

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Electromécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Maintenance Industrielle

**Thème**

**Amélioration de la fiabilité du compresseur centrifuge BCL406 par l'application de la maintenance préventive**

Préparé par :

**M. DOUMA Salim & M. DOUMA Ameer**

Soutenu publiquement le : 17 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

<b>M. ELGUERRI Mohamed</b>	Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Président
<b>Mlle. SLIMANI Halima</b>	Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
<b>M. SAAD Mohamed</b>	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
<b>M. BENAMAR Badr</b>	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2019 - 2020

# Remerciements

En premier lieu, on remercie **Allah** le tout puissant qui nous a donné la force et la volonté d'arriver à terme pour achever nos études en master, et de soutenir notre mémoire de fin d'études dans de bonnes et meilleures conditions.

En second lieu nous remercions vivement notre encadreur Monsieur **BENAMER Badr** pour sa disponibilité, ses orientations, ses précieux conseils, ainsi que pour sa patience envers nous durant les longues séances de consultation tenues avec lui.

Nos vifs remerciements aux membres du jury, sans lesquels notre soutenance n'aurait pas pu avoir lieu, et aussi pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, en acceptant d'examiner notre mémoire et de l'enrichir par leurs propositions..

Aussi, on n'oublie pas d'adresser nos remerciements à l'administration du génie mécanique à sa tête le chef de département et au personnel du secrétariat et du service de scolarité d'avoir bien voulu veillé au bon fonctionnement pédagogique et administratif du département.

Nous n'oublions pas de remercier aussi tous nos camarades et amis de la promotion Maintenance Industrielle 2020 pour leur aide et soutien moral.

Enfin, nous remercions à toutes personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

## **Dédicaces**

*À L'AIDE D'ALLAH J'AI PU RÉALISER CE TRAVAIL QUE*

*JE DÉDIE*

*À MA MÈRE, QUI M'A ENCOURAGÉ D'ALLER EN AVANT*

*ET QUI M'A DONNÉE TOUT SON AMOUR POUR*

*REPRENDRE MES ÉTUDES ;*

*À MON PÈRE QUI M'A DONNÉ SON SOUTIEN PERMANENT*

*DURANT TOUTES MES ANNÉES D'ÉTUDES ;*

*À MES FRÈRES ET MES SŒURS ;*

*À MON BINÔME AMEUR ET TOUTS MES AMIS SANS*

*EXCEPTION ;*

*À TOUS CEUX, QUI DE PRÈS OU DE LOIN ONT CONTRIBUÉ*

*À LA RÉALISATION DE CE MÉMOIRE.*

*Safim*

# ***Dédicaces***

JE DÉDIE CE MÉMOIRE :

- À MA TRÈS CHÈRE MÈRE ET À MON CHER PÈRE POUR  
LEUR BIEN VAILLANCE ET LEUR ABNÉGATION DE  
M'AVOIR ENCOURAGÉ À TERMINER MES ÉTUDES DANS  
DE BONNES CONDITIONS.

- À MES FRÈRES ET À MES TRÈS CHÈRES SŒURS

- À TOUTE MA FAMILLE.

- À TOUS MES AMIS CHACUN DE SON NOM.

- ENFIN, JE LE DÉDIE À *MON BINÔME SALIM ET* À TOUS  
MES CAMARADES DE CLASSE CHACUN DE SON NOM.

*Amour*

**Abréviations**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale.....2**

## **Chapitre I: Notions générales sur la maintenance.**

I.1. Introduction .....	6
I.2. Généralités sur la maintenance.....	6
I.2.1. Définition de la maintenance .....	6
I.2.2. Evolution de la maintenance.....	7
I.2.3. Intérêt de la maintenance .....	7
I.3. Objectif et rôle de la maintenance.....	7
I.3.1. Les objectifs.....	7
I.3.2. Rôle de la maintenance .....	8
I.4. Classification des tâches de la maintenance .....	9
I.5. Place de la maintenance dans une entreprise .....	10
I.6. Les types de la maintenance .....	11
I.6.1. La maintenance préventive.....	12
I.6.2 Les types de la maintenance préventive .....	13
I.6.3. Opérations de la maintenance préventive .....	14

## **Chapitre II : La sûreté de fonctionnement.**

II.1. Introduction .....	17
II.2. Notion sur la sûreté de fonctionnement .....	17
II.2.1. Évolution historique de sûreté de fonctionnement .....	17
II.2.2. Définition .....	19
II.2.3. But de la sûreté de fonctionnement.....	20
II.3. Eléments constatifs de la FMDS .....	20
II.3.1. La Fiabilité .....	20
II.3.2. Maintenabilité .....	28
II.3.3. Disponibilité .....	32
II.3.4. Sécurité .....	34

## Table des matières

II.4. La méthode d'analyses prévisionnelle (la courbe ABC) .....	36
II.4.1. Objectif .....	36
II.4.2. Graphique sous forme d'histogramme.....	36
II.4.3. Intérêt .....	36
II.4.4. Méthodologie .....	36

### **Chapitre III : Analyse FMD du compresseur centrifuge BCL406**

III.1. Introduction .....	39
III.2. Généralité sur les compresseurs.....	39
III.2.1. Définition.....	39
III.2.2. Type des compresseurs et classification .....	39
III.2.3. But de la compression .....	40
III.3. Description du compresseur centrifuge BCL406.....	41
III.3.1. Présentation du compresseur centrifuge BCL406.....	41
III.3.2. Désignation .....	42
III.3.3. Rôle .....	43
III.3.4. Position du BCL406 dans la chaine cinématique .....	43
III.4. Présentation d'historique des pannes du compresseur BCL406 .....	45
III.5. Méthode d'analyse prévisionnelle de Pareto .....	46
III.5.1. La courbe d'analyse ABC .....	46
III.5.2. Interprétation de la courbe ABC.....	47
III.6. L'analyse FMD .....	48
III.6.1. Calcul les paramètres de Weibull .....	48
III.6.2. Papier de Weibull .....	49
III.6.3. Test: KOLMOGOROV SMIRNOV K-S.....	50
III.6.4. Exploitation les paramètres de Weibull .....	52
III.6.5. Étude du modèle de Weibull .....	53
III.7. La maintenabilité .....	57
III.8. La disponibilité .....	59
III.8.1 La disponibilité intrinsèque théorique .....	59
III.8.2 La disponibilité instantanée.....	59
III.9. Etablissement d'un plan de maintenance préventive .....	61

## Table des matières

Conclusion générale.....	64
Références bibliographiques.....	66
Annexes .....	69

## Liste des abréviations

<b>AFNOR</b>	<i>Association de normalisation française</i>
<b>SDF</b>	<i>La Sûreté de fonctionnement</i>
<b>FMD</b>	<i>Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité</i>
<b>FMDS</b>	<i>Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité</i>
<b>f(t)</b>	<i>Densité de probabilité</i>
<b>F(t)</b>	<i>La fonction de répartition</i>
<b>R(t)</b>	<i>La fonction de fiabilité</i>
<b><math>\lambda(t)</math></b>	<i>Taux de défaillance</i>
<b>MTBF</b>	<i>Moyenne des temps de bon fonctionnement</i>
<b><math>\gamma</math></b>	<i>Paramètre de position</i>
<b><math>\eta</math></b>	<i>Paramètre d'échelle</i>
<b><math>\beta</math></b>	<i>Paramètre de forme</i>
<b>M(t)</b>	<i>La fonction de la maintenabilité</i>
<b>MTTR</b>	<i>La durée moyenne jusqu'à la réparation d'une entité réparable</i>
<b><math>\mu(t)</math></b>	<i>Taux de réparation</i>
<b>g (t)</b>	<i>Intensité de réparation</i>
<b>A(t)</b>	<i>La fonction de la disponibilité</i>
<b>D(t)</b>	<i>La fonction de la disponibilité instantanée prévisionnelle</i>
<b>TMD</b>	<i>Durée de bon fonctionnement après réparation</i>
<b>MUT</b>	<i>Durée moyenne de fonctionnement après la réparation</i>
<b>TMI</b>	<i>Durée moyenne d'indisponibilité</i>
<b>MDT</b>	<i>Durée moyenne entre une défaillance et la remise en état suivante</i>
<b><math>\overline{M(t)}</math></b>	<i>La fonction de l'immaintenabilité</i>

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b>	<i>Evolution de la maintenance depuis 1940</i>	7
<b>Figure I.2</b>	<i>Objectifs de la maintenance</i>	8
<b>Figure I.3</b>	<i>Organigramme où la maintenance centralisée</i>	11
<b>Figure I.4</b>	<i>Les différentes politiques de maintenance</i>	12
<b>Figure I.5</b>	<i>Les différentes opérations de la maintenance</i>	15
<b>Figure II.1</b>	<i>Taux de défaillance, Courbe en baignoire</i>	22
<b>Figure II.2</b>	<i>Principales propriétés de la distribution de Weibull</i>	27
<b>Figure II.3</b>	<i>Représentation sur graphique à échelle fonctionnelle de la distribution de Weibull</i>	28
<b>Figure II.4</b>	<i>Allure de la courbe de maintenabilité</i>	29
<b>Figure II.5</b>	<i>Chronologie des temps des activités de maintenance</i>	30
<b>Figure II.6</b>	<i>Relations entre les liens temporels en fiabilité, disponibilité et maintenabilité</i>	31
<b>Figure II.7</b>	<i>Disponibilité en fonction du temps t</i>	33
<b>Figure II.8</b>	<i>Représentation des MTBF, MDT et MUT</i>	34
<b>Figure II.9</b>	<i>Relations entre fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité.</i>	35
<b>Figure II.10</b>	<i>La courbe ABC</i>	37
<b>Figure III.1</b>	<i>Les principales catégories de compresseurs.</i>	40
<b>Figure III.2</b>	<i>Compresseur centrifuge BCL406</i>	41
<b>Figure III.3</b>	<i>Codification du Compresseur centrifuge BCL406</i>	42
<b>Figure III.4</b>	<i>Compresseur centrifuge BCL406.</i>	43
<b>Figure III.5</b>	<i>Schéma simplifié d'un train de compression.</i>	44
<b>Figure III.6</b>	<i>La courbe d'analyse ABC.</i>	47
<b>Figure III.7</b>	<i>La représentation graphique de la fonction de répartition sur le papier de Wiebull</i>	49
<b>Figure III.8</b>	<i>La courbe de densité de probabilité.</i>	54
<b>Figure III.9</b>	<i>La courbe de fonction de répartition</i>	55
<b>Figure III.10</b>	<i>La courbe de la fiabilité</i>	56
<b>Figure III.11</b>	<i>La courbe du taux de défaillance</i>	57
<b>Figure III.12</b>	<i>La courbe de la maintenabilité</i>	58
<b>Figure III.13</b>	<i>La courbe de la disponibilité</i>	60

## Liste des tableaux

<b>Tableau.II.1</b>	<i>Disciplines de la sureté de fonctionnement</i>	19
<b>Tableau.III.1</b>	<i>Caractéristiques de fonctionnement du compresseur BCL406</i>	44
<b>Tableau.III.2</b>	<i>Dossier historique de compresseur centrifuge BCL406</i>	45
<b>Tableau.III.3</b>	<i>Cumul causes d'arrêt du compresseur centrifuge BCL406</i>	46
<b>Tableau.III.4</b>	<i>Calcule la fonction de répartition</i>	48
<b>Tableau.III.5</b>	<i>Paramètres de calcul de fiabilité</i>	50
<b>Tableau.III.6</b>	<i>Test K-S</i>	51
<b>Tableau.III.7</b>	<i>Calcul la fonction de la densité de probabilité</i>	54
<b>Tableau.III.8</b>	<i>Fonction de répartition <math>F(t)</math></i>	55
<b>Tableau.III.9</b>	<i>Calcul de la fiabilité</i>	56
<b>Tableau.III.10</b>	<i>Calcul du taux de défaillance</i>	57
<b>Tableau.III.11</b>	<i>Calcul de la maintenabilité</i>	58
<b>Tableau.III.12</b>	<i>Calcul de la disponibilité</i>	60
<b>Tableau.III.13</b>	<i>Plan de maintenance préventive pour le compresseur BCL406</i>	61

---

---

# **Introduction générale**

---

---

## Introduction Générale

Dans tous les domaines industrialisés, l'évolution technique a contribué à l'amélioration de la situation des entreprises en termes de fiabilité pour garantir la continuité de l'activité industrielle, et augmenter la production. Pour cela il était impérativement important de réduire le nombre d'interventions qui peuvent diminuer les taux de la productivité.

Cette amélioration s'accompagne par une bonne gestion des outils et des moyens techniques, ainsi qu'une exigence en personnels qualifiés et de plus en plus spécialisés dans les différentes branches et disciplines menant à la réalisation d'un produit de qualité. Mais malgré le niveau de fiabilité atteint, on est toujours loin du niveau «zéro panne», qui est un objectif loin d'être possible.

Dans ce cadre, on constate la présence de la maintenance industrielle, comme une fatalité, qui a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production. Elle peut être considérée aussi comme une fonction stratégique pour toute entreprise de production industrielle, quelque soit son secteur d'activité.

Toujours liée à l'incessant développement technologique, à l'apparition de nouveaux modes de gestion, à la nécessité de réduire les coûts de production. La maintenance est en constante évolution dans les différents domaines où elle s'applique et selon ses rôles qui ne cesse de croître.

Le concept de la maintenance préventive englobe l'ensemble des activités d'exploitation, tels que les essais périodiques, les inspections routinières, les lectures régulières des capteurs et l'entretien préventif avant toute panne, visant à s'assurer d'une fiabilité et d'une disponibilité maximale d'un système ou d'un équipement industriel. Par opposition, la maintenance corrective s'attarde à remettre en état un équipement ou un système en panne.

Comme la maintenance préventive est en forte harmonie avec la fiabilité pour tout système industriel, on a choisi dans notre travail de mémoire de fin d'étude d'essayer de traiter une problématique dans ce sens. Donc l'objectif de notre projet est basé sur l'amélioration de la fiabilité d'un système industriel, par une proposition d'un ensemble de solutions apportées à un système mécanique en étudiant son historique de pannes sur une période de fonctionnement bien déterminées.

## Introduction Générale

Le choix du cas d'études n'était pas facile du moment où le monde entier passe par une période sanitaire très critique, connue par la propagation de la pandémie du **COVID19**. Cette période a connue un confinement partiel et même totale pendant certaine période de l'année pédagogique en cours. Ce qui nous a empêché de prospecter le secteur industriel de la région, et donc faire le stage pratique de fin d'étude était une chose impossible.

Dans ces conditions, le seul issu qu'on a eu est d'essayer d'au moins avoir un historique d'un système industriel et de le prospérer pour pouvoir le rendre adéquat avec l'objectif de notre thème d'étude. Puis d'en tirer une problématique autour de laquelle on a essayé de chercher des solutions techniques, qui reflète les notions de bases qu'on eu le long de notre cursus de formation en maintenance industrielle.

Alors on a pu décrocher des contact au niveau de la **SONALGAZ de Tiaret**, d'où on a reçu les données de l'historique du compresseur **BCL406**. Cette machine fait partie d'un système mécanique complexe où sont rôle réside principalement dans la convertissions de l'énergie.

Dans une telle société nationale algérienne de grande affluence de facteurs économiques. La production doit être toujours garantie au continu. Ce qui donne à la maintenance préventive sont fluo. Et aussi, ce qui nous a mené à analyser la fiabilité du compresseur **BCL406**, en essayant de présenter une analyse argumentée, et des solutions concrètes et crédibles.

Donc le travail qu'on va présenter dans ce manuscrit est le fruit d'une étude de réaliser à la base de historique de pannes du **compresseur BCL406**, en cherchant principalement à établir un plan de maintenance préventive suite un une analyse **FMD** de la machine.

Pour mieux arborer notre travail, ce manuscrit est structuré sous forme de trois chapitre :

Dont le premier chapitre est nommé : "*Notions générales sur la maintenance*". Dans ce chapitre on a présenté une mise en valeur de la maintenance comme impérative nécessaire à une meilleure garantie de la disponibilité des équipements toujours en faveur d'un meilleur rendement de la production et de l'économie. Quelques définitions concernant la maintenance, d'une manière générale un chapitre coutumiers dans la spécialité.

## Introduction Générale

Alors que dans le second chapitre, dont le nom est : "*La sureté de fonctionnement*" on a essayé de présenter les moyens utilisés pour la réalisation de notre travail. Les outils analytiques qu'on va appliquer au troisième chapitre, pour la résolution de la problématique. En se basant principalement sur la sureté de fonctionnement dans la maintenance, en appliquant les notions de la **FMD** : *Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité*.

Enfin, le troisième et dernier chapitre, sous intitulé : "*Analyse FMD du compresseur BCL406*". Ce chapitre est considéré comme la pièce maitresse de ce travail. Il est entièrement consacré à la recherche de la solution finale. Cette solution, qu'on a essayé de présenter sous forme de suggestions, avec un aspect simple, crédible et concrètement réalisable.

Et bien-sur on clôture ce manuscrit par une conclusion qui donne un aperçu globale de tout le travail et des recommandations pour l'avancement de ce projet. Un projet qui a été réalisé dans des conditions atypiques.

---

## **Chapitre I**

---

# **Notions générales sur la maintenance**

---

## I.1. Introduction

Pour être et demeurer compétitive, une entreprise doit produire toujours mieux en terme de qualité et au coût le plus bas. Pour minimiser ce coût, on fabrique plus vite et sans interruption des produits sans défaut afin d'atteindre la production maximale par unité de temps. Cet objectif est un des buts de la fonction maintenance d'une entreprise. Il s'agit de maintenir un bien dans un état lui permettant de répondre de façon optimale à sa fonction. Ce chapitre examine les définitions fondamentales concernant la maintenance, l'importance et le rôle de cette dernière dans l'industrie.

## I.2. Généralités sur la maintenance

### I.2.1. Définition de la maintenance

Il existe plusieurs façon de définir la maintenance selon des normes tel-que:

1. **Selon AFNOR X 60-000 en mai 2002** : La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [2].
2. **Selon AFNOR NF X 60-010** : La maintenance est un ensemble des actions permettant de **maintenir** ou de **rétablir** un bien dans **un état spécifié** ou en mesure d'assurer **un service déterminé**. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au **coût optimal** [1].

Dont on peut détailler certaines terminologies comme suit:

- ✓ **Maintenir** : Contient la notion de «prévention» sur un système en fonctionnement.
- ✓ **Rétablir** : Contient la notion de «correction» consécutive à une perte de fonction.
- ✓ **État spécifié** ou **service déterminé** : Implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux caractéristiques.
- ✓ **Coût optimal** : Qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité.

**I.2.2. Evolution de la maintenance**

Dans un contexte de concurrence économique à l'échelle planétaire, la gestion de la maintenance est loin d'être stabilisée dans un environnement où l'automatisation et le processus de fabrication deviennent de plus en plus complexes. Depuis les années 1940, l'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations [4].

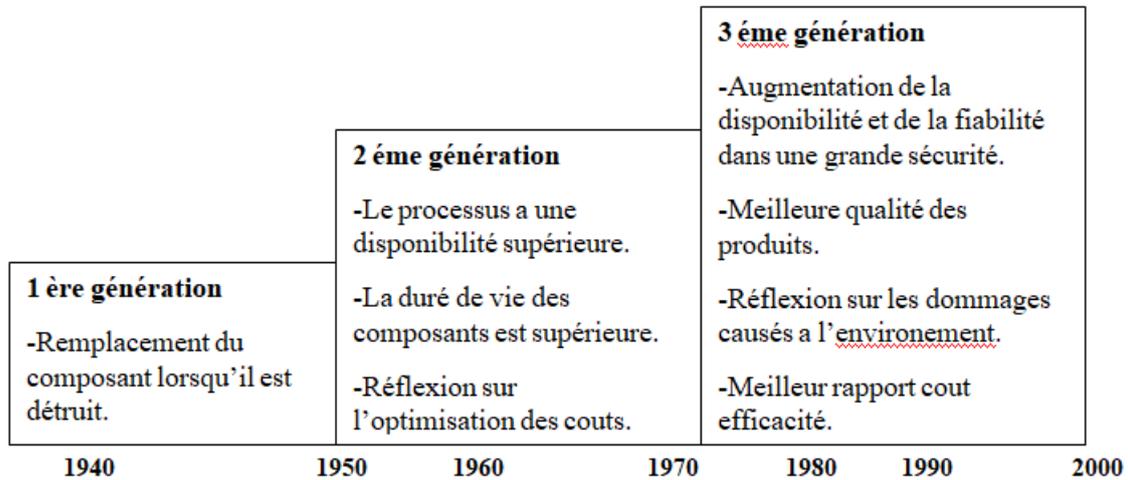


FIG.I.1. Evolution de la maintenance depuis 1940 [4].

**I.2.3. Intérêt de la maintenance**

La maintenance est importante pour l'industrie, ce qui paraît clair lors de l'occurrence des pannes provoquant des arrêts non planifiés. Par conséquent, toute interruption au cours du fonctionnement cause, comme entre autres [7]:

- ✓ Augmentation du coût de productions.
- ✓ Diminution de la marge du profit.
- ✓ Rupture du stock.
- ✓ Retard des livraisons.
- ✓ Ajout des heures supplémentaires.
- ✓ Absence des sécurités des opérateurs.

Donc, si on planifie et on prévoit des entretiens planifiés avant l'occurrence des pannes, on pourra surmonter ces conséquences.

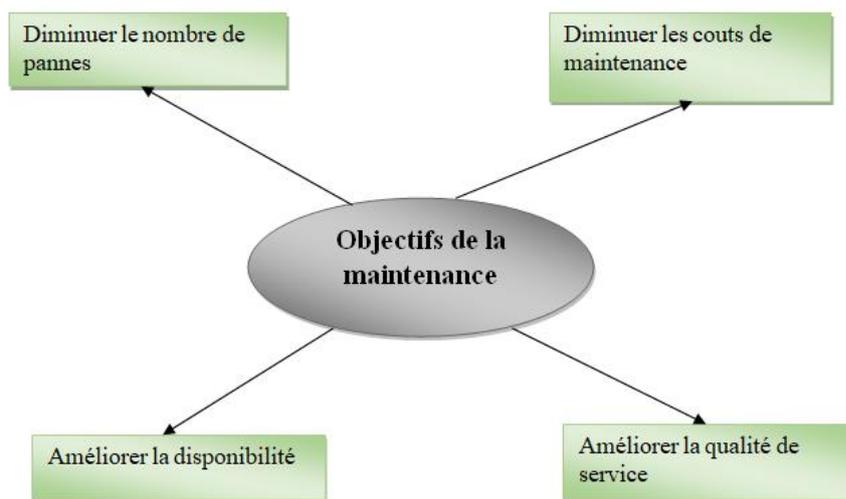
**I.3. Objectif et rôle de la maintenance**

**I.3.1. Les objectifs**

Les objectifs de la maintenance sont nombreux, mais on peut citer :

1. Assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais.
2. Optimiser les actions de maintenance (exemple : réduire la fréquence des pannes).
3. Contribuer à la création et au maintien de la sécurité au travail.
4. Consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple: améliorer la productivité) [3].

Le schéma suivant peut donner une idée globale sur les objectifs de la maintenance:



*FIG.I.2. Objectifs de la maintenance [3].*

### I.3.2. Rôle de la maintenance

Le rôle de la fonction maintenance dans une entreprise, quel-que-soit son type et son secteur d'activité, est de garantir la plus grande disponibilité des équipements au meilleur rendement tout en respectant le budget alloué.

Pour atteindre ces objectifs, la politique de maintenance des équipements dans l'industrie oblige de suivre les points suivants [5]:

1. Le service maintenance intervient principalement en cas de problème :
  - ✓ Il dépanne en urgence.
  - ✓ Il répare en atelier.
  - ✓ Il effectue l'entretien quotidien des matériels.
2. Le service maintenance est là pour éviter les pannes et les ralentissements de production : Les interventions en urgence engendrant de coûteux arrêts de production, on met en place des procédures de prévention systématiques pour éviter des pannes majeures.
3. Le service maintenance doit générer des profits :

- ✓ Le service maintenance évite des pannes : il fait donc gagner de l'argent.
  - ✓ Mais il coûte aussi : salaires, matériels de maintenance, stock de pièces de rechange, arrêt de production pour la maintenance préventive.
4. Le service maintenance (dépannage) est en concurrence avec les sous-traitants maintenanciers : Après avoir fait la preuve de sa rentabilité, le service maintenance doit faire preuve de plus de rentabilité que si on avait recours à des sociétés spécialisées dans la maintenance.

### I.4. Classification des tâches de la maintenance

Les tâches de maintenance sont classées en cinq niveaux. Ceux-ci font référence à la complexité des tâches à effectuer et, entre autres aux ressources matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches [6].

- 1. Tâches de maintenance du premier niveau :** Comporte des réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage; ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité, sans avoir la nécessité à un outillage spécifique.
- 2. Tâches de maintenance de deuxième niveau :** Comporte des opérations de dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet ou opérations mineures de maintenance préventive qui peuvent nécessiter un outillage standard.
- 3. Tâches de maintenance de troisième niveau :** Nécessite une identification et un diagnostic des pannes. La réparation s'effectue toujours par un échange de composants fonctionnels et les réparations mécaniques à réaliser sont mineures. L'outillage nécessaire est courant et prévu pour ce type d'intervention. De plus des appareils de mesure (banc d'essai, contrôle, etc...). Leur nécessité est pour la remise en route correcte de l'équipement qui a subit l'intervention.
- 4. Tâches de maintenance du quatrième niveau :** Est celui des travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Un outillage plus spécialisé est généralement requis, tel que: Matériel d'essai ou de test; un banc de contrôle; ...etc.
- 5. Tâches de maintenance du cinquième niveau :** Comporte les travaux de rénovation, de reconstruction ou réparations importantes confiés à un atelier

central. Les moyens nécessaires pour effectuer ce type d'intervention sont proches de ceux qui ont été utilisés lors de la fabrication de l'équipement par le constructeur.

### I.5. Place de la maintenance dans une entreprise

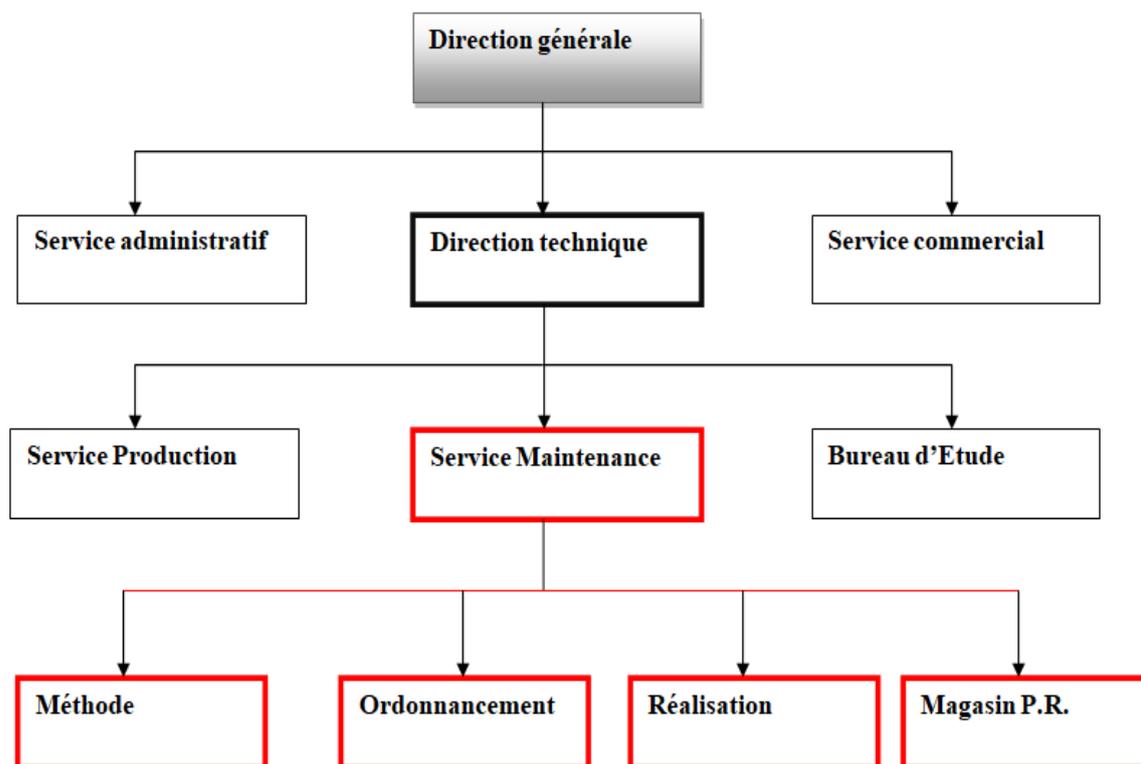
Il existe deux tendances quant au positionnement de la maintenance dans l'entreprise [8]:

**1. La centralisation** : Où toute la maintenance est assurée par un seul service:

- Standardisation des méthodes, des procédures et de la communication.
- Regroupement permet la mutualisation des coûts.
- Vision globale de l'état du parc à gérer.
- Gestion plus aisée et plus souple des personnels.
- Rationalisation des moyens matériels (amortissement plus rapide).
- Diminution des quantités de pièces de rechange disponibles.
- Communication simplifiée avec les autres services.

**2. La décentralisation** : Où la maintenance est confiée à plusieurs services liés à chacun des services de l'entreprise :

- Meilleures communications et relations avec le service responsable et l'utilisateur du parc à maintenir.
- Effectifs moins importants dans les différentes antennes.
- Réactivité accrue face à un problème.
- Meilleure connaissance du matériel.
- Gestion administrative allégée.



*FIG.I.3. Organigramme où la maintenance est centralisée [8].*

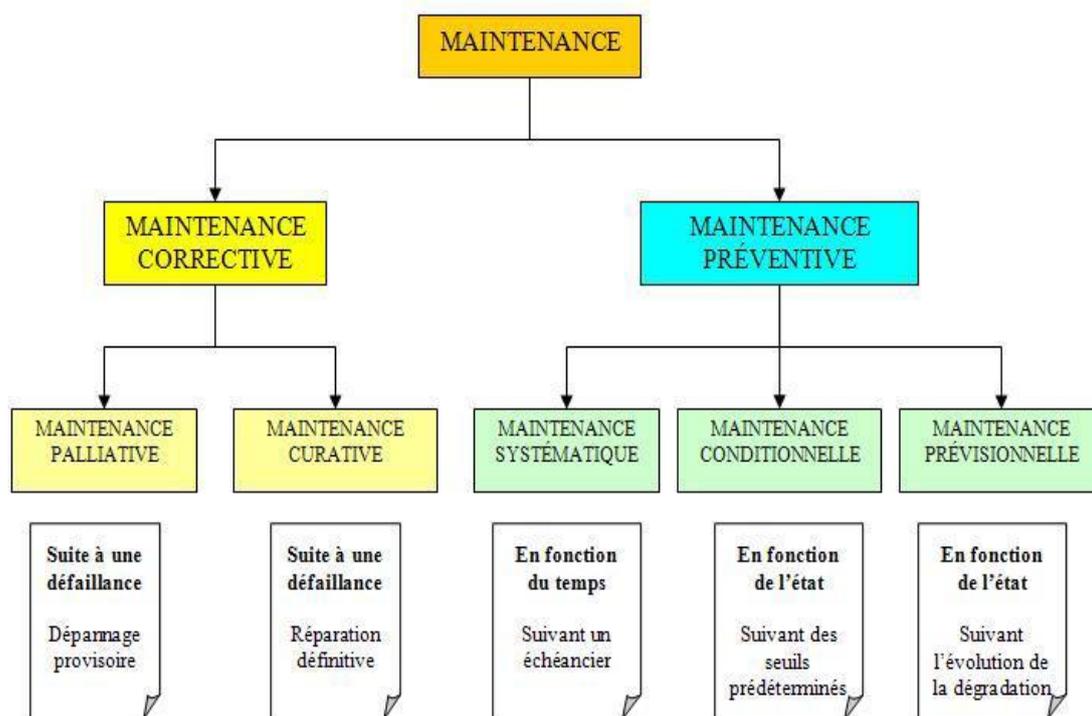
## I.6. Les types de la maintenance

La politique de maintenance peut être répertoriée en deux grandes catégories la **maintenance corrective** et la **maintenance préventive**.

La maintenance corrective est la maintenance qui intervient suite à la défaillance du système, alors que, la maintenance préventive est réalisée lorsque le système est encore en fonctionnement.

Le recours à l'une ou à l'autre de ces politiques diffère suivant l'élément considéré mais aussi le type de structure, la politique d'exploitation et de suivi, les coûts, la disponibilité de l'information, etc.

Le schéma suivant nous présente les différentes politiques de la maintenance suivant le type de maintenance étudiée. Alors que la mise en place d'opérations correctives ne dépend que de l'occurrence d'une panne, les maintenances préventives peuvent être programmées en fonction de différents paramètres



*FIG.I.4. Les différentes politiques de maintenance [8].*

### I.6.1. La maintenance préventive

Maintenance préventive est une maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. Elle doit permettre d'éviter les défaillances du matériel en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

Les objectifs de la maintenance préventive se résument dans [8]:

- Augmenter la durée de vie du matériel.
- Diminuer la probabilité des défaillances en service.
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions.
- Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc.
- Améliorer les conditions du travail du personnel de production.
- Diminuer le budget de maintenance.
- Supprimer les causes d'accidents graves.

## I.6.2. Les types de la maintenance préventive

- 1. La maintenance préventive systématique :** La maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi dans le temps ou par rapport au nombre d'unités d'usage (d'autres unités peuvent être retenues, telles-que: La quantité; la longueur et la masse des produits fabriqués; la distance parcourue; le nombre de cycles effectués; etc.). Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle.

Cette méthode nécessite de connaître :

- ✓ Le comportement du matériel.
- ✓ Les modes de dégradation.
- ✓ Le temps moyen de bon fonctionnement entre 2 avaries.

Cas d'application :

- ✓ Equipements soumis à une législation en vigueur (sécurité réglementée): Appareils de levage; extincteurs; convoyeurs; ascenseurs; monte-charge; etc.
- ✓ Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves: Transport en commun des personnes; avions; trains; etc.
- ✓ Equipement ayant un coût de défaillance élevé : Eléments d'une chaîne de production automatisée.
- ✓ Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps.

- 2. La maintenance préventive prévisionnelle :** Lorsque la maintenance préventive est effectuée sur la base de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste avant l'observation de l'événement redouté, on parle de maintenance prévisionnelle.

Une maintenance prévisionnelle peut prendre en compte un âge du matériel qui n'est pas forcément calendaire, mais par exemple: Le temps de fonctionnement mesuré depuis la dernière inspection. Elle consiste à extrapolé la courbe de dégradation d'un organe pour prévoir une intervention.

- 3. La maintenance préventive conditionnelle :** La Maintenance prédictive est la maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic; information d'un capteur; mesure d'une usure; etc.).

La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. Elle se caractérise par la mise en évidence des points faibles (surveillance de ces points et décision d'une intervention si certains seuils sont atteints). Suite à un contrôle systématique avec des moyens de contrôle non destructifs.

Tout le matériel est concerné. Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement. Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- ✓ Le niveau et la qualité de l'huile.
- ✓ Les températures et les pressions.
- ✓ La tension et l'intensité du matériel électrique.
- ✓ Les vibrations et les jeux mécaniques.

Le matériel nécessaire pour assurer la maintenance préventive conditionnelle devra être fiable pour ne pas perdre sa raison d'être. Il est souvent onéreux, mais pour des cas bien choisis, il est rentabilisé rapidement.

### I.6.3. Opérations de la maintenance préventive

Ces opérations trouvent leurs définitions dans la norme NF X 60-010 et NF EN 13306 [8].

- **Inspection** : Contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives. Elle permet de relever des anomalies et d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements (pas de démontage).
- **Contrôle** : Vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective ou alors inclure une décision de refus, d'acceptation ou d'ajournement.

- **Visite** : Examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du premier et du deuxième niveau. Il peut également déboucher sur la maintenance corrective.
- **Test** : Comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de référence ou à un phénomène physique significatif d'une marche correcte.
- **Echange standard** : Remplacement d'une pièce ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur.
- **Révision** : Ensemble complet d'examens et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un bien. Une révision est souvent conduite à des intervalles prescrits du temps ou après un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel du bien.

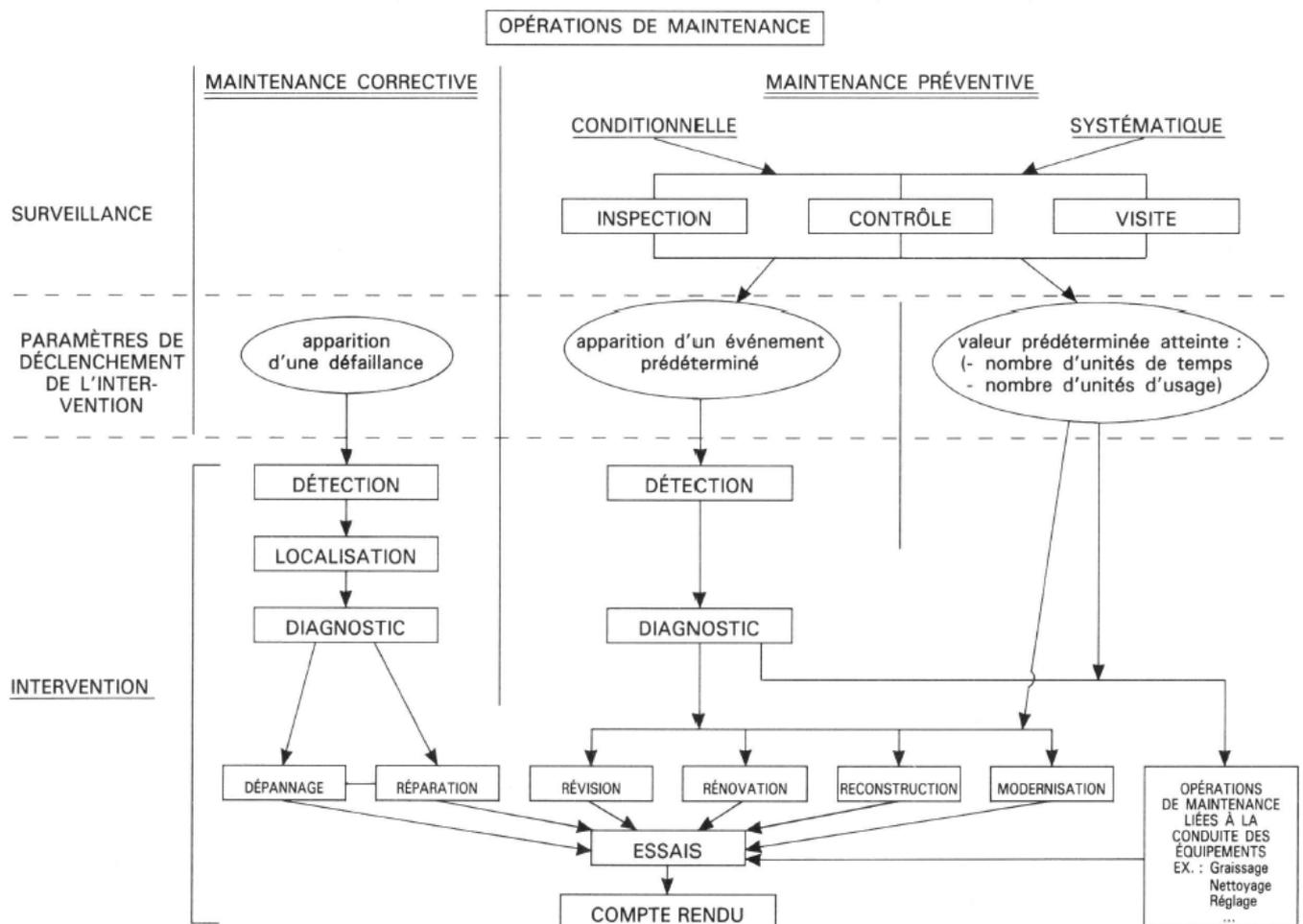


FIG.I.5. Les différentes opérations de la maintenance [8].

---

## **Chapitre II**

---

# **La sûreté de fonctionnement**

---

### II.1. Introduction

Dans l'industrie, on parle de plus en plus de sûreté de fonctionnement. Cette discipline, qui a acquis ce nom et sa forme actuelle principalement au cours du dernier demi-siècle et dans les secteurs de la défense, de l'aéronautique, de l'espace, du nucléaire, puis des télécommunications et des transports, serait désormais utile, voire indispensable, à tous les secteurs de l'industrie et même d'autres activités.

La Sûreté de fonctionnement (SDF) ou la science des « défaillances » qui est suivant les domaines d'applications : Analyse de risque; cinétique; fiabilité, maintenabilité et disponibilité FMD.

La FMD qui sera le sujet de notre étude dans ce chapitre, est caractérisée à la fois par les études structurelles statiques et dynamiques des systèmes, du point de vue prévisionnel mais aussi opérationnel et expérimental par l'analyse des essais et des accidents, en tenant compte des aspects probabilités et des conséquences induites par les défaillances techniques et humaines.

### II.2. Notion sur la sûreté de fonctionnement

#### II.2.1. Évolution historique de sûreté de fonctionnement

Avant de donner les nombreuses définitions exactes et de résumer certaines notions, il est bon de rappeler l'historique des évolutions industrielles ou autres qui ont amené à préciser ces notions.

Dans les années du milieu du *XXème* siècle, il s'est avéré que les produits fabriqués, de technologie de plus en plus complexe, n'avaient pas la fiabilité qu'on pouvait en espérer : de nombreux appareils défectueux avant même d'être livrés; fonctionnement ne répondant pas aux besoins; mauvaise adaptation à la maintenance; fragilité, etc. Ce sont les notions de complexité d'une part et de recherche d'une plus grande sécurité d'autre part, qui ont influencé l'évolution industrielle au cours du *XXème* siècle.

En ce qui concerne la « *sécurité* » et la « *sûreté de fonctionnement* », les utilisateurs aussi bien que les concepteurs, confrontés aux dysfonctionnements divers, évoquaient la notion de « *mauvaise qualité* » ou de « *fiabilité insuffisante* » mais aussi de risques (risques de

panne, risque d'indisponibilité, risque d'accident) avec une hiérarchie allant du simple risque de mauvais fonctionnement à la catastrophe.

Différents acteurs du développement ou de l'utilisation avaient peu de liens entre eux : Des utilisateurs confrontés à des produits mal adaptés ou non fiables; des développeurs peu au courant de l'utilisation réelle des produits; des fabricants confrontés aux défauts lors des contrôles; des responsables de sécurité souhaitant réduire le nombre d'accidents. [09,10]

Ainsi, les problèmes rencontrés commençaient à être classés en deux catégories :

- Celles relevant de **la sûreté de fonctionnement** d'une part, incluant :
  - ✓ **Fiabilité** : Réponse au risque de panne;
  - ✓ **Maintenabilité** : Réponse au risque de maintenance difficile, voire impossible;
  - ✓ **Disponibilité** : Réponse au risque de non-mise à disposition au moment du besoin.
- Celles relevant de **la sécurité** d'autre part : Réponse au risque d'accident ou de catastrophe).

L'ensemble de ces évolutions s'est fait progressivement à partir des années 1950 et 1960. L'électronique et l'informatique de pointe ont été les secteurs pionniers de la sûreté de fonctionnement en raison, entre autres, d'une volonté politique de réussite dans les secteurs spatial ou nucléaire. Le domaine militaire conventionnel a suivi rapidement, puis celui du civil complexe : Aéronautique, centraux téléphoniques, ... . Enfin le domaine grand public : Automobiles, téléviseurs, etc.

En matière de réglementation et de normalisation, la prise en compte des notions de sûreté a amené à constituer des groupes de travail dans les différents organismes nationaux ou internationaux, puis à établir des liens entre eux. L'objectif était de rendre le plus cohérent possible les nombreux textes existants. Cependant, il est important de constater une scission entre les groupes qui incluent la sécurité dans la sûreté de fonctionnement et ceux qui la mettent à part, une difficulté supplémentaire étant apportée par la traduction anglais-français, par exemple : **Dependability, Security, Safety**.

Enfin, un critère qui s'est développé progressivement est celui du facteur humain, dont les dysfonctionnements ajoutent un éclairage supplémentaire aux analyses de risque. Ainsi, au fil des temps, à partir de différents domaines de l'activité industrielle et de différentes fonctions dans l'entreprise, les acteurs économiques ont regroupé l'ensemble des

problèmes liés aux risques dans ces deux notions de sûreté de fonctionnement et de sécurité, qui se retrouvent dans la notion très globale de maîtrise des risques[11].

Après cette brève synthèse de l'évolution historique qui a amené à l'étude et à la détermination des notions de sûreté de fonctionnement et de sécurité, nous donnons dans la suite les diverses définitions des fonctions, comportements et services d'un système, ainsi que, les concepts de base de la sûreté. Nous présentons ensuite les attributs de la sûreté : Disponibilité, fiabilité, sécurité-innocuité, confidentialité, intégrité, maintenabilité; les entraves de la sûreté : Fautes, erreurs, défaillances. Et enfin, les moyens pour la sûreté : Prévention des fautes, tolérance aux fautes, élimination des fautes, prévision des fautes. [12]

**II.2.2. Définition**

*La sûreté de fonctionnement* est l'aptitude d'un système à remplir une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle englobe principalement quatre composantes : *la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité*. La connaissance de cette aptitude à remplir une ou plusieurs fonctions permet aux utilisateurs du système de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur assure. Par extension, la sûreté de fonctionnement désigne également l'étude de cette aptitude et peut ainsi être considérée comme la « *science des défaillances et des pannes* ». [13]

**Tableau. II.1. Disciplines de la sûreté de fonctionnement [13].**

Sûreté de Fonctionnement			
Aptitude à assurer un service spécifié			
<b>Sécurité</b>	<b>Disponibilité</b>		
<b>Aptitude à ne présenter aucun danger pour les personnes, les biens et l'environnement.</b>	Aptitude à être en état de marche à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné		
	<b>Fiabilité</b>	<b>Maintenabilité</b>	<b>Logistique de maintenance</b>
	Aptitude à ne pas présenter des défaillances dans une durée déterminée	Aptitude à être remis en service dans une durée donnée	Politique et moyens de maintenance.

### II.2.3. But de la sûreté de fonctionnement

Le but de la sûreté de fonctionnement est de 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 grandeurs probabilistes associées : fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité.

## II.3. Eléments constatifs de la FMDS

### II.3.1. La Fiabilité

- a) **Définition** : D'après la norme AFNOR (X NF, 06-501) la fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions et pour une durée donnée. Cette définition peut être formulée différemment : La fiabilité d'une entité est la probabilité moyenne de non défaillance de cette entité sur un intervalle de temps donné. Les paramètres importants de la fiabilité sont donc les conditions d'utilisation du système, le temps ou le nombre de cycles. La fiabilité d'un dispositif dépend aussi de la fonction remplie par ce dispositif.
- b) **Les différents types de fiabilité** : On peut citer :
- **Fiabilité intrinsèque** : Elle est propre à un matériel et à un environnement donné et ne dépend que de ce matériel.
  - **Fiabilité extrinsèque** : Elle résulte des conditions d'exploitation, de la qualité de la maintenance, d'une manière générale d'événement relatif à l'intervention humaine.
  - **Fiabilité implicite** : Basée sur l'expérience et, dont le but est de réduire la fréquence et la durée des arrêts.
  - **Fiabilité explicite** : Dont le concept est formé mathématiquement. Elle permet de déterminer rigoureusement le degré de confiance dans le matériel.
- c) **Paramètres nécessaires pour mesurer la fiabilité** : Parmi ses paramètres, on trouve :
- **Variable aléatoire** : On appelle de variable aléatoire ( $x$ ) celle à laquelle nous pouvons associer une probabilité pour chaque valeur de ( $x$ ) :

- ✓ Variable aléatoire continue : Intervalle de temps entre défaillance consécutive d'un matériel.
- ✓ Variable discrète : Nombre de défaillance d'un matériel sur une période donnée ou pour une quantité fabriquée.
- **Densité de probabilité** : Généralement en fiabilité, elle est notées  $f(t)$ . Elle représente la probabilité de défaillance en un intervalle de temps ( $t$ ).

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (\text{II.1})$$

- **La fonction de répartition** : Notée  $F(t)$ . C'est la notation générale de la probabilité de défaillance dans l'intervalle de temps  $[0, t]$

$$F(t) = \int_0^t .f(t) dt \quad (\text{II.2})$$

- **La fonction de fiabilité** : Nous appelons  $R(t)$  la fonction de fiabilité, qui représente **la probabilité de fonctionnement sans défaillances** pendant un temps ( $t$ ), ou **la probabilité de survie** jusqu'à un temps ( $t$ ). La probabilité d'avoir au moins une défaillance avant le temps ( $t$ ), qui représente la probabilité cumulative des défaillances, est appelé : « **probabilité de défaillance** ».

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (\text{II.3})$$

- **Taux de défaillance** : Prenons maintenant une pièce ayant servi pendant une du rée de temps  $t$  et encore survivante. La probabilité qu'elle tombe en panne entre l'âge  $T$  qu'elle a déjà et l'âge  $T + dt$  est représentée par la probabilité conditionnelle qu'elle tombe en panne entre  $T$  et  $T + dt$ . Sachant qu'elle a survécu jusqu'à  $T$ . D'après le théorème des probabilités conditionnelles cette probabilité est égale à :

$$\lambda(t).d(t) = \frac{F(t+dt)}{R(t)} = \frac{dF(t)}{1-F(t)} = \lambda(t) = \beta \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{II.4})$$

Avec  $\lambda(t)$  est le taux de défaillance de la pièce d'âge T. [13]

On a donc :

$$\lambda(t) = \frac{F(t)}{R(t)} \quad (\text{II.5})$$

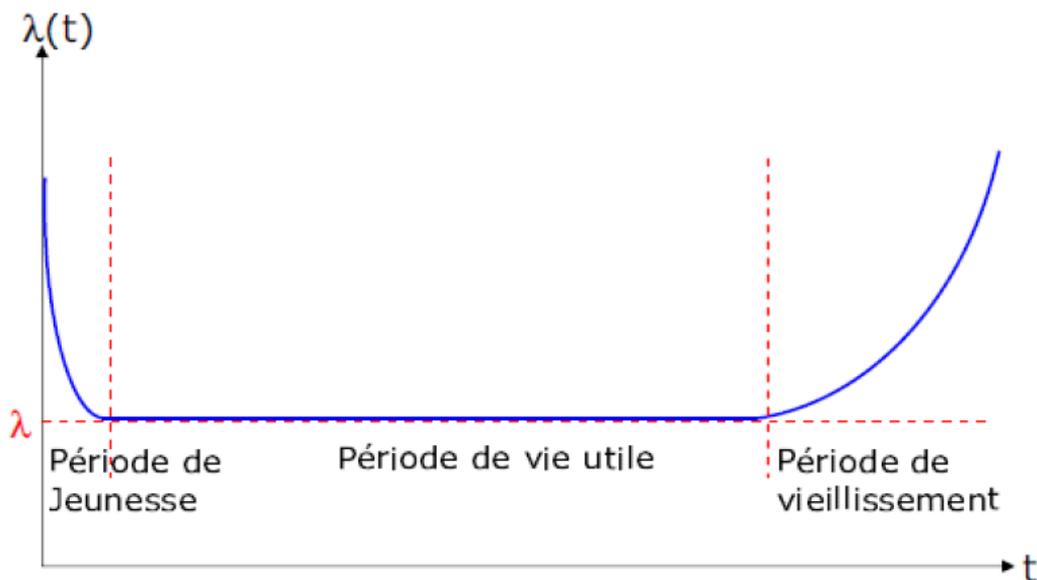


FIG.II.1. Taux de défaillance, Courbe en baignoire [12].

La vie d'un composant peut donc être divisée en trois périodes :

1. *Période de jeunesse ou de défaillances précoces.* Le taux de défaillance diminue. La probabilité de panne d'un composant décroît avec le temps, les défaillances sont dues à des problèmes de qualité (mise en place des procédés et déverminage).
2. *Période de vie utile où le taux de défaillance sensiblement constant.* Elle est représentée par un taux de défaillance constant. La probabilité d'une panne est indépendante du nombre d'heures de fonctionnement de l'équipement (pannes aléatoires). Cette période, souvent inexistante pour la mécanique, est celle de référence pour l'électronique.
3. *Période de vieillesse ou défaillances d'usure.* La probabilité de panne augmente avec le nombre d'heures de fonctionnement. Plus l'équipement est vieux, plus il est probable d'avoir une défaillance. Ce type de comportement est caractéristique des systèmes soumis à usure ou autres détériorations progressives qui correspondent à des taux de défaillance croissants. La fiabilité se limite généralement à l'étude des phases 2 et 3, on exclut les problèmes de qualité en ne tenant pas compte du déverminage qui a lieu lors de la première phase.

- **La MTBF** : Le temps moyen jusqu'à défaillance, ou moyenne des temps de bon fonctionnement est donnée par les relations suivantes :

$$MTBF = \frac{\sum \text{Nombre de bon fonctionnement}}{\text{Nombre d'intervalle de temps de bon fonctionnement}} \quad (\text{II.6})$$

$$MTBF = \int_0^t R(t)dt \quad (\text{II.7})$$

#### d) Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité

Dans ce paragraphe, nous présenterons quelques distributions de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse des données de vie et qui sont communes à plusieurs disciplines. Nous parlerons en particuliers des lois continues. Nous énoncerons les principales propriétés de ces lois (densité de probabilité, fonctions fiabilité et taux de défaillance) ainsi que leur application en fiabilité.

##### 1. La loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C'est une loi simple, très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance est constant. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales.

La densité de probabilité d'une loi exponentielle de paramètre  $\lambda$  s'écrit :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{II.8})$$

La fonction fiabilité :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{II.9})$$

Le taux de défaillance est constant dans le temps :

$$\lambda(t) = \lambda \quad (\text{II.10})$$

##### 2. La loi normale (Laplace-Gauss)

La loi normale est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. En fiabilité, la distribution normale est utilisée pour représenter la distribution des durées de vie de dispositifs en fin de vie (usure) car le taux de défaillance est toujours croissant. On ne l'utilisera que si la moyenne des durées de vie est supérieur à 3 fois l'écart type. En effet,  $t$  est toujours positif, alors que la variable normale est définie de  $-\infty$  à  $+\infty$ ; la restriction imposée réduit la probabilité théorique de trouver une durée de vie négative à environ 0.1 %.

La densité de probabilité d'une loi normale de moyenne  $\mu$  et d'écart-type  $\sigma$  s'écrit:

$$f(t) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\delta}\right)^2} \quad (\text{II.11})$$

La fonction de répartition s'écrit :

$$F(t) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}} dx \quad (\text{II.12})$$

La fiabilité donnée par :

$$R(t) = 1 - \Phi((t-\mu) / \sigma) \quad (\text{II.13})$$

Où  $\Phi$  est la fonction de répartition de la loi normale centrée ( $\mu=0$ ) réduite ( $\sigma=1$ ):

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (\text{II.14})$$

### 3. La loi Log-normale (ou de Galton)

Une variable aléatoire continue et positive T est distribuée selon une loi log-normale si son logarithme népérien est distribué suivant une loi normale. Cette distribution est largement utilisée pour modéliser des données de vie, en particulier les défaillances par fatigue en mécanique.

La densité de probabilité d'une loi log-normale de paramètres positifs  $\mu$  et  $\sigma$  est :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}, t > 0 \quad (\text{II.15})$$

La fonction de fiabilité :

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} .dt \quad (\text{II.16})$$

La fonction de répartition :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} .dt \quad (\text{II.17})$$

Le domaine de définition n'étant jamais négatif, il n'y a aucune limitation à l'emploi de la distribution log-normale en fiabilité. Le taux de défaillance est croissant dans le début de vie puis décroissant en tendant vers zéro et la distribution est très dissymétrique.

**4. Loi de Weibull :** La loi de Weibull est utilisée en fiabilité, en particulier dans le domaine de la mécanique. Cette loi a l'avantage d'être très souple et de pouvoir s'ajuster à différents résultats d'expérimentations. La loi de Weibull est une loi continue à trois paramètres :

- **Le paramètre de position  $\gamma$  :** Qui représente le décalage pouvant exister entre le début de l'observation (date à laquelle on commence à observer un échantillon) et le début du que l'on observe (date à laquelle s'est manifesté pour la première fois le processus observé).
- **Le paramètre d'échelle  $\eta$  :** Qui, comme son nom l'indique, nous renseigne sur l'étendue de la distribution.
- **Le paramètre de forme  $\beta$  :** Il est associé à la cinétique du processus observé

✓ **Densité de probabilité**

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (\text{II.18})$$

✓ **Fonction de répartition**

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (\text{II.19})$$

✓ **Loi de fiabilité**

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (\text{II.20})$$

✓ **Taux de défaillance**

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}}{e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}} \Rightarrow \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{II.21})$$

✓ **Remarque**

$$\text{Si } \left\{ \begin{array}{l} \gamma = 0 \\ \beta = 1 \end{array} \right. \longrightarrow \lambda(t) = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (\text{II.22})$$

$$a = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \text{ et } b = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (\text{II.23})$$

✓ **Moyenne des temps de bon fonctionnement**

$$\text{MTBF} = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (\text{II.24})$$

En fonction de la valeur de  $\beta$  d'où :  $\text{MTBF} = \gamma + \alpha \eta$

Le paramètre de position  $\gamma$  étant souvent nul, on se ramène à :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{II.25})$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{II.26})$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{II.27})$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{II.28})$$

Donc  $\gamma = 0$  ou, en faisant le changement de variable :  $t_1 = t - \gamma$ , on obtient la distribution de Weibull à 2 paramètres, définie pour  $t$  (ou  $t_1$ ) positif ou nul, dont les caractéristiques sont illustrées sur la figure suivante :

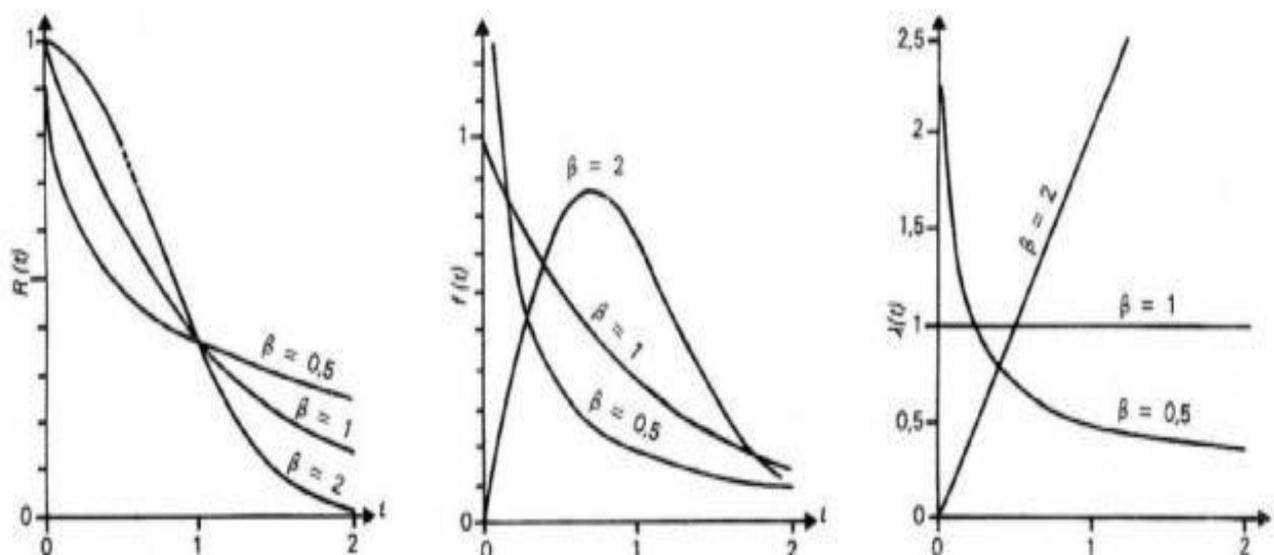


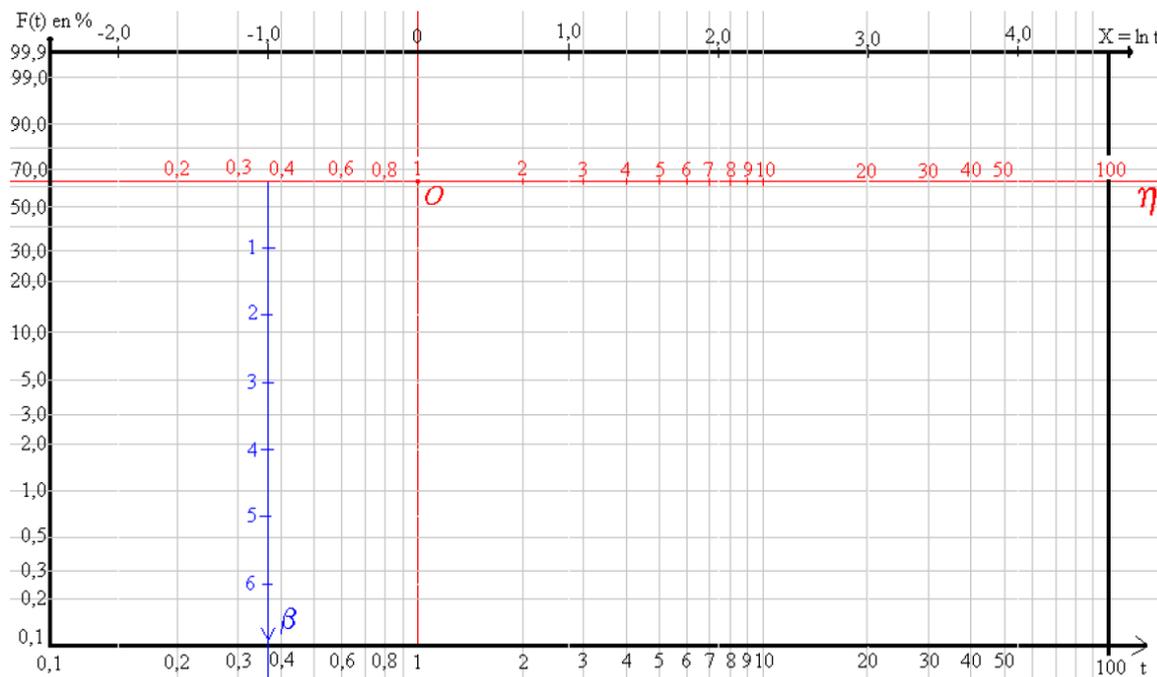
FIG.II.2. Principales propriétés de la distribution de Weibull [12].

- **Application à la fiabilité :** Suivant les valeurs de  $\beta$ , le taux de défaillance est :
  - ✓ Soit décroissant ( $\beta < 1$ );
  - ✓ soit constant ( $\beta = 1$ );
  - ✓ soit croissant ( $\beta > 1$ ).

La distribution de Weibull permet donc de représenter les trois périodes de la vie d'un dispositif (courbe de baignoire).

Le cas  $\gamma > 0$  correspond à des dispositifs dont la probabilité de défaillance est infime jusqu'à un certain âge  $\gamma$ .

- **Estimation des paramètres de la loi de Weibull :** Un des problèmes essentiel est l'estimation des paramètres  $\beta$ ,  $\eta$  et  $\gamma$  de cette loi, pour cela, nous disposons de la méthode suivante :
- **Graphique à échelle fonctionnelle :** Pour la distribution de Weibull à 3 paramètres, on fait la transformation :



**FIG.II.3** Représentation sur graphique à échelle fonctionnelle de la distribution de Weibull (graphique d'Allan Plait) [12].

✓ **Recherche de  $\gamma$**

- Si le nuage de points correspond à une droite, alors :  $\gamma = 0$ .
- Si le nuage de points correspond à une courbe, on la redresse par une translation de tous les points en ajoutant ou en retranchant aux abscisses "t", une même valeur (gamma) afin d'obtenir une droite.

✓ **Recherche de  $\eta$**

- La droite de régression linéaire coupe l'axe A à l'abscisse  $t = \eta$ .

✓ **Recherche de  $\beta$**

- Béta est la pente de la droite de corrélation.
- On trace une droite parallèle à la droite de corrélation, et passant par  $\eta = 1$ . On lit ensuite béta sur l'axe B.

### II.3.2. Maintenabilité

- a) **Définitions** : C'est l'aptitude d'un système à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits (AFNOR (1993), norme NF x 60- 010).

C'est la probabilité que la maintenance d'un système S accomplie dans des conditions données, soit effectuée sur l'intervalle  $(0, t)$  sachant qu'il est défaillant à l'instant  $t = 0$ .

$$M(t) = \text{Pr}(S \text{ est réparé sur l'intervalle } (0, t)).$$

**Maintenabilité = Etre rapidement dépanné.**

Il s'agit donc d'un équivalent à la fiabilité mais appliqué à la réparation au lieu de la défaillance. L'*immaintenabilité* correspond à la probabilité contraire, soit :

$$\overline{M}(t) = 1 - M(t)$$

La figure III.5 représente l'allure de la maintenabilité  $M(t)$  en fonction du temps. On constate qu'à l'origine des temps  $M(0) = 0$ , ce qui est évident car l'entité est défaillante. Elle possède une asymptote égale à 1 car l'on peut supposer qu'elle sera réparée au bout d'un temps donné sinon cette entité ne serait d'aucune utilité.

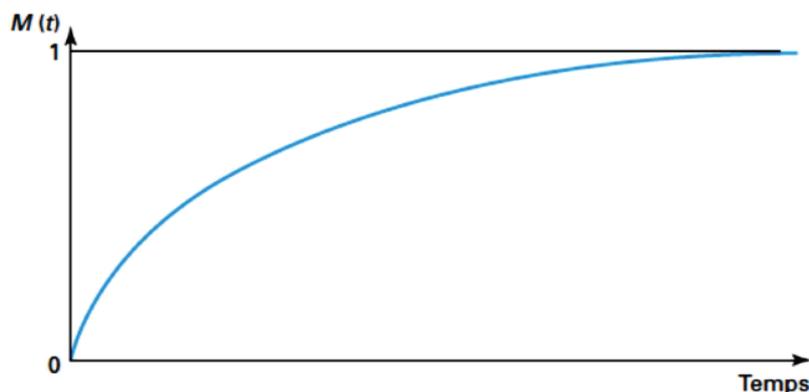


FIG.II.4. Allure de la courbe de maintenabilité [12].

- b) **Chronologie des temps** : Les défaillances étant par définition subies sans que l'on puisse prévoir leurs instants d'apparition. Ils importent à tout responsable d'une installation industrielle de faire face rapidement aux conséquences d'une défaillance. Dans de nombreuses situations, sauf en cas de matériels redondants, il sera indispensable de réparer les défaillances dans un temps le plus court possible, pour réduire les temps d'indisponibilité.

La compréhension des termes utilisés en *maintenabilité* rend nécessaire l'établissement d'un diagramme chronologique des temps entre l'instant de l'apparition de la défaillance et l'instant de la remise en service de l'installation.

Le diagramme de la figure (II.5) résume tous les instants importants de cette chronologie.

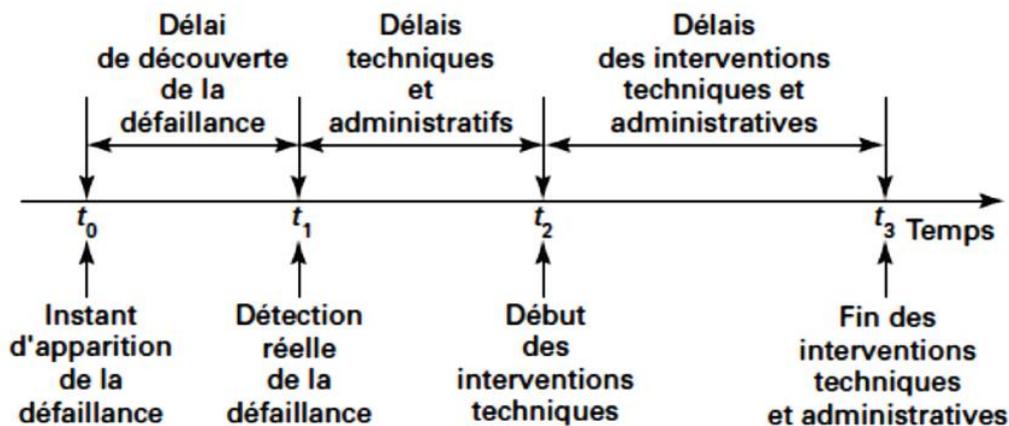


FIG.II.5. Chronologie des temps des activités de maintenance [12].

En fonction des moyens mis à la disposition des opérateurs (systèmes d'alarme ou bien informations venant de rondes de surveillance), il s'écoulera un délai  $t_1 - t_0$  allant de quelques secondes à quelques heures pour réaliser le diagnostic de la présence d'une défaillance.

La confirmation de la défaillance ayant été réalisée, il s'écoule des délais technique et administratifs pour réunir les personnels, les pièces détachées et les autorisations administratives (par exemple, consignation d'autres matériels) pour débuter les opérations de réparation.

A partir du temps  $t_2$ , les opérations de maintenance peuvent se dérouler et incluent également les procédures d'assurance qualité et l'obtention des autorisations administratives éventuelles (par exemple, pour les appareils à pression soumis à réglementation). Ce n'est qu'à partir du temps  $t_3$  que l'on peut considérer que l'installation est devenue à nouveau opérationnelle.

- c) **MTTR** : Le terme **MTTR** (Mean Time To Repair ou Temps Moyen de Réparation) est la durée moyenne jusqu'à la réparation d'une entité réparable. Pour cette variable aléatoire, le **MTTR** se calcule par la formule :

$$MTTR = \int_0^{+\infty} (1 - M(t)) dt \quad (II.29)$$

Donc on peut écrire :

$$MTTR = \frac{\sum \text{Temps d'intervention pour n pannes}}{\text{Nombre de pannes}}$$

Le *MTTR* s'assimile ainsi à la durée moyenne jusqu'à la première réparation et requiert la connaissance de l'état initial de l'entité. Comme il y a en général plusieurs modes de défaillances, il faut définir plusieurs *MTTR* d'une entité, car à chaque mode de défaillance correspondra un *MTTR* spécifique.

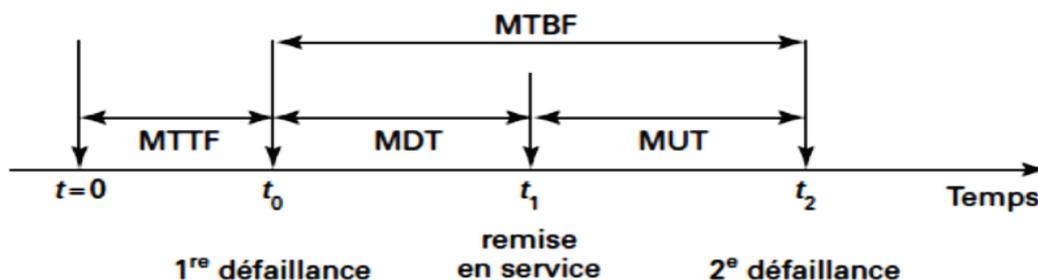


FIG.II.6. Relations entre les liens temporels en fiabilité, disponibilité et maintenabilité [12].

d) Taux de réparation  $\mu(t)$ :

$$\mu(t) = \frac{1}{MTTR} \tag{II.30}$$

La probabilité de réparation d'un composant est principalement fonction du temps écoulé depuis l'instant de défaillance. Il existe un certain délai  $t$  avant que le composant puisse être réparé. Ce délai  $t$  comprend le temps de détection et le temps d'attente de l'équipe de réparation.

e) Intensité de réparation  $g(t)$

$$g(t) = \frac{dM(t)}{dt} \tag{II.31}$$

A partir de la définition de la maintenabilité, on peut définir l'*intensité de réparation*  $g(t)$ , qui représente la densité de probabilité de la variable aléatoire correspondante au temps de réparation.

### II.3.3. Disponibilité

La disponibilité est définie comme l'« aptitude d'un dispositif, sous les aspects combinés de sa fiabilité, de sa maintenabilité et de la logistique de maintenance, à remplir ou à être en état de remplir une fonction à un instant donné ou dans un intervalle de temps donné » (cf. NF X 60-503).

Cette définition est très dense et comporte trois parties qui méritent d'être commentées séparément : « *Sous les aspects combinés de sa fiabilité, de sa maintenabilité et de la logistique de maintenance..* ».

L'aptitude contraire est appelée indisponibilité et est définie par :

$$A = 1 - A(t)$$

La disponibilité  $A(t)$  est une grandeur instantanée. L'entité peut donc avoir subi une panne puis une réparation avant l'instant  $t$ , contrairement à la fiabilité  $R(t)$  qui est une grandeur mesurée sur une durée d'intervalle  $[0, t]$ . La confusion entre disponibilité et fiabilité est due au fait que ces deux concepts sont équivalents quand le système est non réparable.  $A(t)$  est donnée aussi par :

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (\text{II.32})$$

L'interprétation physique est illustrée sur la figure III.8 où sont représentés les cas d'entités disponibles et non disponibles à l'instant  $t = 0$ .

Dans l'industrie cela revient au constat que, sous réserve d'une politique de maintenance efficace, au bout d'un temps donné les entités ont atteint leur limite asymptotique de disponibilité. Comme la fiabilité, plusieurs types de disponibilités peuvent être utilisés :

- **La disponibilité instantanée prévisionnelle** : Pour un dispositif ou une machine caractérisé par les paramètres  $\lambda$  et  $\mu$ , supposés être constants, on montre que la disponibilité instantanée s'exprime par la relation :

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (\text{II.33})$$

- **La disponibilité moyenne** : Une disponibilité moyenne sur un intervalle de temps donné  $[t_1, t_2]$  de la disponibilité instantanée prévisionnelle, ou mesurée en phase opérationnelle par la durée de fonctionnement effectif divisée par la

durée donnée. 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 (MTBF) ou mean time between failure:* Durée moyenne entre deux défaillances consécutives de l'entité.

En général, on a la relation :

$$MTBF = MUT + MDT$$

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

Avec d'après la relation (II.12) on a :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

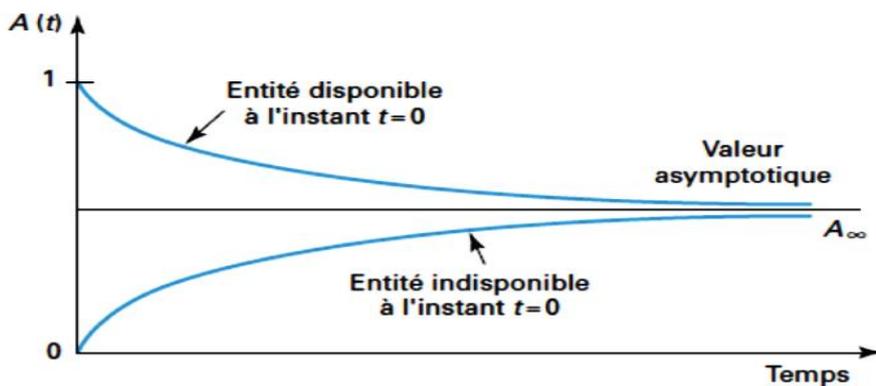


FIG.II.7. Disponibilité en fonction du temps t [12].

La figure (III.9) fournit les représentations graphiques de ces définitions en fonction du temps. La disponibilité asymptotique se déduit du *MUT* et du *MTBF* par la relation :

$$A_{\infty} = \frac{MUT}{MTBF}$$

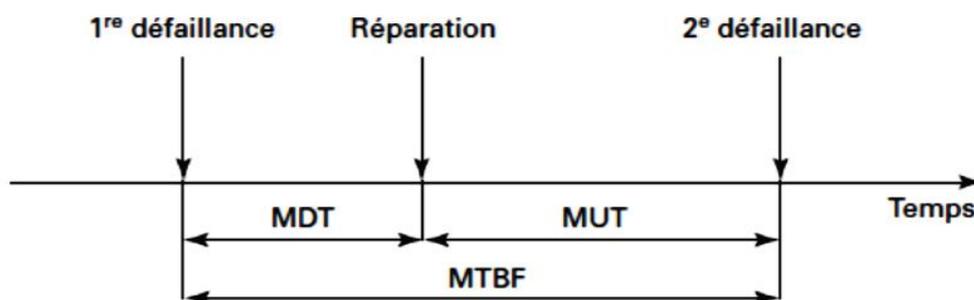


FIG.II.8. Représentation des MTBF, MDT et MUT [12].

Pour les industries disposant d'équipes performantes de maintenance, la valeur de  $A$  est supérieure à 80%.

### II.3.4. Sécurité

La sécurité restant un terme très général, il n'existe pas actuellement de consensus pour une normalisation. Alors le terme « *security* » concerne les aspects réglementaires de la sécurité : Respects des normes, contrôle des accès à des locaux ou à des systèmes informatiques. Tandis que le terme « *safety* » enseigné aux *États-Unis* sous le nom d'« *industrial safety* » recouvre les aspects techniques de la sécurité.

Les circonstances et les conséquences des catastrophes et accidents sont variables. Elles montrent que le risque présente deux aspects : *probabilité et conséquences*.

Au niveau des conséquences, celles-ci se caractérisent par la sécurité : protection des personnes, de l'environnement. Mais aussi protection de l'outil de production c'est l'aspect *économique* et, par extension *social*.

Deux voies peuvent être pratiquées pour réduire les risques :

- Diminution de la probabilité d'occurrence de « *l'événement indésirable* ».
- Atténuation des conséquences de « *l'événement indésirable* ».

L'évaluation de la sécurité est actuellement encore limitée et est effectuée pour les installations chimiques, les centrales nucléaires, les plates-formes pétrolières et l'aéronautique. Elle est basée sur des études statistiques des impacts des accidents réels, expérimentés ou simulés; sur l'homme et l'environnement par notion de gravité.

La démarche de la construction de la sécurité implique au départ la maîtrise des risques à un niveau acceptable, le risque zéro étant un concept qui ne peut se réaliser dans les systèmes industriels, contrairement à ce que de nombreux discours ou écrits ont tenté de le

laisser croire, il y a seulement quelques années. Le niveau de risque acceptable prend en compte des paramètres techniques, économiques, médiatiques, sociaux voire politiques.

Ces niveaux acceptables sont, pour des industries à risques, définis par les autorités administratives sous la direction des autorités ministérielles de tutelle.

Le rôle d'un spécialiste en sûreté de fonctionnement est de ramener le risque industriel à son niveau acceptable en définissant :

- Les critères d'acceptabilité des risques ;
- des méthodes de conception en sécurité ;
- des méthodes d'évaluation des risques résiduels et de vérification de leur niveau d'accessibilité.

Les études de sécurité visent essentiellement à évaluer la probabilité de l'occurrence d'un événement indésirable en prenant en compte dès la conception tous les facteurs initiateurs :

- **Facteurs techniques** : Matériels et produits manipulés, incluant les problèmes de conception, de fabrication, d'assurance qualité, de conduite et de maintenance.
- **Facteurs humains** : Qualité de la formation, ergonomie, procédures.
- **Facteurs environnementaux** : Risques naturels, milieux ambiants, tel-que : Poussières, gaz, électricité statique, ... .

La figure (III.9) résume les liens entre fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité.

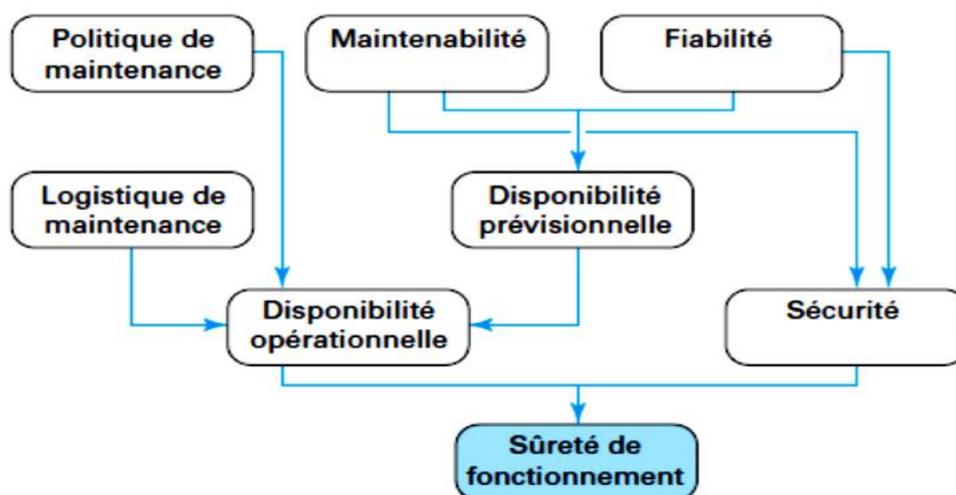


FIG.II.9. Relations entre fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité [12].

### II.4. La méthode d'analyse prévisionnelle (la courbe ABC)

#### II.4.1. Objectif

Le but est d'analyser un phénomène, en le représentant par un graphique qui permet de déterminer l'existence d'une relation entre deux groupes de données. La courbe ABC permette de classer les événements selon l'enjeu qu'elles représentent.

Elle permette aussi de visualiser rapidement les priorités d'action, de faire un choix et de se concentrer sur les problèmes à traiter en priorité. C'est un moyen simple de classer les phénomènes par ordre d'importance.

#### II.4.2. Graphique sous forme d'histogramme

Les données chiffrées sont plus faciles à comprendre quand elles sont représentées sous forme de graphique que sous forme d'une suite de chiffres. Le graphique (synthèse visuelle) est un outil de choix pour l'établissement de tableaux de bord, d'illustrations de rapports, d'outils de contrôle et de prise de décision. L'histogramme est souvent utilisé car son format standardisé le rend compréhensible par tous.

#### II.4.3. Intérêt

L'intérêt de la courbe ABC est de montrer, dans un premier temps, qu'il est plus payant de s'attaquer à la résolution des causes principales de défauts que de perdre un temps précieux à traiter des causes qui n'apparaissent que rarement. Il permet ainsi de distinguer facilement l'essentiel du secondaire.

Dans un environnement industriel, tout et n'importe quoi pourrait être amélioré indéfiniment. Mais l'amélioration a un coût. Elle doit donc avoir une contrepartie : apporter une valeur ajoutée ou au minimum supprimer des pertes. Le diagramme de Pareto permet donc de justifier une action d'amélioration de la qualité.

#### II.4.4. Méthodologie

Elle consiste à classer les pannes par ordre décroissant de coûts, chaque panne se rapportant à une machine ou rubrique. Puis à établir un graphe faisant correspondre le pourcentage de coûts, chaque panne se rapportant à une machine ou rubrique Zone "A".

Dans la majorité des cas, on constate qu'environ **20%** des pannes représente **80%** des coûts, ceci constitue la **zone "A"**, zone des priorités. **Zone "B"** Dans cette tranche, les **30%** des pannes suivantes ne coûtent **15%** supplémentaire. **Zone "C"** Dans cette zone les **50%** des pannes restantes ne représentent qu'à **5%** de coûts. [14]

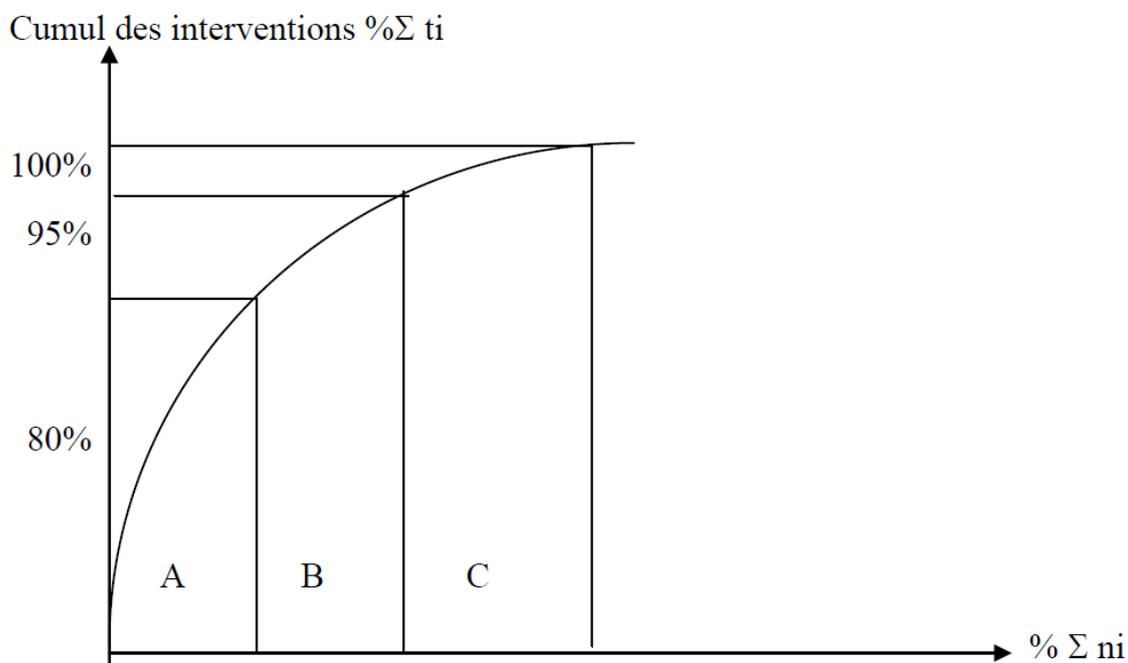


FIG.II.10. La courbe ABC [14].

---

## **Chapitre III**

---

# **Analyse FMD du compresseur centrifuge BCL406**

---

**III.1. Introduction**

L'évaluation du niveau de la sureté de fonctionnement d'un équipement est faite par l'analyse de la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité. C'est l'objectif de ce chapitre où on tente par l'exploitation d'un l'historique de pannes d'un compresseur centrifuge du type BCL406 de faire face à une étude expérimentale des indicateurs FMD. Pour enfin pouvoir définir un plan de maintenance préventive.

**III.2. Généralité sur les compresseurs****III.2.1. Définition**

Les compresseurs sont des appareils qui transforment l'énergie mécanique fournie par une machine motrice en énergie de pression; en réalisant un accroissement de la pression d'un fluide à l'état gazeux [14].

**III.2.2. Type des compresseurs et classification**

Les compresseurs peuvent être classés selon plusieurs paramètres, mais généralement en peut les classer à partir du [14]:

- ✓ Principe de fonctionnement : volumétrique, dynamique.
- ✓ mouvement des pièces mobiles : mouvement linéaire, rotatif.
- ✓ les compresseurs d'air.
- ✓ les compresseurs des gaz.

On général il existe deux grandes familles de compresseur, les compresseurs volumétriques et les compresseurs dynamiques, Dans les premiers, l'élévation de pression est obtenue on réduisant un certain volume de gaz par action mécanique. Dans les seconds, on augmente la pression en convertissant de façon continue l'énergie cinétique communiquée au gaz en énergie de pression due à l'écoulement autour des aubages dans la roue.

La figure suivante donne une classification des compresseurs selon leurs technologies et leurs modes de fonctionnement.

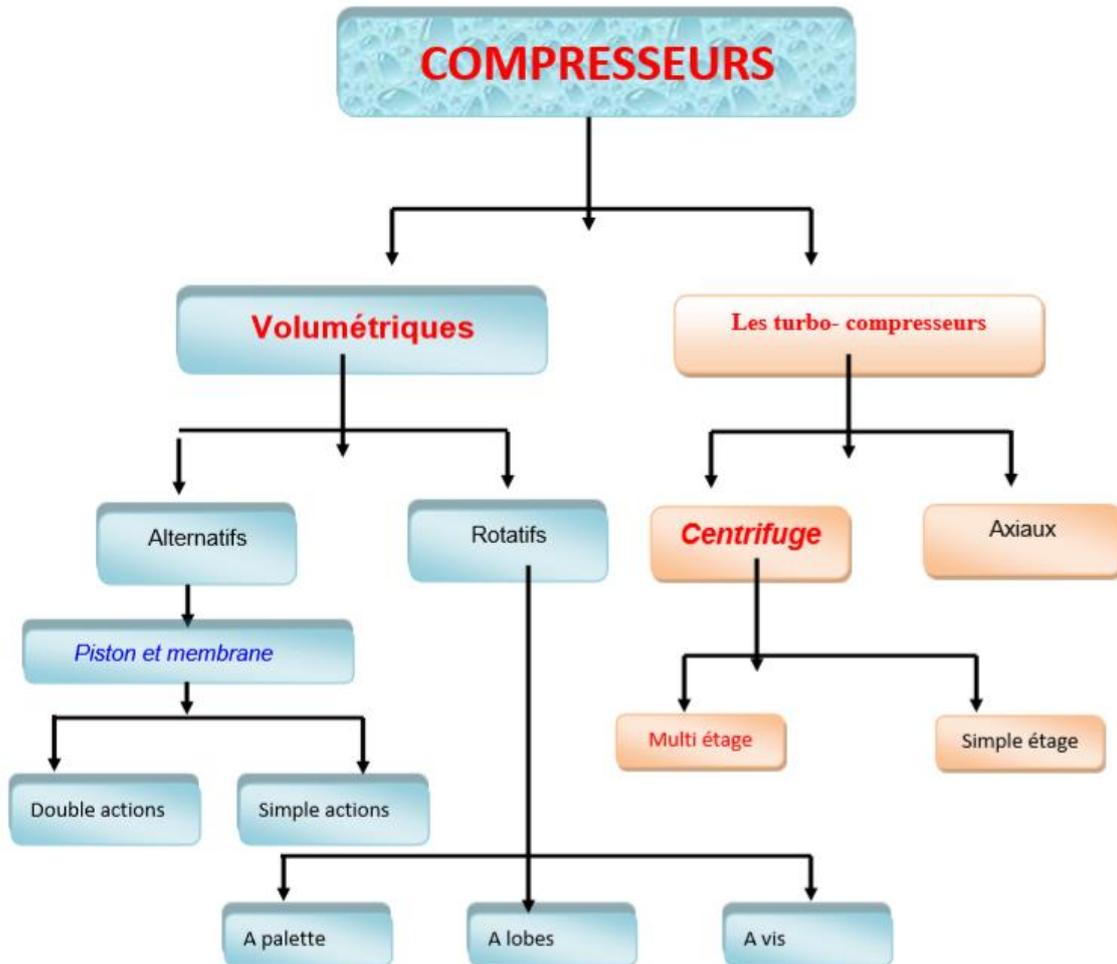


FIG. III.1. Les principales catégories de compresseurs [14].

### III.2.3. But de la compression

La compression en générale, peut être imposée par la nécessité technique de déplacer une certaine quantité de gaz d'un système à une certaine pression donnée, vers un autre système à une autre pression plus élevée.

Cette opération a pour but [14] :

- Faire circuler un gaz dans un circuit fermé.
- Produire des conditions favorables (de pression) pour des réactions chimiques.
- Envoyer un gaz dans un pipe-line de la zone de production vers l'utilisateur.
- Obtenir de l'air comprimé pour la combustion.
- Récupérer du gaz (unités de G.N.L ou autres).

### III.3. Description du compresseur centrifuge BCL406

#### III.3.1. Présentation du compresseur centrifuge BCL406

Le compresseur centrifuge **BCL406** est une machine "dynamique" à écoulement continu de fluide. Des roues solidaires à l'arbre fournissent de l'énergie à ce dernier. Une partie de cette énergie est transformée en augmentation de pression directement dans les roues, le reste dans le stator, c'est-à-dire dans le diffuseur [15].

Ce type de machine est constitué par un corps extérieur contenant la partie du stator dite ensemble de diaphragmes (B) où est introduit un rotor formé par l'arbre (C), une ou plusieurs roues (D), le piston d'équilibrage (E) et le collet (F) du palier de butée.

Le rotor entraîné par la machine motrice moyennant le moyeu (G) tourne sur les paliers porteurs (H) et est gardé dans sa position axiale par le palier de butée (I). Des dispositifs d'étanchéité à labyrinthe (L) et, si nécessaire, des étanchéités huile d'extrémité agissent sur le rotor. La figure (III.2) donne un schéma descriptif de compresseur centrifuge **BCL406**.

A- corps extérieur; B-diaphragmes; C-arbre; D-roues ; E-piston d'équilibrage ; F-collet du palier de butée; G-rotor; H-paliers porteurs; I-palier de butée ; L-labyrinthe

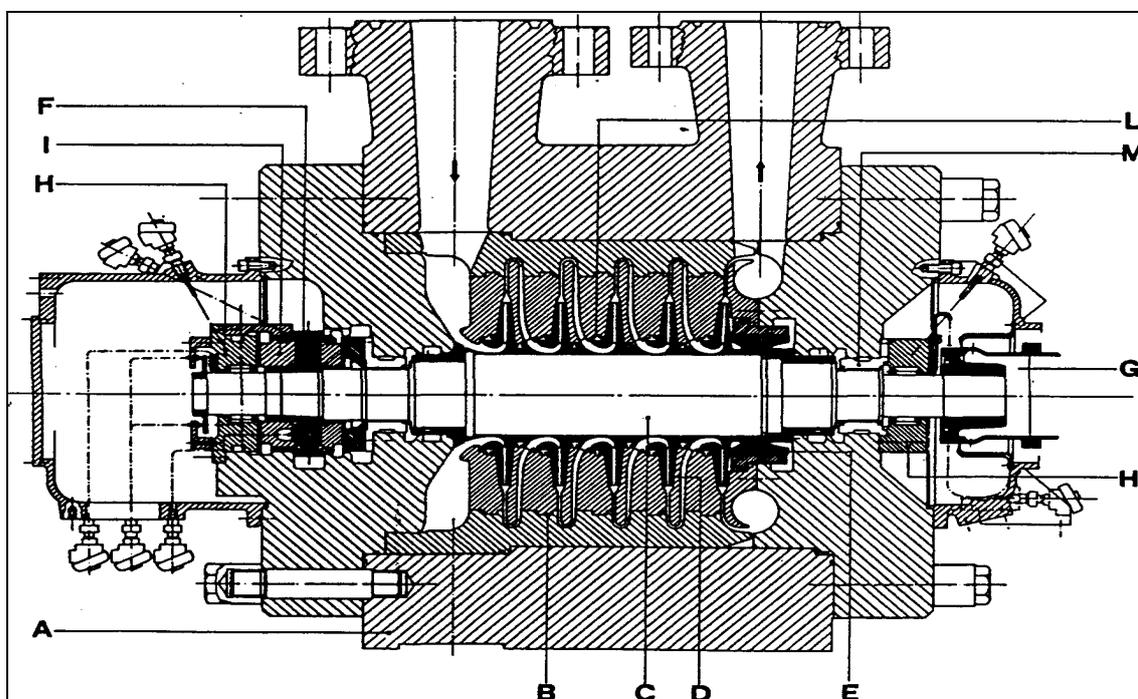


FIG. III.2. Compresseur centrifuge BCL406 [15].

## III.3.2. Désignation

Les compresseurs centrifuges sont présentés par une forme alphanumérique, selon une série de lettres majuscules et de numéros, tel qu'il est indiqué au schéma de la figure (III.3) [15]:

- ✓ Les lettres majuscules indiquent les caractéristiques du corps; par exemple les lettres **BCL** signifient que c'est un compresseur ayant un corps ouvert selon une direction verticale (corps du type en forme de "barrel").
- ✓ Les numéros placés après les lettres indiquent le diamètre nominal et le nombre de roues, par exemple, un compresseur ayant un corps à division verticale à deux étages de compression et un rotor avec six roues de diamètre nominal de 400 mm.

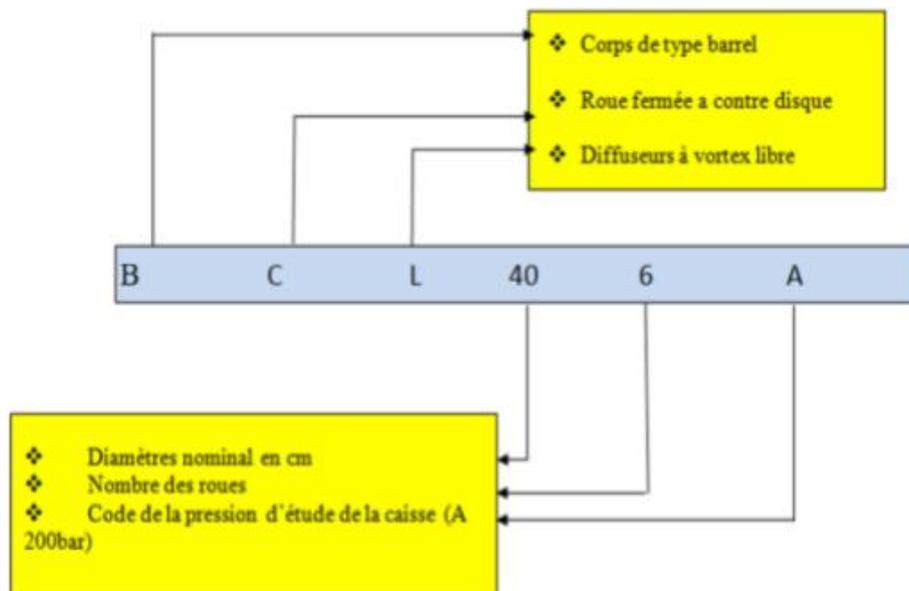


FIG. III.3. Codification du Compresseur centrifuge BCL406 [15].

On trouve alors le cas de notre étude un compresseur centrifuge indiqué par la désignation: **BCL406**. Ce type de compresseur centrifuge est conçu essentiellement pour comprimer les gaz à haute pression. Il peut comprimé généralement un gaz de 30 à 80 bars.

Ce compresseur comprend principalement un ensemble statique composé de : *Corps, extrémités supérieures, diaphragmes, étanchéité et paliers*. Un ensemble rotatif composé de : Rotor constitué lui même par un arbre, des roues et un tambour d'équilibrage.

### III.3.3. Rôle

Les compresseurs centrifuges sont entraînés par une turbine de type **MS5002B/C** par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse et un montage en série avec des accouplements flexibles. Le rôle des compresseurs est de convertir l'énergie mécanique en énergie de pression de gaz [15].



*FIG. III.4. Compresseur centrifuge BCL406 [15].*

### III.3.4. Position du BCL406 dans la chaîne cinématique

La chaîne cinématique est une chaîne de transformation de mouvement. Elle consiste en un ensemble de corps rigides articulés entre eux, les articulations peuvent être de nature extrêmement variées suivant le type de mouvement relatif qu'elles autorisent et peuvent impliquer plusieurs degrés de liberté.

Le compresseur **BCL406** noté aussi sur le schéma du train de compression de la figure (III.5) par **K102**. C'est le deuxième étage du train de compresseur dans la section de compresseur **HP** du gaz, il se charge de comprimer le gaz de refoulement du **K101** additionnés à ceux de régénération provenant de la section de déshydratation [15].

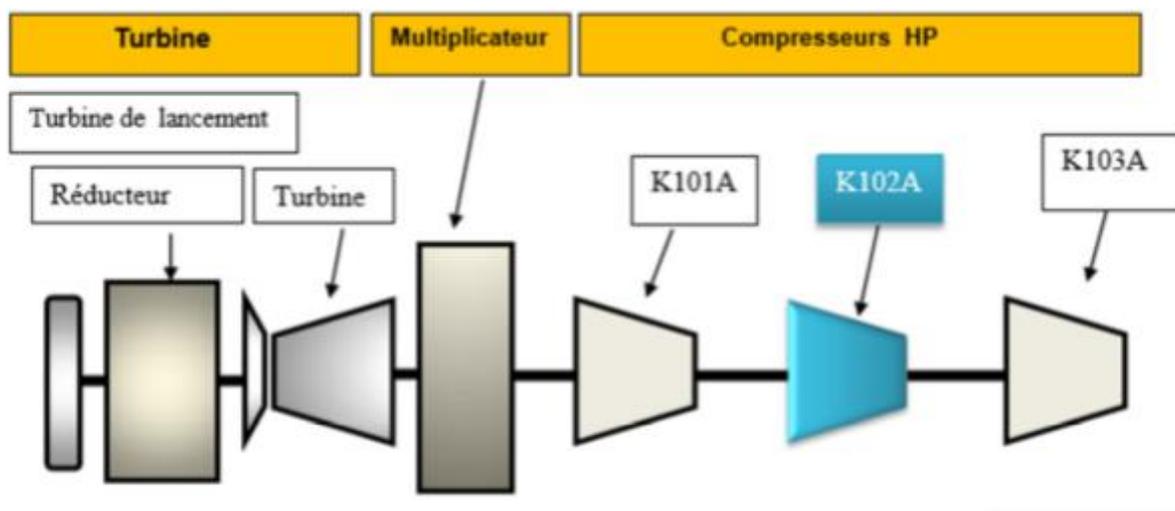


FIG. III.5. Schéma simplifié d'un train de compression. [15]

Le tableau suivant donne certaines caractéristiques du compresseur **BCL406**

Tableau III.1. Caractéristiques de fonctionnement du compresseur **BCL406**. [15]

Paramètres	Valeurs	Unité
Débit	99400	Nm <sup>3</sup> / h
Pression d'aspiration	30	Bar
Pression de refoulement	80	Bar
Température d'aspiration	50	°C
Température de refoulement	150	°C
Puissance absorbé	5504	KW
Vitesse de rotation	10323	tr/min
Vitesse max. continue	10375	tr/min

## III.4. Présentation d'historique des pannes du compresseur BCL406

Suite à un suivi de l'historique des pannes du compresseur centrifuge BCL406, de la période illustrée d'après les dates de démarrage et d'arrêt. On résume au tableau suivant les causes des arrêts, ainsi que, les actions prises pour la remise en états de bon fonctionnement. le tableau (III.2) contient aussi les temps d'arrêt et les temps de bon fonctionnement.

Tableau III.2. Dossier historique de compresseur centrifuge BCL406.

N°	Date de démarrage	Date D'arrêt	TBF (h)	TTR (h)	Causes	Actions
1	05/01/2007	07/07/2007	3648	6	Bruit et patinage	Changement courroie de l'aère d'huile
2	07/07/2007	29/12/2007	2085	05	Fuite d'huile	Changement filtre d'huile
3	29/12/2007	02/01/2008	43	07	Bruit et patinage	Changement courroie de l'aère d'huile
4	02/01/2008	20/05/2008	1653	5	Haute Température	Changement d'huile
5	20/05/2008	17/03/2009	3490	12	Fermeture de la circulation d'huile	Réparation de clapet
6	18/03/2009	04/04/2009	182	06	Fuite d'huile	Changement filtre d'huile
7	04/04/2009	15/06/2010	862	06	Augmentation de bruit (son de vibration)	Changement accouplement de pompe graissage moteur
8	15/06/2010	26/06/2010	132	24	Haute Température et augmentation de bruit (son de vibration)	Changement palier de l'aère d'huile
9	28/06/2010	06/09/2010	840	07	Haute Température	Changement filtre d'huile et l'huile
10	06/09/2010	21/04/2011	2640	08	Fuite d'huile	Étanchéité fuite d'huile
11	21/04/2011	23/04/2011	31	24	Augmentation de bruit (son de vibration)	Travaux d'alignement du moteur de compression
12	25/04/2011	14/08/2011	1332	07	Fuite d'huile	Changement filtre d'huile et Huile
13	14/08/2011	12/02/2012	2162	07	Bruit et patinage	Changement courroie de l'aère d'huile
14	12/02/2012	25/06/2012	1217	08	Haute Température	Changement d'huile
15	25/06/2012	15/07/2012	233	12	Haute Température et augmentation de bruit (son de vibration)	Changement palier de l'aère d'huile
16	16/07/2012	21/11/2012	1584	06	Bruit et patinage	Changement courroie de l'aère d'huile
17	21/11/2012	01/06/2013	570	24	Augmentation de bruit (son de vibration)	Travaux d'alignement du moteur de compression
18	03/06/2013	05/02/2014	2964	07	Fuite d'huile	Étanchéité fuite d'huile

### III.5. Méthode d'analyse prévisionnelle de Pareto

Pour l'application de la méthode d'analyse de **Pareto** dite aussi la méthode de la courbe **ABC**. Il faut en premier lieu revenir au tableau (III.2), pour faire un classement des causes par ordre décroissant selon les heures de pannes, ce qui va donner tableau (III.3), qui résume les causes d'arrêt en six groupes de causes. Ensuite on va procéder à la construction de la courbe de Pareto.

**Tableau III.3. Cumul causes d'arrêt du compresseur centrifuge BCL406.**

N°	Causes	TA (h)	Cumul TA	% TA	Nbre Cause	Cumul Cause	% Cumul Cause
1	Augmentation de bruit	54	54	29.83	3	3	16,66
2	Haute Température et Augmentation de bruit	36	90	49.72	2	5	27,77
3	Fuite d'huile	33	123	67.95	5	10	55,55
4	Bruit et patinage	26	149	82.32	4	14	77,77
5	Haute Température	20	169	93.37	3	17	94,44
6	Fermeture de la circulation d'huile	12	181	100.00	1	18	100

#### III.5.1. La courbe d'analyse ABC

D'après le tableau précédant, tableau (III.3), on a pu tracer la courbe Pareto de la figure (III.3). Cette courbe représente la relation entre le taux du temps d'arrêt en fonction des cumuls des causes des arrêts, selon une allure bien définie. Et selon sa désignation elle peut être répartie en trois zones **A**, **B** et **C**.

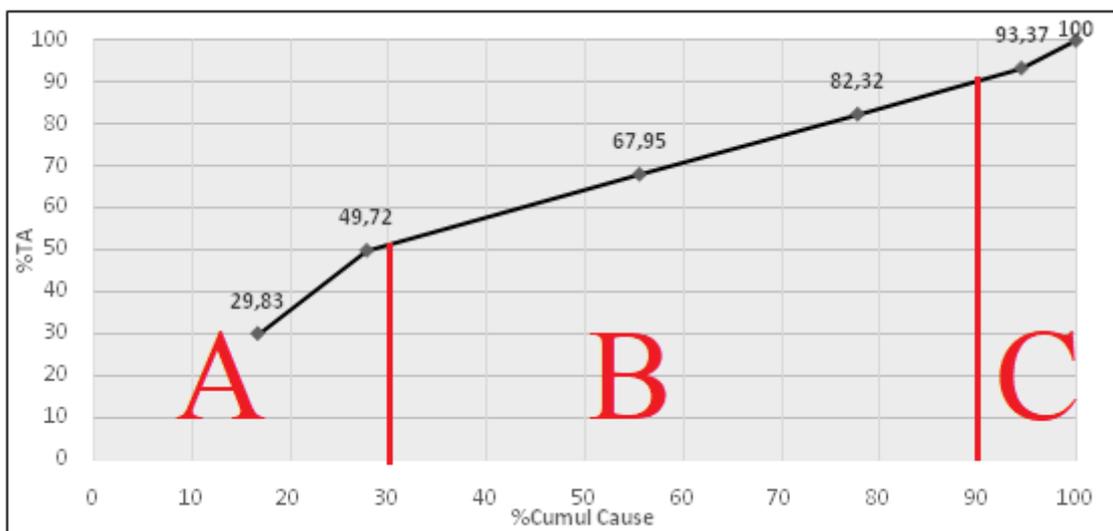


FIG.III.6. La courbe d'analyse ABC.

### III.5.2. Interprétation de la courbe ABC

La courbe de Pareto de la figure (III.6), avec son allure standard. Ce graphique est tracé selon les données du tableau (III.3), où il représente le pourcentage du taux d'arrêt en fonction du pourcentage du cumul cause.

Cette courbe est de forme croissante, peut être répartie en trois zones selon lesquelles on va faire notre interprétation, tel-que :

- **Zone "A"**: Cette zone est limitée à **30%** de cumul cause. C'est la zone de priorité qui correspond à la maintenance préventive, causées par la haute température et l'augmentation de bruit causé lui aussi par la vibration).
- **Zone "B"**: Cette zone est délimitée entre 30% et 90% de cumul cause, ce qui donne les **60%** de pannes. c'est une zone de pannes moins prioritaires que celles de la zone A, casées essentiellement de fuite d'huile et bruit patinage.
- **Zone "C"**: Dans cette zone les 10% des pannes restantes ne représentent qu'ont **10%** de cumul de cause. C'est généralement des pannes négligées.

A travers cette analyse, on peut en conclure que les temps d'arrêt les plus importants sont causés le plus fréquemment par l'augmentation de la température, les fuites de huile et la vibration.

### III.6. L'analyse FMD

#### III.6.1. Calcul les paramètres de Weibull

Le tableau suivant comporte les Temps de Bon Fonctionnement classés par ordre croissant, et les fonctions de répartition calculés par la méthode des rangs médians selon la relation :

$$F(i) = \frac{\sum n_i - 0.3}{N + 0.4}$$

Dans notre cas  $N = 18$

Donc  $N \leq 20$

On complète le tableau puis on trace la courbe de Weibull :

**Tableau III.4. Calcul de la fonction de répartition.**

N	TBF	$\Sigma n_i$	F(i)	F(i)%
1	31	1	0.0380	3.8
2	43	2	0.0924	9.24
3	132	3	0.1467	14.67
4	182	4	0.2010	20.10
5	233	5	0.2554	25.54
6	570	6	0.3097	30.97
7	840	7	0.3641	36.61
8	862	8	0.4184	41.84
9	1217	9	0.4728	47.28
10	1332	10	0.5271	52.71
11	1584	11	0.5815	58.15
12	1653	12	0.6358	63.58
13	2085	13	0.6902	69.02
14	2162	14	0.7445	74.45
15	2640	15	0.7989	79.89
16	2964	16	0.8532	85.32
17	3490	17	0.9076	90.76
18	3648	18	0.9619	96.19

III.6.2. Papier de Weibull

A partir les calculs précédents du tableau (III.4), on a pu tracer la courbe sur papier de Weibull représentée ci-dessous :

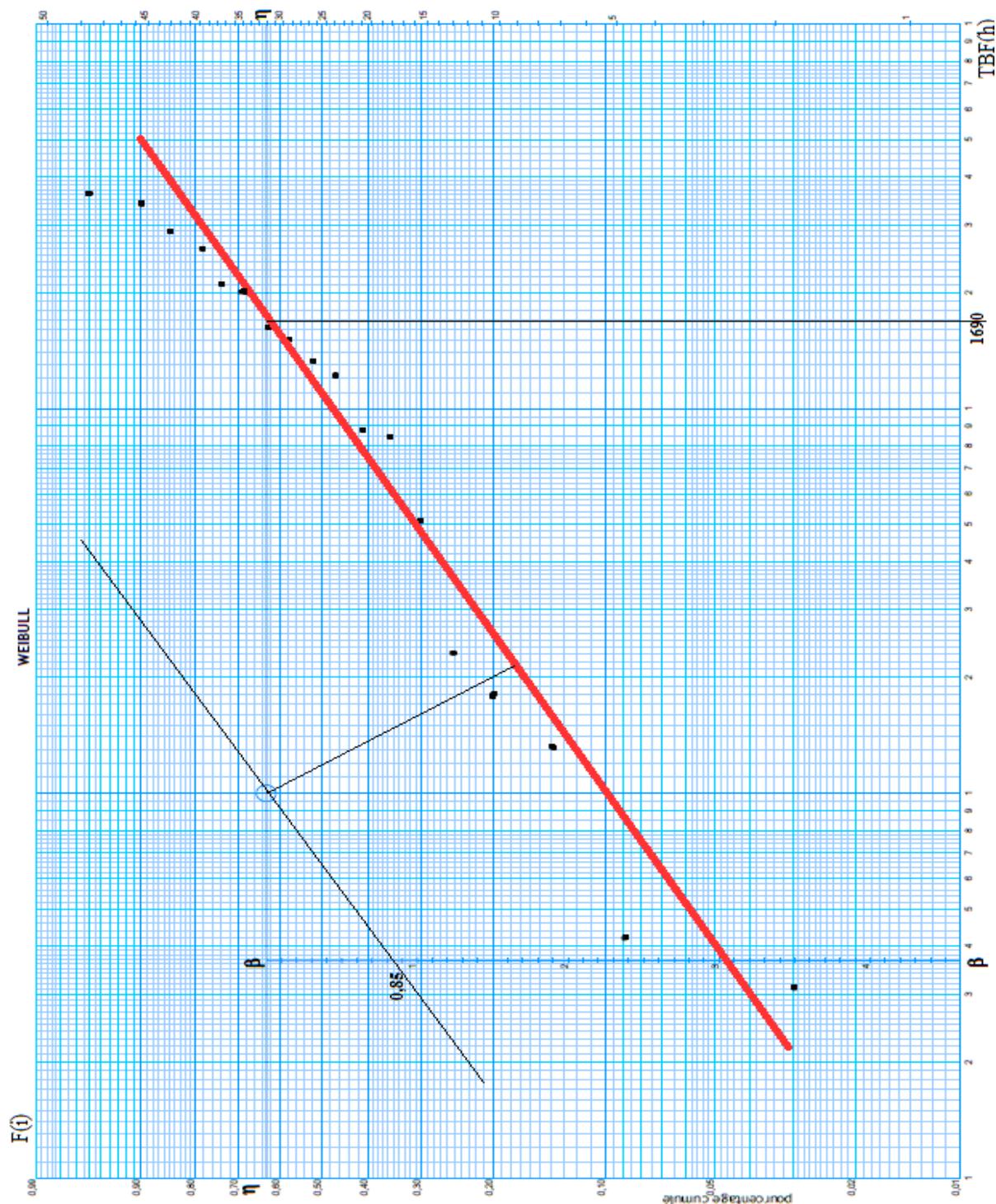


FIG.III.7. La représentation graphique de la fonction de répartition sur le papier de Weibull.

On analysons le papier de **Weibull** de la figure (III.7), nous pouvons tirer les trois paramètres nécessaires pour calculer la fonction de répartition théorique  $F(t)$ . Le calcul de  $F(t)$  a pour but de choisir le modèle adéquat. on a alors :

**Tableau III.5. Paramètres de calcul de la fiabilité.**

Paramètres	Valeurs
Beta ( $\beta$ )	0.85
Eta ( $\eta$ )	1690
Gamma ( $\gamma$ )	0

### III.6.3. Test: KOLMOGOROV SMIRNOV K-S

Avant la validation de toutes les lois de fiabilité, il est nécessaire de tester l'hypothèse pour savoir si nous devons accepter ou rejeter le modèle proposé par le test de **K-S** avec un seuil de confiance de  $\alpha = 5\%$ .

Ce test consiste à calculer l'écart entre la fonction théorique  $F(i)$  et la fonction réelle  $F(t)$ . Puis prendre le maximum en valeur absolue  $DN_{\max}$ . Cette valeur est comparée avec  $DN\alpha$ . D'après le tableau de K-S (voir annexe),  $DN_{\max} < DN\alpha$ , ce qui veut dire que le modèle de Weibull est accepté. Nous avons pris la valeur maximale  $DN_{\max} = |F i - F(t)|$ .

Tableau III.6. Test K-S.

N°	TBF(h)	F(i)	F(t)	$D_{N_{\max}} =  F(i) - F(t) $
1	31	0.0380	0.0328	0.0052
2	43	0.0924	0.04317	0.0492
3	132	0.1467	0.1081	0.0385
4	182	0.2010	0.1396	0.0614
5	233	0.2554	0.1963	0.0591
6	570	0.3097	0.3276	0.0179
7	840	0.3641	0.4242	0.0601
8	862	0.4184	0.4312	0.0128
9	1217	0.4728	0.5306	0.0577
10	1332	0.5271	0.5581	0.0310
11	1584	0.5815	0.611	0.0294
12	1653	0.6358	0.625	0.0108
13	2085	0.6902	0.6974	0.0071
14	2162	0.7445	0.7085	0.0360
15	2640	0.7989	0.7680	0.0309
16	2964	0.8532	0.8005	0.0526
17	3490	0.9076	0.8431	0.0645
18	3648	0.9619	0.8562	<b>0.1057</b>

D'après la table de K-S, on peut tirer la conclusion suivante :  $D_{N_{\max}} < D_{N_{\alpha}}$

Ce qui veut dire que le modèle de Weibull est **acceptable**.

Nous avons pris la valeur maximale :  $D_{N_{\max}} = |F(i) - F(t)|$

$$D_{N_{\max}} = 0,1057$$

Tandis que :  $D_{N, \alpha} = D_{18, 5} = 0,309$  (d'après la table 1 de l'annexe).

Donc :  $0,1057 < 0,309$

Ce qui veut dire que l'hypothèse du modèle de Weibull est **acceptable**.

### III.6.4. Exploitation les paramètres de Weibull

Pour bien exploiter les paramètres de **Weibull** on doit déterminer tout d'abord la moyenne des temps de bon fonctionnement.

#### a) Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement

D'après les paramètres de calcul de fiabilité on a :  $\beta = 0,85$

On se référant à la table 2 de l'annexe on obtient :  $A = 1,088$  et  $B = 1,29$

D'après la relation :  $MTBF = A\eta + \gamma$

Application numérique :  $MTBF = 1.088 * 1690 + 0$

Et donc on obtient :  $MTBF = 1838,72$  heures.

#### b) La densité de probabilité en fonction de MTBF

D'après l'équation de  $f(t)$  :  $f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$

Application numérique :  $f(MTBF) = \frac{0,85}{1690} \left( \frac{1838,72-0}{1690} \right)^{0,85-1} e^{-\left(\frac{1838,72-0}{1690}\right)^{0,85}}$

Alors :  $f(MTBF) = 1,69 * 10^{-4}$

#### c) La fonction de répartition en fonction de MTBF

D'après l'équation de  $F(t)$  :  $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$

Application numérique :  $F(MTBF) = 1 - e^{-\left(\frac{1838,72-0}{1690}\right)^{0,85}}$

On aura alors :  $F(MTBF) = 0,6584 = 65,84\%$

#### d) La fiabilité en fonction de MTBF

D'après l'équation de  $R(t)$  :  $R(t = MTBF) = 1 - F(t = MTBF)$

Application numérique :  $R(MTBF) = R(1838,72) = 1 - 0.6584$

Donc on aura :  $R(MTBF) = 0,3416 = 34,16\%$

## e) Le taux de défaillance en fonction de MTBF

$$\text{D'après l'équation de } \lambda(t) : \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

$$\text{Application numérique : } \lambda(t = \text{MTBF}) = \lambda(1838,72) = \frac{0,85}{1690} \left( \frac{1838,72-0}{1690} \right)^{0,85-1}$$

Ce qui donne :  $\lambda(t) = 5,66 * 10^{-4}$  Pannes/heure.

## f) Calcul du temps souhaitable pour une intervention systématique

Pour une fiabilité de **80%** on va essayer de déterminer le temps souhaitable pour organiser une intervention systématique.

On peut exprimer cela comme suit : [16]

$$R(t) = 80\% \Rightarrow t = ?$$

Pour déterminer le temps souhaitable pour une intervention systématique on se réfère à la relation de la fiabilité suivante :

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

Après développement on obtient :

$$\ln R(t) = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta = \ln(0.8) \Leftrightarrow -\left[\ln R(t)\right]^\frac{1}{\beta} = t / \eta \Rightarrow t = \eta \left[\ln(1 / R(t))\right]^\frac{1}{\beta}$$

Application numérique :

$$t = 1690 \left[\ln(1 / 0.8)\right]^{1/0.85}$$

On aura alors :  $t_{\text{sys}} = 289,41$  heures.

Pour garder la fiabilité du compresseur à 80% il faut faire des interventions à chaque temps systématique égal à : **289,41 heures**

## III.6.5. Étude du modèle de Weibull

Pour le modèle de **Weibull** on a l'analyse suivante :

## a) La fonction de la densité de probabilité

$$\text{Selon la relation suivante : } f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

On déduit le tableau suivant :

Tableau III.7. Calcul de la fonction de la densité de probabilité.

TBF(h)	31	43	132	182	233	570	840	862	1217
$f(t) * 10^{-3}$	0.8886	0.8364	0.6588	0.6059	0.5635	0.3980	0.3221	0.3169	0.2485
TBF(h)	1332	1584	1653	2085	2162	2640	2964	3490	3648
$f(t) * 10^{-3}$	0.2303	0.1971	0.1891	0.1474	0.1412	0.1085	0.0922	0.0705	0.0642

Ensuite on fait la représentation graphique de la fonction de la densité de probabilité schématisée sur la figure suivante:

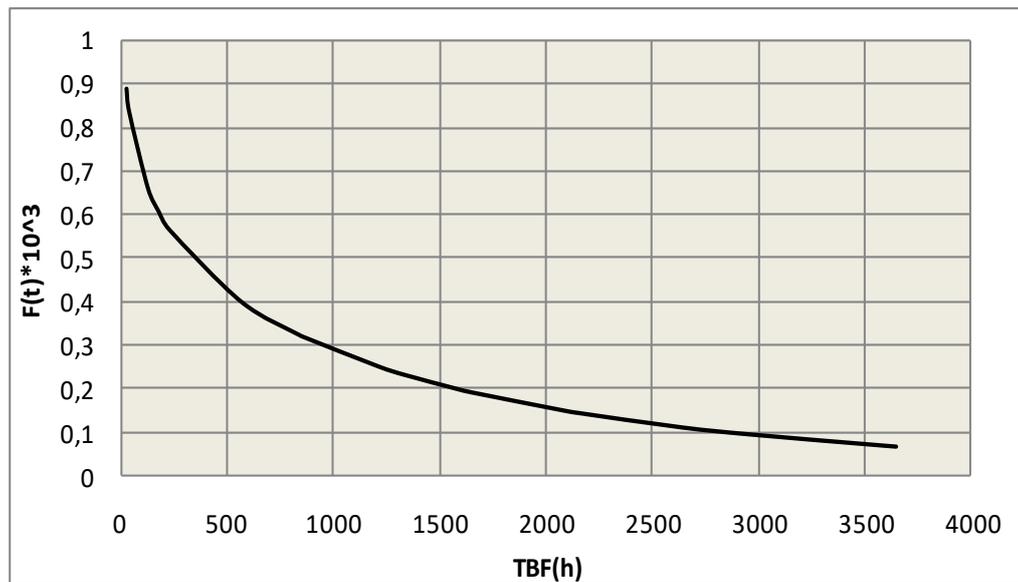


FIG. III.8. La courbe de densité de probabilité.

Le graphique de la figure (III.8) représente la variation de la fonction de la densité de probabilité figurant en ordonnées en fonction du temps de bon fonctionnement figurant en abscisses.

On remarque que la courbe a une allure hyperbolique décroissante puis elle s'allonge jusqu'à ce que le graphique devienne asymptotique.

Donc on peut conclure que la densité de probabilité diminue lorsque le temps de bon fonctionnement augmente et dépasse 3000 heures.

#### b) Fonction de répartition $F(t)$

La fonction de répartition est donnée par la relation suivante :

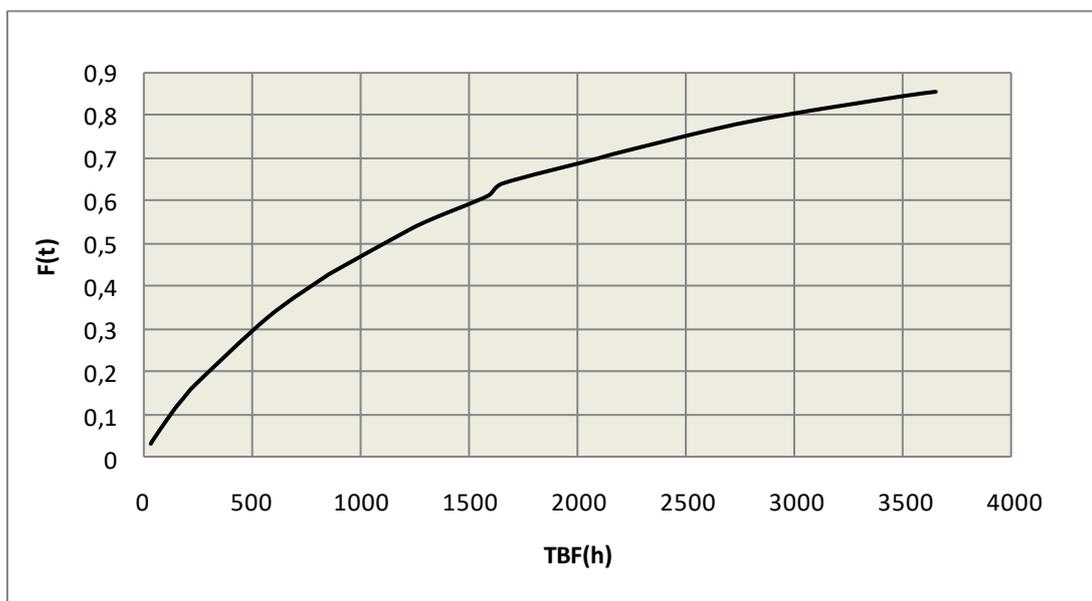
$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

De cette relation on obtient les résultats illustrés au tableau (III.8).

**Tableau III.8. Fonction de répartition F(t).**

TBF(h)	31	43	132	182	233	570	840	862	1217
F(t)	0.0328	0.0431	0.1081	0.1396	0.1693	0.3276	0.4242	0.4312	0.5306
TBF(h)	1332	1584	1653	2085	2162	2640	2964	3490	3648
F(t)	0.5581	0.611	0.652	0.6974	0.7085	0.7680	0.8005	0.8431	0.8538

On trace la courbe de la fonction de répartition d'après les données du tableau (III.8). On obtient alors la courbe suivante :



**FIG.III.9. La courbe de fonction de répartition.**

La courbe de la figure (III.9), donne la présentation graphique de la fonction de répartition en ordonnée en fonction du temps de bon fonctionnement en heure placé en abscisse.

On remarque que l'évolution du graphique est croissant sous une forme non linéaire. Cette allure nous fait dire que la défaillance augmente avec l'évolution du temps.

**c) La fiabilité R(t)**

La fiabilité peut être calculée à partir de la relation suivante :

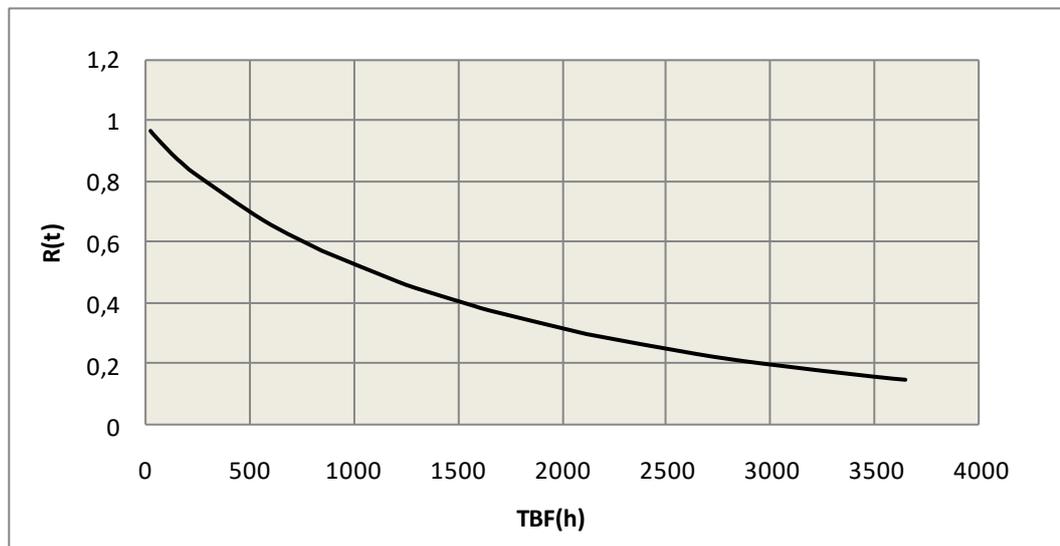
$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Selon les calculs obtenus on trace le tableau suivant :

**Tableau III.9. Calcul de la fiabilité.**

TBF(h)	31	43	132	182	233	570	840	862	1217
R(t)	0.9672	0.9568	0.8916	0.8604	0.8307	0.6727	0.5758	0.5688	0.4694
TBF(h)	1332	1584	1653	2085	2162	2640	2964	3490	3648
R(t)	0.442	0.389	0.375	0.3026	0.2915	0.232	0.1995	0.1569	0.1462

On représente graphiquement les données du tableau (III.9) pour obtenir la courbe de la figure suivante :



**FIG.III.10. La courbe de la fiabilité.**

Le graphique de la figure (III.10), représente l'évolution de la fiabilité en fonction du temps de bon fonctionnement. On remarque que l'allure de la courbe est décroissante. Ce qui signifie que la fiabilité diminue avec le temps, suite à des phénomènes qu'on peut généralement localiser en dégradation et usure de l'équipement.

**d) Le taux de défaillance  $\lambda(t)$**

Le taux de défaillance peut être calculé selon la formule suivante :

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

Après calcul, on trace les résultats obtenus sur le tableau suivant :

Tableau III.10. Calcul du taux de défaillance.

TBF(h)	31	43	132	182	233	570	840	862	1217
$\lambda(t) * 10^{-3}$	0.9162	0.8723	0.7372	0.7025	0.6770	0.5920	0.5585	0.5564	0.5283
TBF(h)	1332	1584	1653	2085	2162	2640	2964	3490	3648
$\lambda(t) * 10^{-3}$	0.5212	0.5078	0.5046	0.4873	0.4847	0.4704	0.4623	0.4511	0.4481

A partir des résultats illustrés au tableau (III.10), on schématise ses données graphiquement, présentés à la figure (III.11).

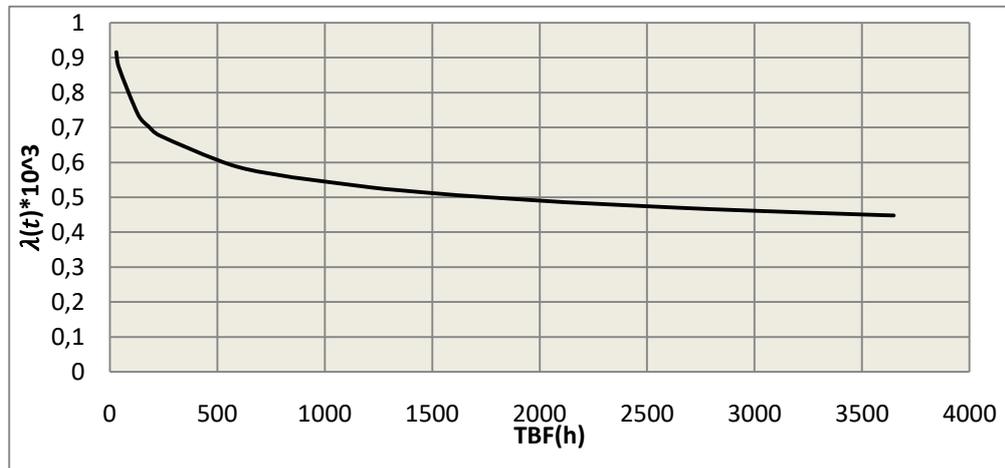


FIG.III.11. La courbe du taux de défaillance.

La figure (III.10) représente la variation du taux de défaillance en fonction du temps de bon fonctionnement. On remarque bien que la courbe est décroît rapidement pour les premier 50 heures puis elle commence à se stabilisée de 2000 heures.

### III.7. La maintenabilité

La fonction de maintenabilité est donnée par la relation suivante :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu \cdot t}$$

Le taux de réparation est exprimé par la relation suivante :

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}}$$

Où : 
$$MTTR = \frac{\sum_{N=1}^{N=18} TTR}{N}$$

Avec : **TTR** est le temps technique de réparation et **N** est le nombre de panne.

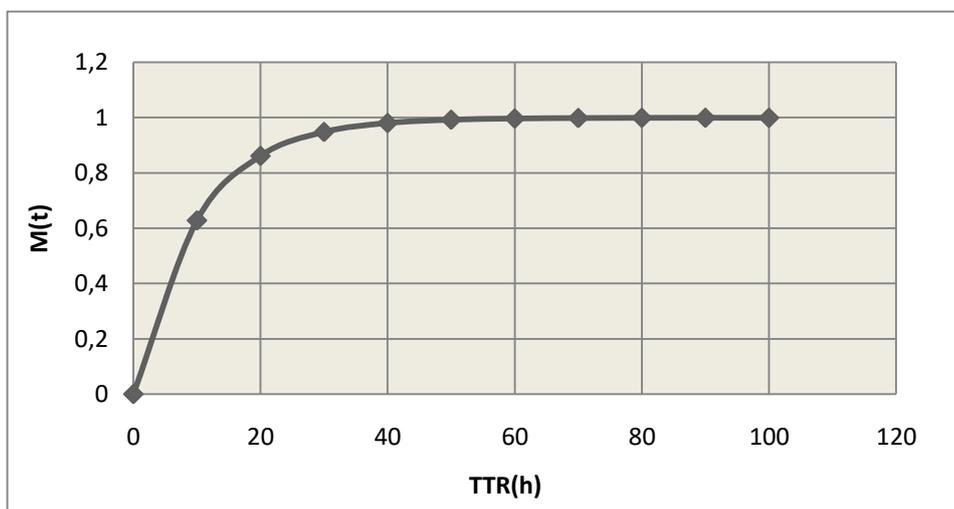
Après calcul on obtient :  $\mu = \frac{1}{10.056} = 0,099$  Intervention/heure

Le tableau ci après résume le calcul de la maintenabilité selon l'historique déjà cité au paravent :

**Tableau III.11. Calcul de la maintenabilité.**

TTR(h)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
M(t)	0.6284	0.8620	0.9486	0.9809	0.9929	0.9973	0.9990	0.9998	0.9999	0.9999

On représente graphiquement les données du tableau (III.11), pour obtenir le graphique de la figure suivante :



**FIG.III.12. La courbe de la maintenabilité.**

La figure (III.12) schématise la maintenabilité en fonction du temps de technique de réparation mesuré en heure. On remarque que le graphique résultant est croissant puis se stabilise vers **TTR = 70 heures**. Donc la maintenabilité est croissante en fonction du temps technique de réparation puis devient constante avec une valeur égale à **99,99%**.

### III.8 La disponibilité

Pour la disponibilité, on doit déterminer les deux volets de ce paramètre théorique et instantané, qui se lie directement au temps de réparation.

#### III.8.1. La disponibilité intrinsèque théorique

La disponibilité intrinsèque théorique est déterminée en fonction de la moyenne de bon fonctionnement et de la moyenne de réparation. Elle est donnée par la relation suivante :

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

$$D_i = \frac{1838.72}{1838.72 + 10.056}$$

Donc la disponibilité intrinsèque :  **$D_i = 0,994$**

La valeur de la disponibilité théorique est **satisfaisante** puisqu'elle s'approche de **1**

Pour que  **$D_i = 1$**  il faut que  **$MTTR = 0$**

Cela signifie que la disponibilité à plein temps nécessite un temps de réparation nul donc pas de panne.

La valeur de la disponibilité intrinsèque théorique  **$D_i$**  est reliée aussi au temps de bon fonctionnement. Pour améliorer la disponibilité on doit en contre partie améliorer le temps de bon fonctionnement.

#### III.8.2. La disponibilité instantanée

La disponibilité instantanée en fonction du taux de défaillance et du taux de réparation est exprimée comme suit :

$$D(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$$

On a :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{1838,72} = 0,00054h^{-1}$$

Donc :

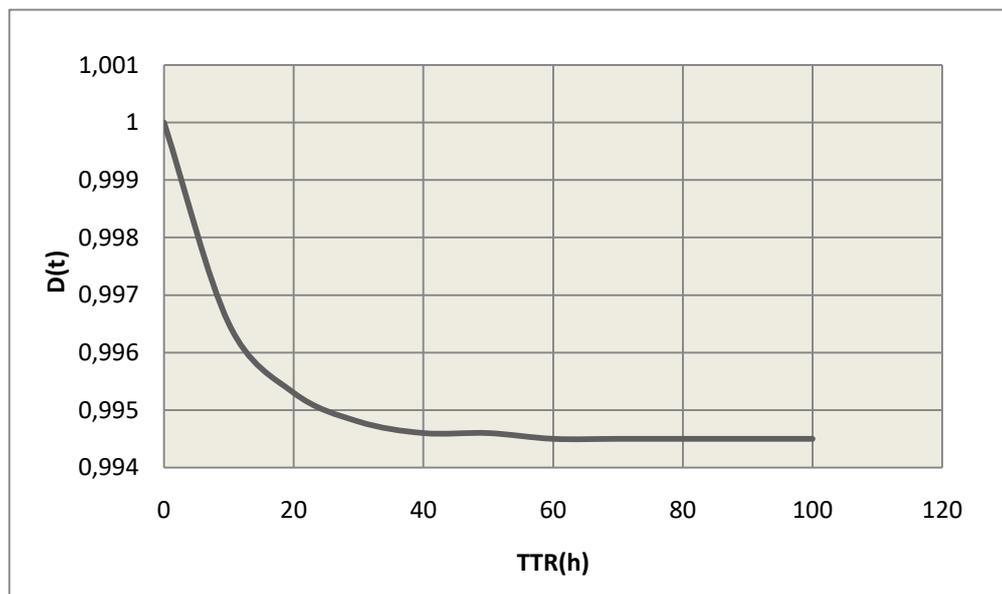
$$D(t) = \frac{0.099}{0.099 + 0.00054} + \frac{0.00054}{0.00054 + 0.099} e^{-(0.00054 + 0.099)t}$$

Les résultats des calculs sont illustrés sur le tableau (III.12).

**Tableau III.12. Calcul de la disponibilité instantanée.**

TTR(h)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
D(t)	0.9965	0.9953	0.9948	0.9946	0.9946	0.9945	0.9945	0.9945	0.9945	0.9945

A partir des données du tableau (III.12) on obtient le graphique de la figure suivante :



**FIG. III.13. La courbe de la disponibilité instantanée.**

La courbe de la figure (III.13) représente la variation de la disponibilité en fonction du temps de réparation mesuré en heure. La courbe débute à une disponibilité égale à **un** lorsque on a un temps de réparation nul. Donc on constate que la disponibilité à une valeur maximum égale à un.

Le graphique est décroissant d'une manière progressive jusqu'à un temps de réparation s'approchant de **60 heures**. Au-delà de cette valeur la courbe prend une forme asymptotique pour une valeur de disponibilité égale à **0,9945**.

On constate que la disponibilité instantanée s'approche à sa valeur théorique lorsque le temps de réparation soit au moins **30 heures**, avant qu'il ne stabilise vers **60 heures** comme il a été déclaré au paravent.

Enfin on peut conclure que la disponibilité est décroissante en fonction de temps nécessaire à la réparation. Pour augmenter la disponibilité du compresseur, il faut essentiellement diminuer le temps des arrêts en réduisant leur nombre, c'est à dire augmenter sa fiabilité en réduisant d'une manière plus simple le temps nécessaire pour la résolution des causes de ces arrêts en améliorant sa maintenabilité.

**III.9. Le plan de maintenance préventive**

Pour garder la fiabilité du compresseur à un taux de **80%**, on doit prévoir des interventions de maintenance pour un temps systématique égal à **289,41 heures**. Les actions à proposer selon les données et les résultats obtenus, on cite quelques actions préventives résumées au tableau suivant :

**Tableau III.13. Plan de maintenance préventive pour le compresseur BCL406**

<b>Plan de maintenance préventive</b>	<b>Machine : Compresseur centrifuge BCL406</b>					
<b>Opération exécutable en fonctionnement</b>	<b>Exécutant</b>	<b>Fréquence</b>				
<b>Operations</b>		<b>J</b>	<b>M</b>	<b>T</b>	<b>S</b>	<b>A</b>
Vérifier le niveau d'huile du compresseur	Mécanicien	X				
Nettoyer la cartouche de filtre d'air	Mécanicien				X	
Remplacer la cartouche de filtre d'air	Mécanicien					X
Changer la cartouche de filtre d'huile	Mécanicien			X		
Vérifier le clapet de retour d'huile	Mécanicien					X
Contrôler le système de refroidissement	Mécanicien		X			
Vérifier le clapet d'aspiration	Mécanicien					X
Nettoyer le dispositif de commande	Mécanicien			X		
Surveiller le bruit compresseur	Mécanicien		X			
Vérifier le robinet de vidange	Mécanicien	X				
<b>Date :</b>	<b>J= jour, M= mensuel, T = trimestrielle, S = semestrielle, A = annuelle</b>					

Pour garder une bonne maintenabilité du compresseur BCL406, on se référant au tableau (III.13), il est impérativement nécessaire de prendre en considération les consignes relatives à la fréquence d'intervention suivantes :

**J** : opération à réaliser chaque jour avant démarrage.

**M**: opération à réaliser chaque mois, de préférable la première semaine du mois.

**T** : opération à réaliser chaque trimestre, à réaliser sans interrompre la production.

**S** : opération à réaliser chaque semestre, à réaliser sans interrompre la production.

**A** : opération à réaliser chaque année, pendant le congés annuel.

---

---

# **Conclusion générale**

---

---

## Conclusion Générale

A partir de l'historique de pannes de compresseur centrifuge BCL406, nous avons appliqué la méthode d'analyse prévisionnelle de Pareto. Suite à laquelle on a tracé la courbe ABC. De ce graphique obtenu de l'analyse de Pareto, on a pu extraire les causes provoquant les temps d'arrêt les plus importants, qui peuvent être résumés en l'augmentation de la température, les fuites d'huile et la vibration.

En second lieu, on a mené une analyse FMD pour le compresseur centrifuge BCL406. Pour cette analyse on a choisi la méthode de Weibull. Cette méthode est apparemment acceptable selon le test de K-S qu'on a effectué. De là on a obtenu le papier de Weibull. Document à partir duquel on a effectué les calculs de la fonction de la densité de probabilité; la fonction de répartition; de la fiabilité; du taux de défaillance.

Les résultats de cette analyse de la fiabilité sont représentés en fonction du temps de bon fonctionnement TBF mesuré en heure. D'après les résultats obtenus on peut conclure que la fiabilité du compresseur centrifuge BCL406 diminue avec le temps, suite aux phénomènes de dégradation et d'usure des organes de l'équipement.

Pour la maintenabilité et la disponibilité, les résultats sont présentés en fonction du temps technique de réparation TTR mesuré en heure. Pour ce qui concerne la maintenabilité, elle est croissante en fonction du TTR, puis elle devient constante lorsque le TTR dépasse les 70 heures.

Alors que pour la disponibilité, elle est inversement proportionnelle au TTR. On a constaté aussi, que sa valeur maximale est de 1, lorsque le TTR est nul. On a remarqué aussi que, la disponibilité instantanée peut s'approcher à la valeur théorique lorsque le TTR dépasse les 30 heures.

Si on revient à la fiabilité du système, qu'on suppose généralement à une valeur maximale de 80%. On constate que le temps nécessaire pour une maintenance préventive systématique est de l'ordre de 289 heures. Ce temps est obtenu par la préconisation des solutions concernant les causes les plus fréquentes provoquant les arrêts du compresseur centrifuge BCL406.

A partir de tous ces résultats, on a pu établir un plan de maintenance préventive dans le but de garder la fiabilité du compresseur centrifuge BCL406 à sa performance maximale de 80%. Ce plan est un ensemble de suggestions que nous espérons, seront adoptés par le responsable du service de la maintenance de la société.

---

---

# **Références Bibliographiques**

---

---

## Références bibliographiques

- [01] François Monchy, Jean-Pierre Vernier. "MAINTENANCE Méthodes et organisations, 3ème édition, l'USINE NOUVELLE DUNOD."
- [02] Benaïcha Halima «Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle» Thèse de doctorat en électrotechnique, Université d'Oran Mohammed Boudiaf, 2015.
- [03] H.P.Ramella. Maintenance des turbines à vapeur. Techniques de l'ingénieur, Référence BM4186. 2002.
- [04] R. Dekker, Applications of maintenance optimization models: a review and analysis, Reliability Engineering and System Safety 51(1996), 229–240.
- [05] Jourden, P., and J. P. Souris. "Pratique de la Maintenance Industrielle." Dunod ed., Paris (1998).
- [06] Anthony Kelly, Maintenance and the industrial organization. Plant Maintenance Management Set 2006 ; 3(1) : 3-8.
- [07] Benedetti, C. A. (2002). Introduction à la gestion des opérations (4e éd). Québec: Sylvain Ménard. 2002.
- [08] 15 Stratégie de Maintenance Industrielle (livre).
- [09] Jean .B « la TPM : un système de production » Technologie (SCEREN - CNDP) – Revue Française de gestion Industrielle, Paris, avril 2008.
- [10] Mehdi JALLOULI « méthodologie de conception d'architectures de processeur sûres de fonctionnement pour les applications mécatroniques » Thèse de doctorat en électronique, Université Paul Verlaine – Metz, Juin 2009.
- [11] <http://www.techniques-ingenieur.fr>
- [12] NOUARI ABDESSAMED, «Fiabilité des systèmes mécaniques» Mémoire de Master en génie mécanique, université de Bechar, 2014/2015
- [13] [https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BBret%C3%A9\\_de\\_fonctionnement](https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BBret%C3%A9_de_fonctionnement)
- [14] Cour de formation sur le compresseur, centrifuge, nuovo pugnone, SONATRACH
- [15] Cheurfi ABDERRAHIM et Amarache SALIM, «Etude et maintenance du compresseur centrifuge BCL-406 problème d'encrassements» Mémoire de Master en génie mécanique, université de Boumerdes, 2016/2017

## Références bibliographiques

[16] DIF ZAKARYA et ADJISSI MEHDI «Amélioration de la production d'un système par l'application de la maintenance préventive» Mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, 2017/2018

---

---

# **Annexes**

---

---

Table 01 : Tableau de loi Kolmogorov-Smirnov

N	Niveau significatif				
	0,2	0,15	0,1	0,05	0,01
1	0,900	0,925	0,950	0,975	0,995
2	0,684	0,726	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,642	0,708	0,828
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,733
5	0,446	0,474	0,510	0,565	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,410	0,490
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,252	0,274	0,295	0,328	0,392
17	0,250	0,266	0,286	0,318	0,381
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,371
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,363
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,356
25	0,210	0,220	0,240	0,270	0,320
30	0,190	0,200	0,220	0,240	0,290
35	0,180	0,190	0,210	0,230	0,270
>35	$\frac{1,07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{N}}$	$\frac{0,180}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{N}}$

**Table 02 :** Distribution de Weibull (valeurs des coefficients A et B en fonction du paramètre de forme).

B	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B
0,2	120	1 901	1,5	0,9027	0,613	4	0,9064	0,254
0,25	24	199	1,55	0,8994	0,593	4,1	0,9077	0,249
0,3	9,2625	50,08	1,6	0,8966	0,574	4,2	0,9086	0,244
0,35	5,291	19,98	1,65	0,8942	0,556	4,3	0,9102	0,239
0,4	3,3234	10,44	1,7	0,8922	0,54	4,4	0,9146	0,235
0,45	2,4686	6,46	1,75	0,8906	0,525	4,5	0,9125	0,23
0,5	2	4,47	1,8	0,8893	0,511	4,6	0,9137	0,226
0,55	1,7024	3,35	1,85	0,8882	0,498	4,7	0,9149	0,222
0,6	1,546	2,65	1,9	0,8874	0,486	4,8	0,916	0,218
0,65	1,3663	2,18	1,95	0,8867	0,474	4,9	0,9171	0,214
0,7	1,2638	1,85	2	0,8862	0,463	5	0,9162	0,21
0,75	1,1906	1,61	2,1	0,8857	0,443	5,1	0,9192	0,207
0,8	1,133	1,43	2,2	0,8856	0,425	5,2	0,9202	0,203
0,85	1,088	1,29	2,3	0,8859	0,409	5,3	0,9213	0,2
0,9	1,0522	1,17	2,4	0,8865	0,393	5,4	0,9222	0,197
0,95	1,0234	1,08	2,5	0,8873	0,38	5,5	0,9232	0,194
1	1	1	2,6	0,8882	0,367	5,6	0,9241	0,191
1,05	0,9803	0,934	2,7	0,8893	0,355	5,7	0,9251	0,186
1,1	0,9649	0,878	2,8	0,8905	0,344	5,8	0,926	0,165
1,15	0,9517	0,83	2,9	0,8919	0,334	5,9	0,9269	0,183
1,2	0,9407	0,787	3	0,893	0,316	6	0,9277	0,18
1,25	0,9314	0,75	3,1	0,8943	0,325	6,1	0,9266	0,177
1,3	0,9236	0,716	3,2	0,8957	0,307	6,2	0,9294	0,175
1,35	0,917	0,667	3,3	0,897	0,299	6,3	0,9302	0,172
1,4	0,9114	0,66	3,4	0,8984	0,292	6,4	0,931	0,17
1,45	0,9067	0,635	3,5	0,8997	0,285	6,5	0,9316	0,168
1,5	0,9027	0,613	3,6	0,9011	0,278	6,6	0,9325	0,166
1,55	0,8994	0,593	3,7	0,9025	0,272	6,7	0,9335	0,163
1,6	0,8966	0,574	3,8	0,9083	0,266	6,8	0,934	0,161
1,65	0,8942	0,556	3,9	0,9051	0,26	6,9	0,9347	0,15

---

## Résumé

Dans ce document, on a essayé de présenter une analyse de fiabilité pour un compresseur centrifuge du type BCL406. Suite à cette étude on pu élaborer un plan de maintenance préventive, dans le but de progresser le niveau de la sureté de fonctionnement. Ce plan est le résultat des calculs des paramètres de la Fiabilité, Manitenabilité, Disponibilité (FMD) et leurs fonctions.

**Mots clés :** Maintenance préventive; sureté de fonctionnement; FMD.

## Abstract

In this document, an attempt has been made to present a reliability analysis for a centrifugal compressor type BCL406. As a result of this study, a preventive maintenance plan was developed, with the aim of improving the level of operational safety. This plan is the result of the calculations of the Reliability, Manitenability, Availability (FMD) parameters and their functions.

**Keywords:** Preventive maintenance; operational safety; FMD.

## ملخص

في هذا المستند ، تم إجراء محاولة لتقديم تحليل موثوقية لضغط طرد مركزي من النوع BCL406. بعد هذه الدراسة ، تم تطوير خطة الصيانة الوقائية ، بهدف تحسين مستوى السلامة التشغيلية. هذه الخطة هي نتيجة حسابات معلمات الموثوقية، الإدارة، التوافر، ووظائفهم.

**كلمات مفتاحية:** الصيانة الوقائية؛ السلامة التشغيلية.

---