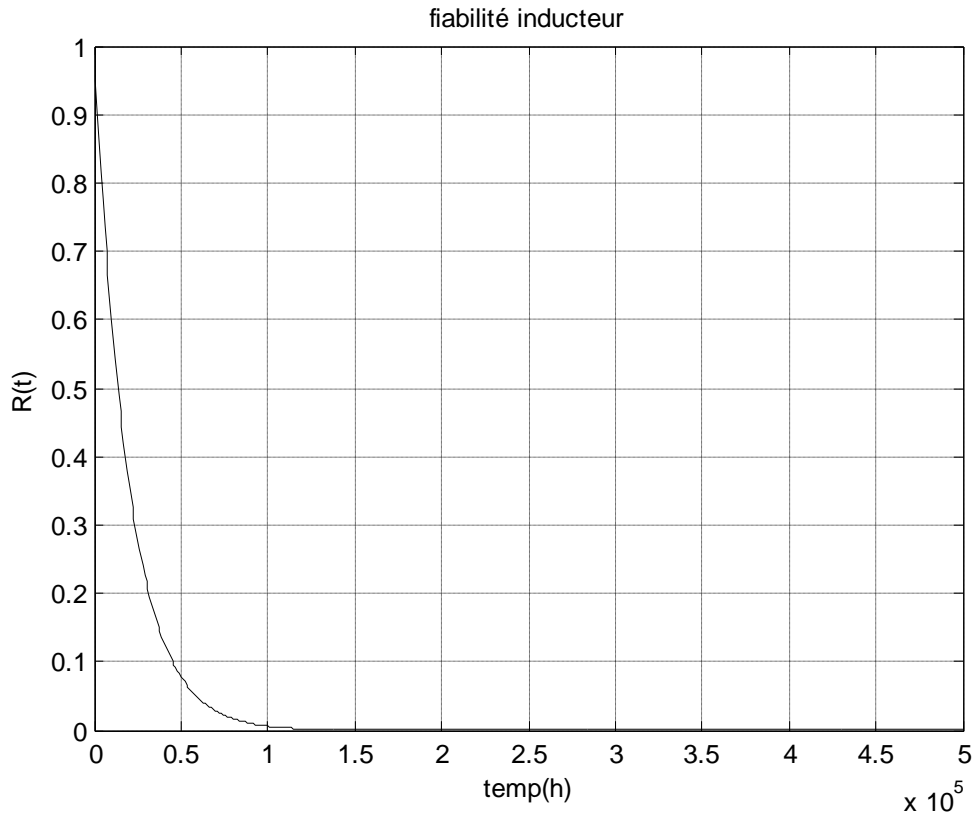


Figure 4.3: Fiabilité inducteur.

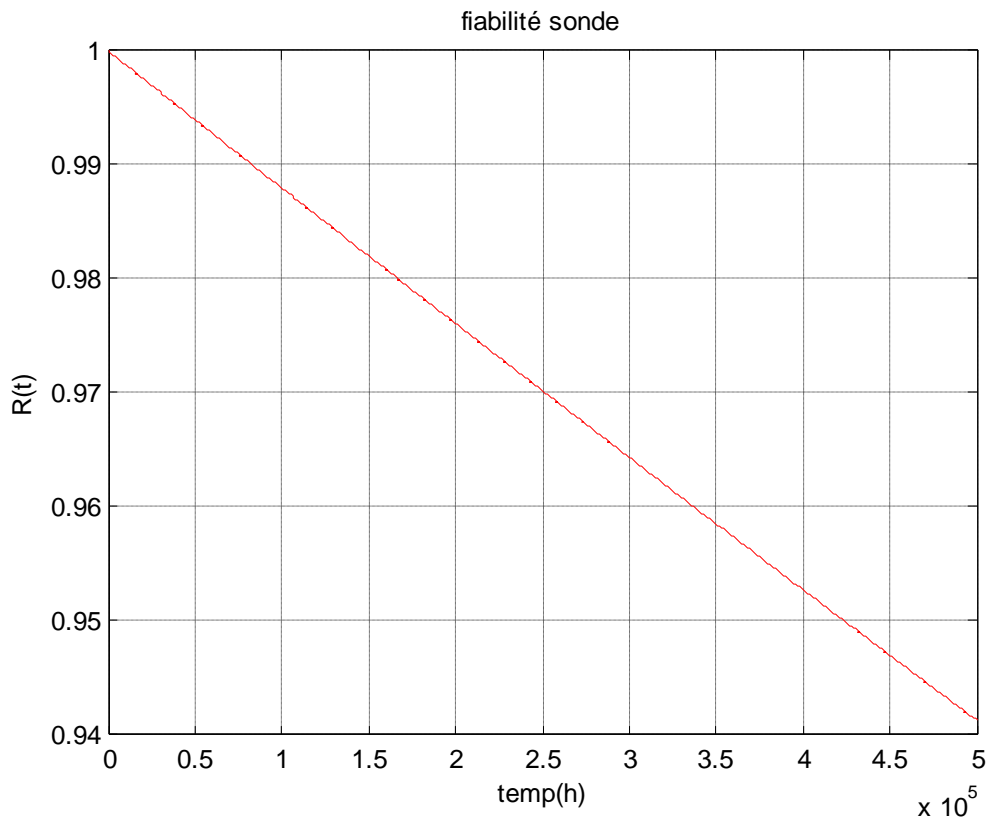


Figure 4.4: Fiabilité sonde.

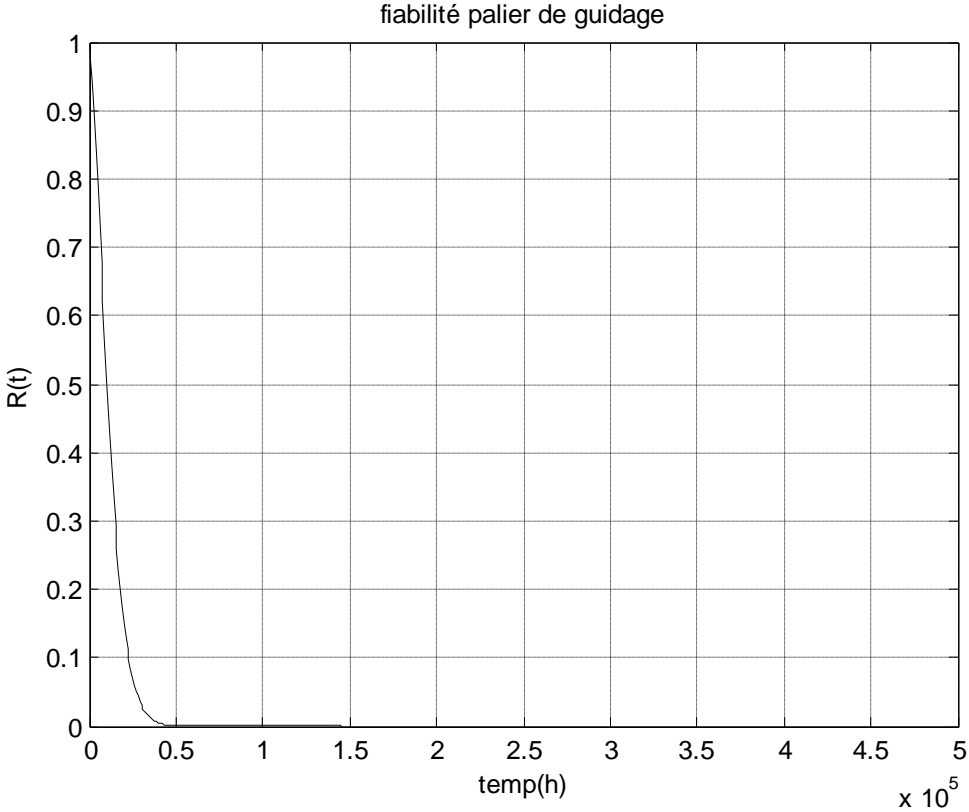


Figure 4.5: Fiabilité palier de guidage.

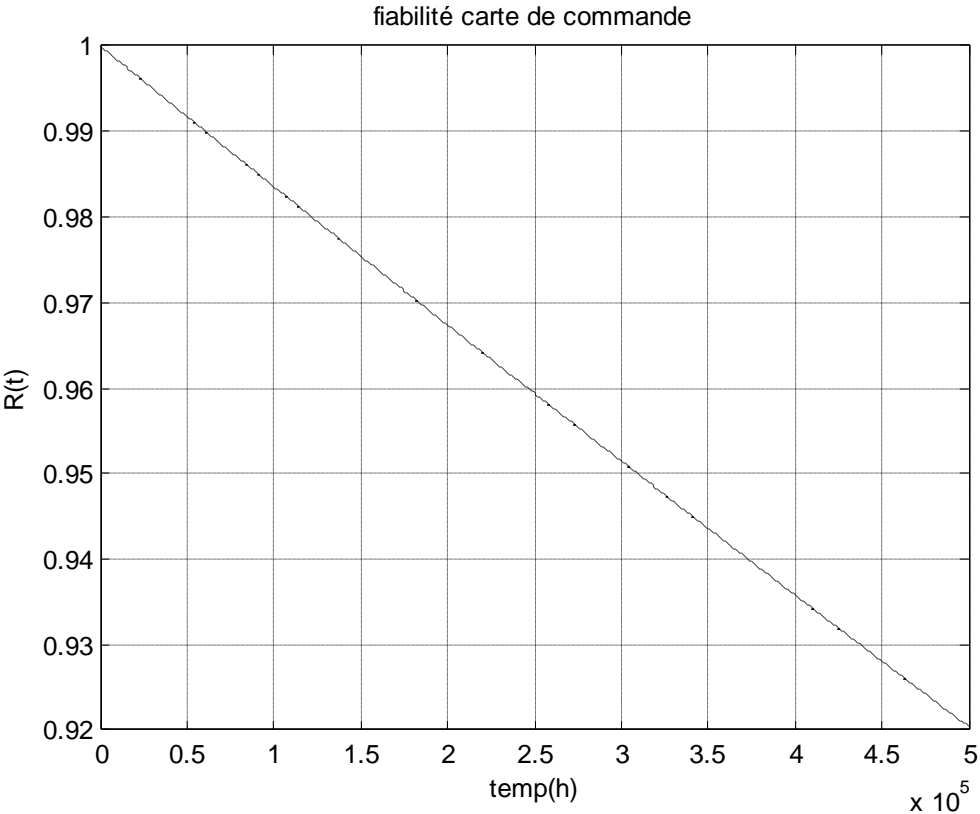


Figure 4.6: Fiabilité carte de commande.

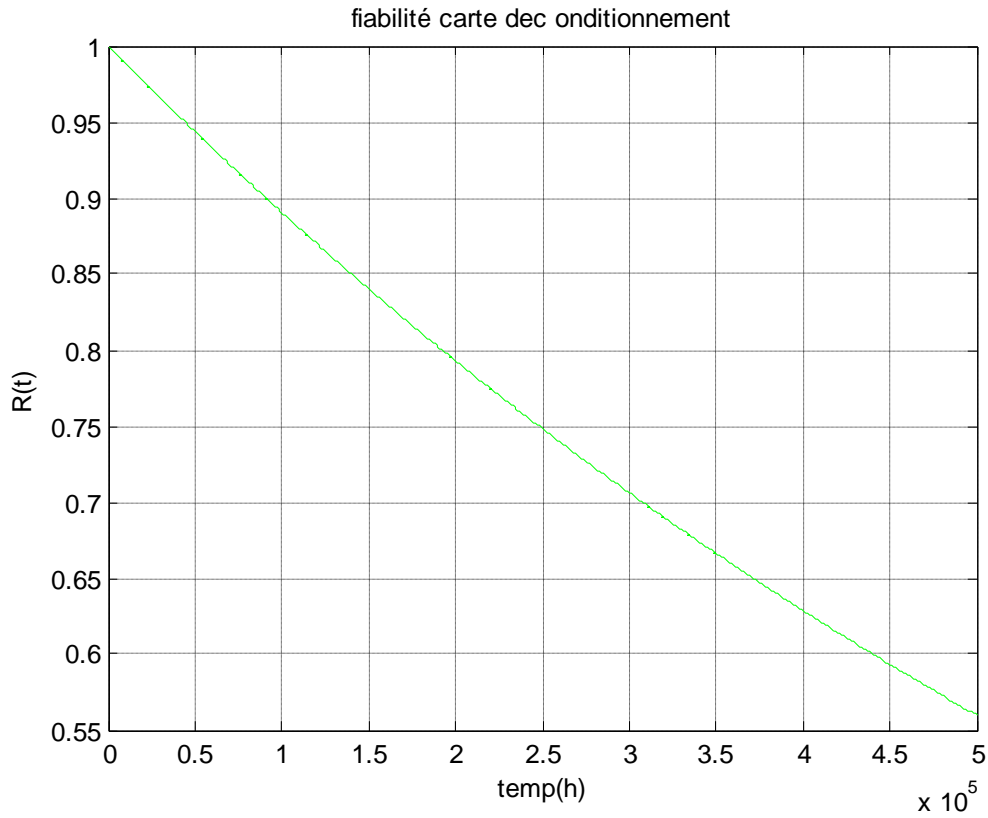


Figure 4.7: Fiabilité carte de conditionnement.

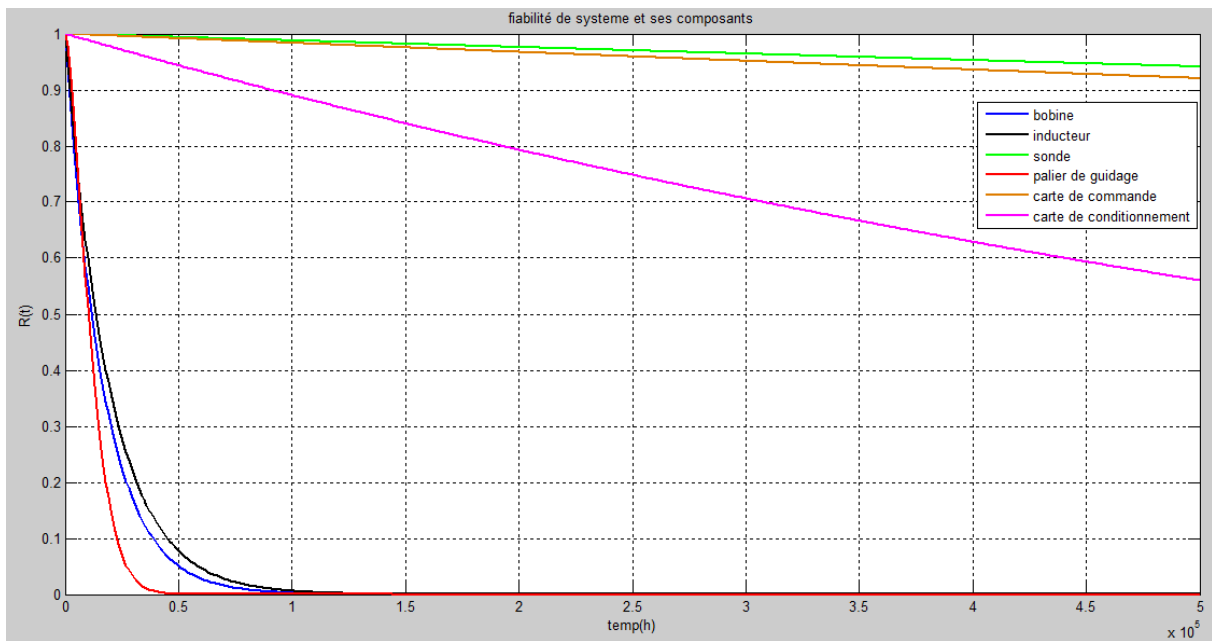


Figure 4.8: Fiabilité des compenent du système.

La figure (4.8) représente le développement de la fiabilité des composants du système (bobine, inducteur, sonde, valve, capteur, actionneur) sur le même graphe pour voir l'élément le plus fiable et le moins fiable.

Nous constatons sur la figure 4.8, que le palier de guidage est l'élément le moins fiable et la sonde c'est l'élément le plus fiable.

#### **4.4. Conclusion :**

Dans ce travail, nous avons présenté une démarche pour l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique. Cette méthodologie est basée sur l'étude de la fiabilité des composants du système mécatronique étudié pour voir l'élément le plus fiable et l'élément le moins fiable

Cette étude nous permettons d'avoir l'impact de chaque composant sur la fiabilité du système.

Après l'analyse des résultats obtenus de chaque composant de cas d'application, il s'est avéré que le palier de guidage est l'élément le moins fiable et la sonde l'élément le plus fiable.

L'étude de la fiabilité des composants du système ont une influence importante sur la fiabilité du système, et nous permettons d'avoir l'impact de chaque composant sur le système.

## **Conclusion :**

Dans ce travail, nous avons exposé la problématique liée à la fiabilité des systèmes mécatroniques et nous avons proposé une méthode dans le but de faire face aux problèmes engendrés par les spécificités de ces systèmes lors de l'étude de la fiabilité. La première partie de la méthode proposée est l'analyse qualitative qui fournit toutes les informations nécessaires sur le fonctionnement et le dysfonctionnement d'un système mécatronique. La deuxième partie de la méthodologie est l'analyse quantitative qui permet d'estimer et de quantifier la fiabilité des composants du système mécatronique.

Dans cette application, nous avons procédé à une description succincte de la structure du système ainsi que sa décomposition en plusieurs sous-systèmes, cette tâche nous a facilité la compréhension du rôle et de la fonction de chaque composant, nous avons effectué une analyse basée sur l'utilisation des lois probabilistes, qui nous a permis d'évaluer la fiabilité du système.

Une étude quantitative est faite pour estimer la fiabilité des composants qui mène le système à l'état de la défaillance, trouvé par simulation sous le logiciel Matlab.

L'étude de la fiabilité des composants du système ont une influence importante sur la fiabilité du système, et nous permettons d'avoir l'impact de chaque composant sur le système.

## Bibliographie

- [1] T.Touati, Contribution à l'étude de la sûreté de fonctionnement d'une station d'épuration-cas de la station d'épuration d'Ain El Houtz-Tlemcen, Mémoire de Master, Université Aboubekr Belkaïd-Tlemcen, 2017.
- [2] L. Cauffriez, D. Rénaux, Modélisation des paramètres de la sûreté de fonctionnement par des fonctions de Transfert: Application à la disponibilité, Conférence Papier de L'Université Polytechnique Hauts-de-France, 2002.
- [3] D.E.Fethallah, M.E.Benouis, L'évaluation de la disponibilité et de la fiabilité des composants réparables, Mémoire de Fin d'Etudes Master (LMD) de L'Université Dr. Tahar Moulay de Saida, 2018.
- [4] L. Boucerredj, Sûreté de fonctionnement "recherche des scénarios critiques dans les systèmes mécatronique", Thèse de doctorat de l'Université Badai Mokhtar Annaba, 2015.
- [5] H. Hadj Mabrouk, Introduction à la sécurité et à l'analyse des risques technologiques et humains, 3eme Symposium International sur la Maintenance et la Maitrise des Risques, Rabat, 2010.
- [6] Y. El attabi, La sûreté de fonctionnement (SDF), Cour, 2011.
- [7] <http://jackadit.com/index.php?page=inds3>
- [8] [http://chohmann.free.fr/maintenance/mtbf\\_mttr.htm](http://chohmann.free.fr/maintenance/mtbf_mttr.htm)
- [9] <http://tpmattitude.fr/mttr.html>
- [10] H. Kahal, Réseaux Bayésiens Dynamiques: Application aux réseaux électriques, Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magistère en électrotechnique de L'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran
- [11] Cours fiabilité des Systèmes, [https://www.doyoubuzz.com/var/f/qk/ro/qkroqn1-pf5ti6bmHUScaBE94ly7YW2r8QZwNseROgV\\_master.pdf](https://www.doyoubuzz.com/var/f/qk/ro/qkroqn1-pf5ti6bmHUScaBE94ly7YW2r8QZwNseROgV_master.pdf)
- [12] A.G.Mihalache, Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué, Sciences de l'ingénieur de L'Université d'Angers, 2007.
- [13] K. Rhazali, Optimisation de la disponibilité des systèmes multi-Etats, Projet industriel de fin d'études, 2015.
- [14] C. Bouchikhi, Contribution à l'élaboration d'une Méthode d'estimation du paramètre D'origine de modèle Weibull, Mémoire pour l'obtenir de diplôme de Magister, Université d'Oran, 2013.
- [15] A. Cabarbaye, L'estimation en sûreté de fonctionnement, Livre, Cab Innovation, 2017.

- [16] Pr. A. Bellaouar, S. Beleulmi, Fiabilité maintenabilité disponibilité, de L'Université Constantine 1, 2013.
- [17] N. Yvonnick, Qu'est-ce que la loi Gamma, Application a l'analyse de la série criminelle d'Andrej Tchikatilo, de L'Université Européenne de Bretagne, crpcc-lpe Modevaiaa, camaret, 2013.
- [18] P. Dusart, Cours de Statistiques inférentielles, Licence 2-S4, 2018.
- [19] P. Magain, Introduction aux méthodes quantitatives et éléments statistique, 2013, [http://www.astro.ulg.ac.be/cours/magain/STAT/Stat\\_Main\\_Fr/Chapitre5.htm](http://www.astro.ulg.ac.be/cours/magain/STAT/Stat_Main_Fr/Chapitre5.htm)
- [20] <http://tice.inpl-nancy.fr/modules/unit-stat/chapitre2/index.html>
- [21] P.MILAN, Lois de probabilité à densité Loi normale, Cours, 2015.
- [22] F. Cotted-Emard, Probabilités et tests d'hypothèses, Boeck Supérieur Amazon France, Livre, 2014.
- [23] S. Amirouche, S. Ait hamou, Dimensionnement des collecteurs de la Station d'épuration de la ville d'Akbou.wilaya de Bejaia, Mémoire de fin d'études de L'Université Bejaia, 2017.
- [24]M.I.H.M. Guetarni, Analyse Quantitative des Risques: Application sur les Bacs de Stockage, Thèse de doctorat de L'Université d'Oran 2, 2019.
- [25] A .Desroches, D. Baudrin, M. Dadoun, L'analyse préliminaire des risques : principes et pratiques, Management et informatique, Livre, Hermes science publications, 2009.
- [26]<http://coursenvrac.eklablog.com/l-analyse-preliminaire-des-risques-dangers-apr-d-a117786692>[http://www.astro.ulg.ac.be/cours/magain/STAT/Stat\\_Main\\_Fr/Chapitre5.htm](http://www.astro.ulg.ac.be/cours/magain/STAT/Stat_Main_Fr/Chapitre5.htm)
- [27] Y. Sahraoui .Evaluation de performance de la sureté de fonctionnement par l'utilisation des réseaux de files d'attente. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master.de L'Université de Msila, 2012.
- [28] G. Lasnier, Sureté de fonctionnement des équipements et calculs de fiabilité, Livre, Lavoisier, 2011.
- [29] G. Landy, AMEDC : guide en pratique, Livre, Afnor, 2007.
- [30] A. Cabarbay, A. Cabarbay, A. Cabarbay, La fiabilité aujourd'hui, La fiabilité en pratique, Livre, Cab Innovation Editeur, Amazon France, 2019.
- [31][http://gpp.oiq.qc.ca/analysede\\_modes\\_de\\_defaillance,\\_de\\_leurs\\_effets\\_combines\\_et\\_de\\_l\\_eur\\_criticite\\_\(amdec\).htm](http://gpp.oiq.qc.ca/analysede_modes_de_defaillance,_de_leurs_effets_combines_et_de_l_eur_criticite_(amdec).htm)
- [32]M. Thomas, Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines, Livre, Presses de l'Université du Québec, Canada, 2012.



- [33] A. Ghenai, Évaluation de la fiabilité des systèmes embarqués dès la phase de conception par réseaux de Pétri temporels étendus, Thèse de Doctorat en Sciences de L'Université Constantine 2.
- [34] <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:2w9OLJYMsTAJ:https://yard.nl/fichiers/BTS1-SDF.pdf+&cd=7&hl=ar&ct=clnk&gl=dz&client=firefox-b-d>
- [35] [http://www.unit.eu/cours/cyberrisques/etage\\_3\\_aurelie/co/Module\\_Etage\\_3\\_synthese\\_37.html](http://www.unit.eu/cours/cyberrisques/etage_3_aurelie/co/Module_Etage_3_synthese_37.html)
- [36] M.Sallak, Evaluation de paramètres de sureté de fonctionnement en présence d'incertitudes et aide à la conception : Application aux Systèmes Instrumentes de Sécurité, Thèse de Doctorat, Centre de Recherche en Automatique de Nancy de L'Université Nancy, 2007.
- [37] M.Sbihi, Automatismes Logiques Circuits Numériques, Ecole Supérieure de Technologie de Salé, Université Mohammed V de Rabat.
- [38] A. Demri, Contribution a l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle, Thèse de Doctorat de L'Université D'Angers, 2009.
- [39] E. Thomas, Automatique et automatisés, Notes de cours pour les élèves de CPGE PTSI, 2012.
- [40] K. Ishikawa, Conseils et outils pour le développement de l'Entreprise, OUTILS : Table de vérité, diagramme de Karnaugh, méthode de Quine Mac Cluskey, 2015.
- [41] <https://ff.tu-sofia.bg/courses/IvanKurtev-CompTech/03.pdf>
- [42] I. Elouamari, Le management des risques au sein de l'industrie textile, institut de génie appliqué - Ingénierie financière, Mémoire en ligne, Projet de fin d'année (4<sup>ème</sup> année SIGF), France, 2011.
- [43] Y. Mortureux, Arbres de défaillance, des causes et d'événement, 2017.
- [44] N. Bennedjai, O. abd elghafour, Douahi, Etude et analyse des risques industriels (Etude de cas), Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.
- [45] Mr. H. Brahim, Etude qualitative et quantitative des scénarios de défaillances de la pompe 2000 d de l'entreprise certaf, Mémoire de fin d'études du Master de L'Université Aboubekr Belkai Tlemcen, 2014.
- [46] D. Ayadi Azzabi, optimisation multicritère de la fiabilité: application du modèle de goal program ming avec les fonctions de satisfactions dans l'industrie de traitement de gaz, Thèse de Doctorat en cotutelle de L'Université d'Angers et Université de Sfax, 2010.

- [47] J. Baroth, F.Schoefs, D.Breysse, Fiabilité des ouvrages sureté, variabilité, maintenance et sécurité, Hermes Science, Livre, 2011.
- [48] [http://gpp.oiq.qc.ca/analyse\\_par\\_arbre\\_d\\_evenements.htm](http://gpp.oiq.qc.ca/analyse_par_arbre_d_evenements.htm)
- [49] <https://www.techniques-ingenieur.fr/fiche-pratique/environnement-securite-th5/icpe-repondre-aux-exigences-reglementaires-dt27/l-arbre-d-evenements-une-methode-d-analyse-de-risques-0536/>
- [50] K. AJMI, Les perspectives de l'introduction d'une culture de sécurité des soins en Tunisie basée sur la qualité et la gestion des risques : adaptation des recommandations de l'organisation mondiale de la santé (oms) et de la haute autorité de santé (has), Mémoire de Master de L'Université Senghor d'Alexandrie, 2009.
- [51] J. Luc Wybo, W. Van Wassenhove, Retour d'expérience et maîtrise des risques : Pratique et méthode de mise en œuvre, Livre, Lavoisier, 2011.
- [52] C. Clement Lechaux, Méthodologie de gestion de projet et son application à un programme de sevrage tabagique à l'officine, Thèse de Doctorat, 2015.
- [53] M. Giraud, Sûreté de fonctionnement des systèmes -Analyse des systèmes réparables, 2006.
- [54] C. Pagetti, Module de sûreté de fonctionnement, 3eme TR - option SE, 2012.
- [55] D. Casner, J. Renaud, D.Knittel, Conception de systèmes mécatroniques par optimisation topologique, 12ème colloque national AIP-PRIMECA, Le Mont Dore, France, 2011.
- [56] J-Yves. Choley, Mécatronique : une nouvelle démarche de conception des systèmes complexes, 2014.
- [57] H. Jawhar Hadj Amor, Contribution au prototypage virtuel de systèmes mécatroniques basé sur une architecture distribuée HLA. Expérimentation sous les environnements OpenModelica-OpenMASK, Livre, 2008.
- [58] N. Ben Said Amrani, Évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques en phase de développement, Thèse de Doctorat de L'Université de Nantes Angers Le Mans, 2019.
- [59] A. Guizani, Approche multi-agents pour la conception optimale des systèmes mécatroniques, Thèse de Doctorat de L'Université de Sfax et L'Université de Paris-Saclay préparée à CentraleSupélec, 2016.
- [60] X. Godot, A. Siadat, P. Martin, La conception de produits en ingénierie collaborative Présentation d'une démarche, 4ème conférence internationale conception et production intégrées, Casablanca, 2005.

- [61] X. Godot, A. Siadat, P. Martin, La conception de produits en ingénierie collaborative Présentation d'une démarche, Conférence: 4ème conférence internationale conception et production intégrées, Casablanca, 2005.
- [62]<https://www.batiproduits.com/batiwiki/ingenierie-concourant/definition/41C541FE-01CD-4B43-9201-7BECB7322151/>
- [63] O. Migno, Transformation Digitale – Réorganisation – Efficacité Opérationnelle, 2015.
- [64] A. Demri, Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle, Thèse de Doctorat de l'Université d'Angers, 2010.
- [65] Z-E. Meguetta, Méthodologie de conception sûre de fonctionnement d'un système de contrôle commande, Thèse de Doctorat de l'Université Lille1, 2015.
- [66]M. Bricogne, Méthode agile pour la conception collaborative multidisciplinaire de systèmes intégrés : application à la mécatronique, Thèse en Cotutelle de l'Université de Technologie de Compiègne, École de technologie supérieure Université du Québec, 2015.
- [67] N. Hammouda, G.Habchi, C.Barthod, O. Duverger, Mise en oeuvre d'une méthodologie d'évaluation de la fiabilité pour les systèmes mécatroniques , 21ème Congrès Français de Mécanique, Laboratoire SYMME, Université de Savoie, Bordeaux, France , 2013.
- [68] N. Bensaid Amrani, D. Sarsri, État de l'art des méthodes d'estimation de la fiabilité des systèmes mécatroniques, LTI, ENSA de Tanger, Université Abdel Malek Essaadi, Maroc, 2015.
- [69] N.Bensaid Amrani, L. Saintis, D. Sarsri, M. Barreau, L'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques avec la prise en compte des interactions multi domaines, ENSA-Tanger, Maroc, Laboratoire LARIS, Université d'Angers, 2016.
- [70] N. Hammouda, G.Habchi, C.Barthod, O. Duverger, Fiabilité des systèmes mécatroniques en utilisant la modélisation et la simulation, Université de Savoie, Nancy, France, 2014.