

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ 20 AOÛT 1955 SKIKDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Hygiène et sécurité industrielle

Spécialité : Hygiène et sécurité industrielle

**Contribution à l'évaluation et l'amélioration
de la sûreté de fonctionnement de la pompe
centrifuge 100-P2A : Complexe RA1K Skikda**

Soutenu le 24/06/2023

Réalisé par : BOUTAGHANE HIND

Encadré par : DR. ZEROUALI BILAL

DAGHI YASSER

TOUAITI AHMED TIDJANI

Année Universitaire 2022- 2023

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ 20 AOÛT 1955 SKIKDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Hygiène et sécurité industrielle

Spécialité : Hygiène et sécurité industrielle

**Contribution à l'évaluation et l'amélioration
de la sûreté de fonctionnement de la pompe
centrifuge 100-P2A : Complexe RA1K Skikda**

Soutenu le 24/06/2023

Réalisé par : BOUTAGHANE HIND

Encadré par : DR. ZEROUALI BILAL

DAGHI YASSER

TOUAITI AHMED TIDJANI

Année Universitaire 2022- 2023

Remerciement

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

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

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à nos recherches en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au chef de département pétrochimie et génie des procédés, tous les enseignants, le staff administratif.

Sans oublier le personnel et les responsables de la RA1K de Skikda, dont l'accueil était chaleureux, qui n'ont pas cessé de nous aider durant notre stage, auxquels nous adressons nos vifs remerciements et notre profond respect.

Nous voudrions aussi remercier à toutes les personnes qui ont, de près ou loin, contribué à la réussite de ce travail.

Enfin, un grand merci à tous les membres de ma famille, en particulier à nos parents et à tous ceux qui nous sont chers, pour leur soutien et leur encouragement toujours à tout moment. Nous leur dédions ce travail.

Merci à tous et à toutes.



Dédicace

A chaque mère et père qui souffre encore et est fatigué pour

L'enfant d'aujourd'hui.....l'homme de demain

Voici mon papa et ma maman *Saad et Zohra* (رحمها الله)

*A tous ceux qui s'efforcent et s'efforcent d'éduquer les générations et de passer le flambeau
de la connaissance*

Voici mes professeurs

A tous les frères et les sœurs qui ont aidé et soutenu leur sœur

Voici mes frères *Abderraouf, Abdelhak* et ma sœur *Sihem*

A chaque famille unie qui porte dans son cœur un amour sincère et de bonnes intentions

Voici ma famille

A tous ceux qui portent dans leur cœur l'amour et apprécient l'amitié sincère

Voici mes amies



B. HIND



Dédicace

Rien n'égale la joie de la remise des diplômes, c'est l'un des plus beaux moments de notre vie, où les années de travail acharné, les nuits blanches et les prières des parents ont porté leurs fruits. Les pressions psychologiques que nous avons subies sont maintenant derrière nous, et nous les avons oubliées dès que nous avons ressenti la joie de la remise des diplômes et remercié Dieu en premier lieu, ainsi que mes parents, mes grands-parents, mes frères et sœurs, toute ma famille, les présents et tous ceux qui m'ont soutenu dans mon parcours éducatif. Nous prions Dieu de nous accorder le succès dans tout ce que nous entreprenons.



Daghi.Yasser



Dédicace

En préambule à ce mémoire J'exprime toute ma gratitude à Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

Mes chers frères et sœurs pour leur appui et leur encouragement, Toute ma famille et mes ami(e)s qui, grâce à leurs encouragements et leur soutien, m'ont aidé à surmonter tous les obstacles.



Tidjani.Ahmed

Résumé

L'étude faite, dans ce mémoire, suite à un stage pratique au sein du complexe RA1K de Skikda, s'articule essentiellement sur une étude de la sûreté de fonctionnement d'un équipement stratégique, il s'agit d'une pompe centrifuge 100-P2A.

L'exploitation de l'historique de pannes, de la pompe 100-P2A, fourni par le service maintenance, nous a permis de faire deux études complémentaires à savoir qualitative et quantitative.

L'objectif de ce travail est l'analyse et l'évaluation de la sûreté de fonctionnement de la 100-P2A. la première partie nous avons effectuées un calcul FMD (fiabilité, maintenabilité, disponibilité) par la loi de Weibull à l'aide d'un logiciel de calcule statistique (Minitab). La deuxième partie nous avons fait une analyse qualitative par la méthode l'analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) en se basant sur le diagramme d'Ishikawa.

Ces méthodes précieuses nous ont aidés à identifier les modes de défaillances des principaux organes de pompe (arbre, roue, volute, garniture mécanique...etc) tout en évaluant leur criticité sur la sûreté de fonctionnement qui nous permet de choisir une meilleure politique de maintenance pour garder la pompe en bon état de fonctionnement et d'augmenter sa fiabilité.

Mot clé : 100-P2A, analyse, évaluation, la sûreté de fonctionnement, FMD, loi de Weibull, Minitab, AMDEC, Ishikawa, maintenance.

Abstract

The study made in this thesis, following a practical internship within the RA1K complex of Skikda, is essentially based on a study of the operational safety of strategic equipment, it is a centrifugal pump 100 -P2A.

The exploitation of the failure history of the 100-P2A pump, provided by the maintenance department, enabled us to carry out two complementary studies, namely qualitative and quantitative.

The objective of this work is the analysis and the evaluation of the safety of operation of the 100-P2A. the first part we carried out a calculation FMD (Reliability, Maintainability, availability) by the law of Weibull using a statistical calculation software (Minitab). The second part we made a qualitative analysis by the method the analysis of the Failure Modes, their Effects and their Criticality (FMECA) based on the Ishikawa diagram.

These valuable methods have helped us to identify the failure modes of the main pump components (shaft, impeller, volute, mechanical seal, etc.) while evaluating their criticality on operating safety, which allows us to choose a better maintenance policy for keep the pump in good working order and increase its reliability.

Key Word : 100-P2A, analysis, evaluation, dependability, FMD, Weibull law, Minitab, FMEA, Ishikawa, maintenance.

الدراسة التي تم إجراؤها في هذه الرسالة، بعد تدريب عملي داخل مجمع RA1K في سكيكدة، تستند أساساً إلى دراسة السلامة التشغيلية للمعدات الاستراتيجية، فهي مضخة طرد مركزي P2A-100. مكننا استغلال تاريخ فشل المضخة P2A-100، المقدمة من قسم الصيانة، من إجراء دراستين تكمليتين، نوعية وكمية.

الهدف من هذا العمل هو تحليل وتقييم سلامة تشغيل P2A-100. الجزء الأول قمنا بإجراء حساب FMD (الموثوقية، الصيانة، التوفر) بموجب قانون Weibull باستخدام برنامج الحساب الإحصائي (Minitab). الجزء الثاني قمنا بإجراء تحليل نوعي من خلال طريقة تحليل أنماط الفشل وتأثيراتها وخطورتها (FMECA) بناءً على مخطط إيشيكاوا. لقد ساعدتنا هذه الأساليب القيمة في تحديد أوضاع فشل مكونات المضخة الرئيسية (العمود، العجلة، الحلزوني، الختم الميكانيكي، وما إلى ذلك) أثناء تقييم أهميتها على سلامة التشغيل، مما يسمح لنا باختيار سياسة صيانة أفضل للحفاظ على المضخة في حالة عمل جيدة وزيادة موثوقيتها.

الكلمة المفتاحية: P2A-100، التحليل، التقييم، الاعتمادية، سلامة العمل، قانون Weibull، Minitab، FMECA، إيشيكاوا، الصيانة.

Sommaire	
Remerciement.....	II
Dédicace.....	III
Résumé.....	VI
Introduction générale.....	02

Chapitre I : Présentation de la raffinerie de Skikda RA1K

I.1.Introduction.....	05
I.2. Présentation générale de la raffinerie de Skikda.....	05
I.2.1 Situation géographique.....	05
I.2.2. Historique de construction.....	06
I.3. Présentation des différentes unités de production.....	07
I.3.1 Unités 10-11 (Distillation atmosphérique).....	07
I.3.2 Unités 100 et 103 (Unités Magnaforming, Platforming).....	07
I.3.3 Unités 30-31-104 (Séparation et Traitement des Gaz).....	08
I.3.4. Unité 200 (Extraction des Aromatiques).....	08
I.3.5. Unité 400 (Séparation du Paraxylène).....	08
I.3.6. Unité 500 (Isomérisation du M-xylène).....	08
I.3.7. Unités 700/701/702/703 (Unité d'isomérisation du naphta léger A).....	09
I.3.8 Unité 70 (Production de Bitume).....	09
I.3.9. Unité 600 (Unité Melexe).....	10
I.3.10 Centrale thermoélectrique.....	10
I.3.11. Unité 900 (Unité de purification de l'hydrogène).....	10
I.4.Projets de réhabilitation et adaptation de la raffinerie de Skikda.....	11
I.4.1. Plan et programme de réhabilitation.....	11
I.4.2. Bilan de production de la raffinerie RA1K.....	12
I.5.conclusion.....	14

Chapitre II : Outils mathématique d'évaluation de la sureté de fonctionnement

II.1. Introduction.....	16
II.2. Historique de la sûreté de fonctionnement.....	16
II.3. Concepts fondamentaux.....	17

II.3.1. Définitions de la Sûreté de fonctionnement.....	17
II.3.2. L'arbre de la sûreté de fonctionnement.....	17
II.3.3. Mesures de la sureté de fonctionnent.....	18
II.3.3.1. Fiabilité ou Reliability.....	18
II.3.3.2. Disponibilité ou availability.....	20
II.3.3.3. Maintenabilité (Maintenability).....	20
II.3.3.4. Sécurité / Safety.....	23
II.3.4. Moyens pour la sûreté de fonctionnement.....	23
II.3.5. Entraves.....	23
II.4. Mathématiques de la sûreté de fonctionnement.....	24
II.4.1. Variables aléatoires discrets.....	24
II.4.2. Variables aléatoires continues.....	24
II.5. Les lois principales de probabilités.....	25
II.5.1. Lois continues.....	25
II.5.1.1. Loi exponentielle.....	25
II.5.1.2. Loi de Weibull.....	27
II.5.1.3. Loi normale.....	29
II.5.2. Lois discrètes.....	31
II.5.2.1. Loi de Bernoulli.....	31
II.5.2.2. Loi binomiale.....	32
II.5.2.3. Loi de Poisson	32
II.6. Méthodes usuelles en sûreté de fonctionnement.....	34
II.7. Conclusion.....	36
Chapitre III : Description de la pompe 100-P2A	
III.1. Introduction.....	38
III.2. Généralités sur les pompes.....	38
III.2.1 Définition d'une pompe.....	38
III.2.2 Classification des pompes.....	39
III.2.2.1 Les pompes volumétriques.....	40
III.2.2.1.1 Les pompes volumétriques rotatives.....	40

III.2.2.1.2 Les pompes volumétriques alternatives.....	43
III.2.2.2 Les pompes centrifuges.....	44
III.2.2.2.1 Définition et domaine d'utilisation.....	44
III.2.2.2.2. Principe de fonctionnement.....	44
III.2.2.2.3 Classification des pompes centrifuges.....	45
III.2.2.2.4 Description d'une pompe centrifuge.....	47
III.3 Description de la pompe 100-P2A.....	49
III.3.1 Généralité.....	49
III.3.2 Le rôle de la 100-P2A.....	50
III.3.3 La situation géographique de la pompe.....	51
III.3.4. Les caractéristiques de la pompe 100-P2A.....	52
III.3.5. Principaux modes de défaillances de la pompe.....	52
III.3.5.1. Modes de défaillance hydraulique.....	52
III.3.5.2. Modes de défaillance mécanique.....	54
III.4. Conclusion.....	54
Chapitre IV : Analyse de la sûreté de fonctionnement de la pompe 100-P2A	
IV.1. Introduction.....	56
IV.2. Historique des pannes de la pompe 100-P2A.....	56
IV.3. Détermination de la distribution la plus adaptée avec les données.....	57
IV.4. Détermination des fonctions de probabilité en fonction de MTBF par Weibull.....	59
IV.5. Calcul des fonctions de probabilité à chaque instant (t).....	61
IV.6. Représentations graphiques des fonctions.....	61
IV.6.1. La fonction de répartition F(t).....	61
IV.6.2. La fonction de taux de défaillance $\lambda(t)$	62
IV.6.3. La fonction de fiabilité R(t).....	63
IV.6.4. La fonction de densité de probabilité f(t).....	63
IV.7. Analyse de la maintenabilité M(t).....	64
IV.7.1 Calcul de maintenabilité en fonction de MTTR.....	64
IV.7.2. Représentations graphiques de la maintenabilité M(t).....	65

IV.8. Analyse de la disponibilité $A(t)$	66
IV.8.1. Représentations graphiques de la disponibilité $A(t)$	67
IV.9 Analyse de la sécurité.....	67
IV.9.1 Analyse des causes (ISHIKAWA).....	67
IV.9.1.1. Définition de la méthode.....	67
IV.9.1.2. Application de la méthode.....	68
IV.9.2. Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC).....	69
IV.9.2.1. Définition de la méthode.....	69
IV.9.2.2. Application de la méthode.....	71
IV.9.3. Recommandation.....	75
IV.10. Conclusion.....	76
Conclusion générale.....	78
Bibliographie.....	80

Liste des figures

Figure I.1 Situation géographique de la raffinerie de Skikda	05
Figure I.2 Schéma des principaux procédés dans la raffinerie de Skikda	13
Figure II.1 Arbre de la sûreté de fonctionnement, adapté de (Avizienis et al.,2000).....	18
Figure II.2 Evolution du taux de défaillance d'un système	19
Figure II.3 Durées moyennes associées à la SDF.....	21
Figure II.4 : Classification des types de maintenance.....	22
Figure II.5 Courbe théorique de fiabilité de la loi exponentielle.....	26
Figure II.6 Papier de Weibull.....	29
Figure II.7 fonctions de densité d'une loi normale.....	30
Figure II.8 Nombre de pannes	33
Figure III.1 Montage d'une pompe en aspiration et en charge.....	38
Figure III.2 Classification des pompes.....	39
Figure III.3 Fonctionnement des pompes volumétriques rotatives	40
Figure III.4 Vue écorchée d'une pompe à engrenages.....	41
Figure III.5 Pompes à vis	41
Figure III.6 Pompe à palettes.....	42
Figure III.7 Vue intérieure d'une pompe à lobes.....	42
Figure III.8 Principe pompe à piston.....	43
Figure III.9 Pompe à membranes.....	43
Figure III.10 Pompe centrifuge monocellulaire en porte à faux.....	45
Figure III.11 Vue ouverte d'une pompe centrifuge multi-étage.....	46
Figure III.12 Vue extérieure d'une pompe verticale.....	46
Figure III.13 composants d'une pompe centrifuge.....	47
Figure III.14 Différents organes d'une pompe centrifuge.....	48
Figure III.15 photo réelle de la pompe 100-P2A.....	49
Figure III.16 vue extérieure de la 100- P2A	50
Figure III.17 Section prétraitement.....	51
Figure III.18 phénomènes de cavitation.....	53
Figure III.19 : Érosion par cavitation d'une roue de pompe centrifuge	53

Liste des figures

Figure IV.1 Test d'Anderson-Darling.....	57
Figure IV.2 Test de Pearson.....	58
Figure IV.3 Paramètres de la loi de Weibull	59
Figure IV.4 Courbe de la fonction de répartition	61
Figure IV.5 Courbe de taux de défaillance $\lambda(t)$	62
Figure IV.6 Courbe de fiabilité $R(t)$	63
Figure IV.7 Courbe de la fonction de densité de probabilité.....	63
Figure IV.8 Courbe de maintenabilité $M(t)$	65
Figure IV.9 Courbe de la fonction de disponibilité $A(t)$	67
Figure IV.10 Diagramme d'Ishikawa.....	68
Figure IV.11 Décomposition fonctionnelle du système.....	71
Figure IV.12 Décomposition du système.....	72

Liste des tableaux

Tableau I.1 Dates des démarrages progressifs des unités de production à la raffinerie de Skikda.....	06
Tableau I.2 Plan de réhabilitation des unités de la RA1K.....	11
Tableau I.3 Bilan de production de la RA1K avant et après la réhabilitation.....	12
Tableau II.1 Historique de la sureté de fonctionnement.....	16
Tableau II.2 Classification des principales méthodes dans le domaine de la sûreté de fonctionnement (Cauffriez et al.,2012).....	34
Tableau IV.1 Historique de la 100-P2A.....	57
Tableau IV.2 Paramètres de la loi de Weibull : β , η , γ , MTBF, σ	59
Tableau IV.3 Étude du modèle de Weibull.....	61
Tableau IV.4 Résultat de la fonction M(t).....	65
Tableau IV.5 Disponibilité instantanée.....	66
Tableau IV.6 Grille de cotation de la fréquence.....	69
Tableau IV.7 Grille de cotation de la gravité.....	70
Tableau IV.8 Grille de cotation de la probabilité de non détection.....	70
Tableau IV.9 Tableau de la criticité.....	71

Liste des abréviations

RA1K : Raffinerie 1 de Skikda.

GPL : Gaz de pétrole liquéfié.

FMDS : Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité.

RAMS : Reliability, Availability, Maintainability and Safety.

SDF : Sûreté de fonctionnement.

MTTF : Mean Time To Failure.

MTBF : Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement.

MTBF : Mean Time Between Failure.

TBF : Temps de Bon Fonctionnement.

MTTR : Moyenne des Temps de Taches de Réparation.

MUT : Mean Up Time.

MDT : Mean Down Time.

APR : analyse préliminaire de danger.

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

ADD : Arbres de Défaillances.

Liste des symboles

$R(t)$: Fiabilité.

$f(t)$: Densité de probabilité.

$F(t)$: Fonction de répartition.

$\lambda(t)$: Taux de défaillance.

$M(t)$: Maintenabilité.

$\mu(t)$: Taux de réparation.

$D(t)$: Disponibilité instantané.

D_i : Disponibilité intrinsèque à l'asymptotique.

La loi de Weibull :

β : Paramètre de forme (loi de Weibull).

η : Paramètre d'échelle (loi de Weibull).

γ : Paramètre de position (loi de Weibull).

σ : L'écart type des temps de fonctionnement.

V : La variance.

La loi binomiale :

n : Nombre d'épreuve.

p : Probabilité de succès.

La loi de poisson :

λ : Paramètre de la loi (constante positive).

Exp : Exponentielle.

Introduction générale

Introduction générale

La maintenance est un facteur de compétitivité puisqu'elle influe sur la production, la qualité et le cout de revient. Elle est déterminante pour accroître l'espérance de vie de l'entreprise et de ses biens. Elle prend une importance croissante et se révèle une des fonctions clés de l'entreprise. Alors que les tendances vers un degré plus élevé de l'automatisation et une complexité accrue des machines ne font que renforcer les besoins d'une entreprise d'avoir une approche formelle et structurée concernant la fonction maintenance [1].

Dans ce contexte, le rôle de la fonction maintenance prend une dimension encore plus importante. Elle permet d'augmenter la disponibilité et la fiabilité des équipements à la production, de réduire les pannes par des interventions périodiques et de contribuer à la réduction des accidents par le maintien adéquat du niveau de sécurité des équipements [1].

C'est ainsi que nous pouvons dire que l'amélioration de la production dépend de l'analyse quantitative et qualitative des systèmes de n'importe quelles entreprises industrielles. Ces techniques et méthodes d'analyse visent principalement à trouver des solutions techniques pour augmenter la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité des équipements et en générale amélioré les performances des systèmes de production [1].

A cet effet, le travail réalisé dans le cadre de notre projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en hygiène et sécurité industrielle, pour but de faire une étude sur la FMDS d'une pompe centrifuge multicellulaire horizontale dont le rôle est prépondérant au niveau de l'unité de reforming catalytique U100 de la **RAIK Raffinerie (SONATRACH ; Skikda)**. Cette étude nous a permis, également, d'évaluer les paramètres visant à optimiser la sûreté de fonctionnement de pompe centrifuge **100-P2A**. Pour cela on suggère le plan de travail suivant :

Le premier chapitre présente une description générale de la raffinerie de Skikda RAIK, où nous avons passé notre stage pratique.

Le deuxième chapitre nous avons présenté quelques notions relatives à sûreté de fonctionnement (concepts de base et les différentes mesures, quelque loi de probabilités). Nous avons aussi présenté brièvement quelques méthodes d'analyse et d'évaluation des risques le plus souvent utilisées dans différentes activités.

Le troisième chapitre est consacré à une étude détaillée sur les pompes (définitions, types ...), en particulier la pompe 100-P2A (définition, principe de fonctionnement,

caractéristique principale...). Nous avons cité les Principaux modes de défaillances de la pompe.

Le quatrième chapitre présente pas à pas l'analyse FMD (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité) et une étude qualitative, complémentaire, faite par l'analyse des cause (Ishikawa) et principalement l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC).

L'historique de la pompe P2A permet à nous de collecter des données relatives aux dates de services et de remise en service ainsi que les temps et les causes d'arrêt correspondants. On a exploité ces données pour calculer les indicateurs de maintenance de la pompe (MTBF, MTTR, fiabilité, maintenabilité, disponibilité) et d'appliquer l'analyse des cause et l'analyse AMDEC qui nous permet de choisir une meilleure politique de maintenance pour garder la pompe en bon état de fonctionnement et d'augmenter sa fiabilité.

Une conclusion générale rassemble les différentes conséquences de cette étude.

Une riche bibliographie permet d'accomplir notre tâche correctement et avec des résultats satisfaisants.

**Chapitre I : Présentation de la raffinerie de Skikda
RA1K**

I.1.Introduction

Actuellement l'entreprise nationale de raffinage du pétrole légère ; l'ensemble de cinq raffineries, se trouvant dans les villes : Skikda, Alger, Arzew, Hassi Massoud, Adrar. La capacité totale de transformation de l'entreprise est 28000000 t/an [2].

Dans ce chapitre, nous allons expliquer le principe de fonctionnement du complexe RA1K de SKIKDA en générale, dont nous avons eu l'occasion d'avoir un aperçu global grâce au stage que nous avons effectuée.

I.2. Présentation générale de la raffinerie de Skikda

Le complexe de raffinerie de pétrole de Skikda baptisé RA1/K, a pour mission de transformer le pétrole brut provenant de Hassi Messaoud avec une capacité de traitement (18 millions t/an), ainsi que le brut réduit importé (277.000 t/an) [2].

I.2.1. Situation géographique

Cette raffinerie est située dans la zone industrielle à 7 Km à l'est de Skikda et à 2 Km de la mer, elle est aménagée sur une superficie de 190 hectares avec un effectif à l'heure actuelle d'environ 1280 travailleurs. Elle est alimentée en brut algérien par le brut venant de Hassi Messaoud [2].

Le transport du pétrole brut est réalisé à l'aide d'un Pipe-line à une distance de champs pétroliers jusqu'à le complexe de 760 Km [2].

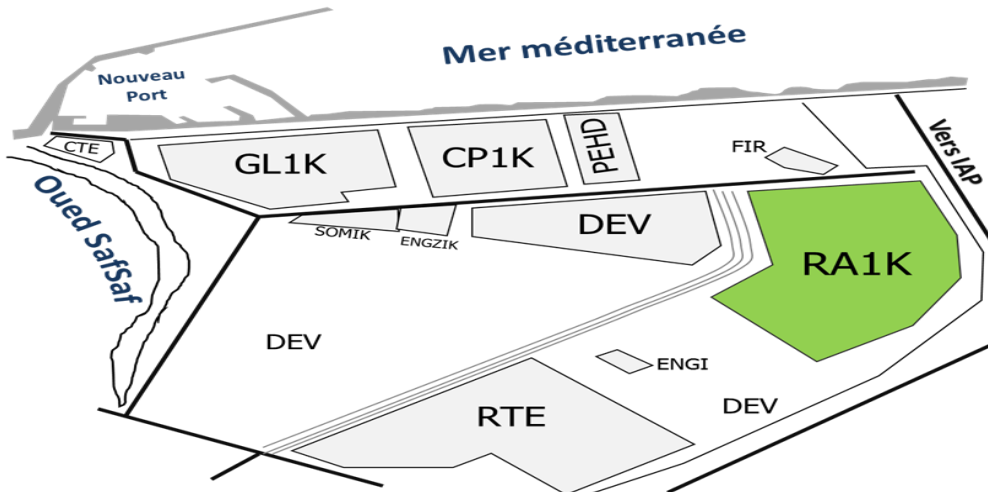


Figure I.1 : Situation géographique de la raffinerie de Skikda [2].

I.2.2. Historique de construction [2]

La raffinerie a été construite en janvier 1976 à la suite d'un contrat signé le 30 avril 1974 entre le gouvernement algérien et le constructeur italien SNAM PROGETTI et SAIPEM [2].

Le démarrage du chantier a commencé le 02 janvier 1976, jusqu'au mars 1980, le démarrage progressif des unités de production se sont succédés comme suit [2] :

Tableau I.1 : Dates des démarrages progressifs des unités de production à la raffinerie de Skikda [2]

Unité	Capacité (t/an)	Date
Topping (U10)	7 500 000	1980
Topping (U11)	7 500 000	1980
Séparation GPL (U30)	306 500	1980
Séparation GPL (U31)	283 000	1980
Reforming catalytique (U-100)	1 165 000	1980
Extraction et fractionnement des aromatiques (U200)	285 000	1980
Cristallisation du para xylène(U400)	430 000	1980
Distillation sous vide et oxydation de bitume(U70)	277 000	1980
Reforming Catalytique (U103)	1 165 000	1993
Séparation GPL (U104)	96 000	1993
Parc de stockage(U600)	2 700 000 (m ³)	1980 et 1993
Centrale thermoélectrique	-	1980 et 1993

I.3. Présentation des différentes unités de production [2]

La raffinerie est équipée des installations suivantes [2] :

- ✓ Unité 10/11 : distillation atmosphérique (TOPPING) ;
- ✓ Unité 100 : prétraitement et reforming catalytique (MAGNAFORMING) ;
- ✓ Unité 101/103 : prétraitement et reforming catalytique (PLATFORMING) ;
- ✓ Unité 30/31 et 104 : traitement et séparation des gaz (GPL) ;
- ✓ Unité 200 : extraction des aromatiques ;
- ✓ Unité 400 : cristallisation et séparation du paraxylène ;
- ✓ Unité 500 : isomérisation de m, ortho xylène en paraxylène ;
- ✓ Unité 700/701/702/703 : isomérisation du naphta léger A ;
- ✓ Unité 70 : distillation sous vide (Production des bitumes).

Les utilités sont [2] :

- ✓ Unité 600 : stockage, mélange et expédition (MELEX) ;
- ✓ Unité 62 : déminéralisation des eaux ;
- ✓ Unité 1050 : centrale thermique électrique (C. T. E) ;
- ✓ Unité 900 : purification de l'hydrogène.

I.3.1. Unités 10-11 (Distillation atmosphérique)

Le Topping ou la distillation atmosphérique a pour but de fractionner le brut en différentes coupes stabilisées pouvant être utilisées pour l'obtention de produits finis (naphta, gas-oil, jet). Les unités U10-11 traitent le brut de Hassi Messaoud pour avoir les produits suivants : G.P.L, Iso-pentane, Naphta A, Naphta B (89.5°-155°), Naphta C (155°-180°), Kérosène (180°-225°), Gasoil léger (225°-320°), Gasoil lourd (320°-360°), et Résidu (>360°) [2].

I.3.2. Unités 100 et 103 (Unités Magnaforming, Platforming)

La Magnaforming et le Platforming ont pour but de transformer la naphta moyenne et lourde obtenues du Topping en réformât utiliser comme charge pour les unités d'aromatiques (unité 200 et 400). Cette transformation a pour conséquence une augmentation de l'indice d'octane de 45 à 99 permet ainsi d'utiliser le réformât obtenu pour la fabrication des essences [2].

I.3.3. Unités 30-31-104 (Séparation et Traitement des Gaz)

Ces unités sont destinées à traiter les gaz liquides venant des unités 10, 11,100 et 103 dans l'ordre suivant [2] :

- ❖ **Unité 30** : traite le gaz liquide qui vient de l'unité 100 en particulier ceux de tête de la colonne C7 où les GPL sont séparés du pentane ;
- ❖ **Unité 31** : reçoit les gaz provenant de la tête des colonnes de stabilisation de l'essence des deux unités de Topping ;
- ❖ **Unité 104** : elle a été conçue dernièrement avec la nouvelle unité de Platforming 103 afin de traiter les GPL venant de cette unité.

I.3.4. Unité 200 (Extraction des Aromatiques)

L'installation d'extraction des aromatiques a été projetée pour extraire de l'essence réformée des aromatiques qui seront fractionnées par la suite en benzène et toluène très pures [2].

La charge est constituée par la coupe de réformât léger provenant directement ou à travers un réservoir de la colonne C₅ splitter du réformât de l'unité 100 [2].

I.3.5. Unité 400 (Séparation du Paraxylène)

Cette unité est conçue pour récupérer le para-xylène produit très recherché sur le marché. La charge venant de l'unité de Magnaforming, permet par cristallisation de séparer le para-xylène des autres xylènes (métha-ortho) et l'éthyle-benzène. Le para-xylène est commercialisé tel qu'il est, le reste peut être utilisé comme base pour l'obtention des essences ou commercialisé sous forme de mélange xylène pouvant être utilisé comme solvant pour la fabrication des peintures, etc [2].

I.3.6. Unité 500 (Isomérisation du M-xylène)

L'installation d'isomérisation des aromatiques a été projetée pour récupérer le filtrat des cristalliseurs de l'Unité 400 (unité de l'extraction du p-xylène) et l'isomérisation, après l'isomérisation obtenu sera séparé en deux fractions essentielles [2] :

- Une fraction riche en benzène envoyée vers l'Unité 200 ;
- L'autre riche en p-xylène envoyée vers l'Unité 400 ;

Le but principal de cette unité est d'augmenter la production en p-xylène.

I.3.7. Unités 700/701/702/703 (Unité d'isomérisation du naphta léger A)

Leur but est la conversion des paraffines normales en iso paraffines est une réaction de plus en plus recherchée par le raffineur pour obtenir un indice d'octane élevé sans ajout des additifs. Les paraffines allant du butane à l'hexane peuvent être isomérisées en utilisant des catalyseurs modernes, très actifs à base de platine. L'isomérisation peut être poussée à l'extrême par l'utilisation de séparation par distillation et/ou par tamis moléculaire des paraffines normales non converties [2].

Les coupes C₅-C₆, peuvent également être totalement isomérisées en composants à haut indice d'octane très recherchés pour le pool essence [2].

Le procédé d'isomérisation est devenu pour le raffineur un outil précieux pour élargir la gamme de ses produits et améliorer leurs qualités, tout en augmentant la flexibilité d'opérations et leur rentabilité. De plus, la production de ces constituants à haute indice d'octane, mais exempts d'aromatiques, permet de réduire la contribution au pool essence du reformât, riche en aromatiques, améliorant ainsi la qualité de l'essence en termes de protection de l'environnement, ce qui est aujourd'hui un facteur très important [2].

Dans la raffinerie de Skikda on a installé deux trains pour l'isomérisation de la fraction légère des essences produites aux topping (U10&U11) afin de fournir un additif sans aromatiques au pool des essences pour la fabrication des carburants [2].

I.3.8. Unité 70 (Production de Bitume) [2]

L'unité 70 a été conçue pour traiter 271 100 t/an de brut réduit importé (BRI) qui peut être :

- Charge A : résidu TIA juan médium 372°C plus ;
- Charge B : résidu TIA juan lourd 450°C plus ;
- Charge C : résidu du brut du Koweït.

L'unité se compose principalement d'une colonne de distillation sous vide et d'un réacteur d'oxydation des bitumes. Le produit de fond de colonne est le bitume routier ordinaire qui est envoyé [2] :

- Une partie vers le stockage ;

- L'autre partie comme charge à la section d'oxydation où elle sera oxydée au moyen de l'air en bitume oxydé.

I.3.9. Unité 600 (Unité Melexe)

Mélange, chargement et expédition, il s'occupe de [2] :

- Bacs de stockage des différentes charges et produits des unités ;
- Expédition des produits vers les différents dépôts de stockage, exemple : dépôt d'El-Kheroub ;
- Mélange des gasoils ;
- Contrôle le chargement des produits qui est au niveau du port de Skikda.

I.3.10. Centrale thermoélectrique

C'est le système nerveux de la raffinerie, La CTE se compose de 11 sections à savoir [2] :

- ♦ La section 62 : pour la production d'eau déminéralisée ;
- ♦ La section 1020 : pour tours de refroidissement de l'eau ;
- ♦ La section 1030 : pour le stockage et le pompage de l'eau de barrage ou de l'eau potable ;
- ♦ La section 1040 : pour le stockage et le pompage de l'eau anti-incendie ;
- ♦ La section 1050 : pour la génération de la vapeur « chaudières » ;
- ♦ La section 1060 : pour la récupération et le traitement du condensât ;
- ♦ La section 1070 : ou système Fuel-Gas ;
- ♦ La section 1080 : pour la production de l'air instrument et l'air service ;
- ♦ La section 1100 pour le traitement des effluents ;
- ♦ La section 1110 : de production de l'azote (N₂) ;
- ♦ La section de production de l'électricité.

I.3.11. Unité 900 (Unité de purification de l'hydrogène)

Elle a pour but l'augmentation de la pureté de l'hydrogène issu de l'unité 100, afin de l'envoyer vers les autres unités consommatrices de l'hydrogène (unité 500...) [2].

I.4. Projets de réhabilitation et adaptation de la raffinerie de Skikda [2]

I.4.1. Plan et programme de réhabilitation

Le tableau n° I-2 regroupe le plan et le programme de réhabilitation successive des unités principales et des utilités [2].

Tableau I.2 : Plan de réhabilitation des unités de la RA1K [2].

N °	Unités	Désignation	Capacité avant Réhabilitation (kg/h)	Capacité après Réhabilitation (kg/h)
1	Topping-1 (*)	10	7 500 000	9 375 000
2	Topping-2 (*)	11	7 500 000	9 375 000
3	GasPlant-1 (*)	30	306 500	339 500
4	GasPlant-2 (*)	31	283 000	339 500
5	GasPlant-3	104	96 000	Instrument revamp @
6	Prétraitement Naphta	100	1 165 000	Instrument revamp @
7	Reforming I (*)	100	1 165 000	1 174 600
8	Section Splitter Platformat (**)	100	-	989 950
9	Prétraitement Naphta	101-103	1 165 000	Instrument revamp @
10	Extraction des aromatiques (*)	200	285 000	627 100
11	Extraction du Paraxylène (#)	400	430 000	1 782 800
12	Isomérisation du Xylène (**)	500	-	1 380 400
13	Purification d'Hydrogène (**)	900	-	27 200
14	Strippeur des eaux acides II (*)	10	33 530	28 000
15	Stripper des eaux acides I (**)	12	-	17 070

Chapitre I : Présentation de la raffinerie de Skikda RA1K

16	Unité soufflage du Bitume	70	277 000	Instrument revamp @
17	Unité traitement du Kérosène N° 1	20	750 000	Instrument revamp @
18	Unité traitement du Kérosène N° 2	21	750 000	Instrument revamp @

(*) = rénové ; (**) = Nouveau ; (#) =déplacé et rénové ; @=y compris HAZOP

I.4.2. Bilan de production de la raffinerie RA1K

Le tableau I-3. Ci-dessous illustre le bilan de production de la RA1K avant et après sa réhabilitation [2].

Tableau I.3 : Bilan de production de la RA1Kavantetaprèsla réhabilitation [2].

Charges	Avant réhabilitation	Après réhabilitation
Pétrole brute, TPA	15 000 000	18 000 000
Produits		
GPL	365 000	644 200
Naphta	1700 000	3 753 800
Essence	2 180 000	2 135 400
Jet Al	1 500 000	1 500 000
Diesel	4 250 000	5 913 800
Fuel oil	4 300 000	4 270 800
Benzène	90 000	197 300
Toluène	11 000	16 900

Chapitre I : Présentation de la raffinerie de Skikda RA1K

Paraxylène	38 000	22 0100
------------	--------	---------

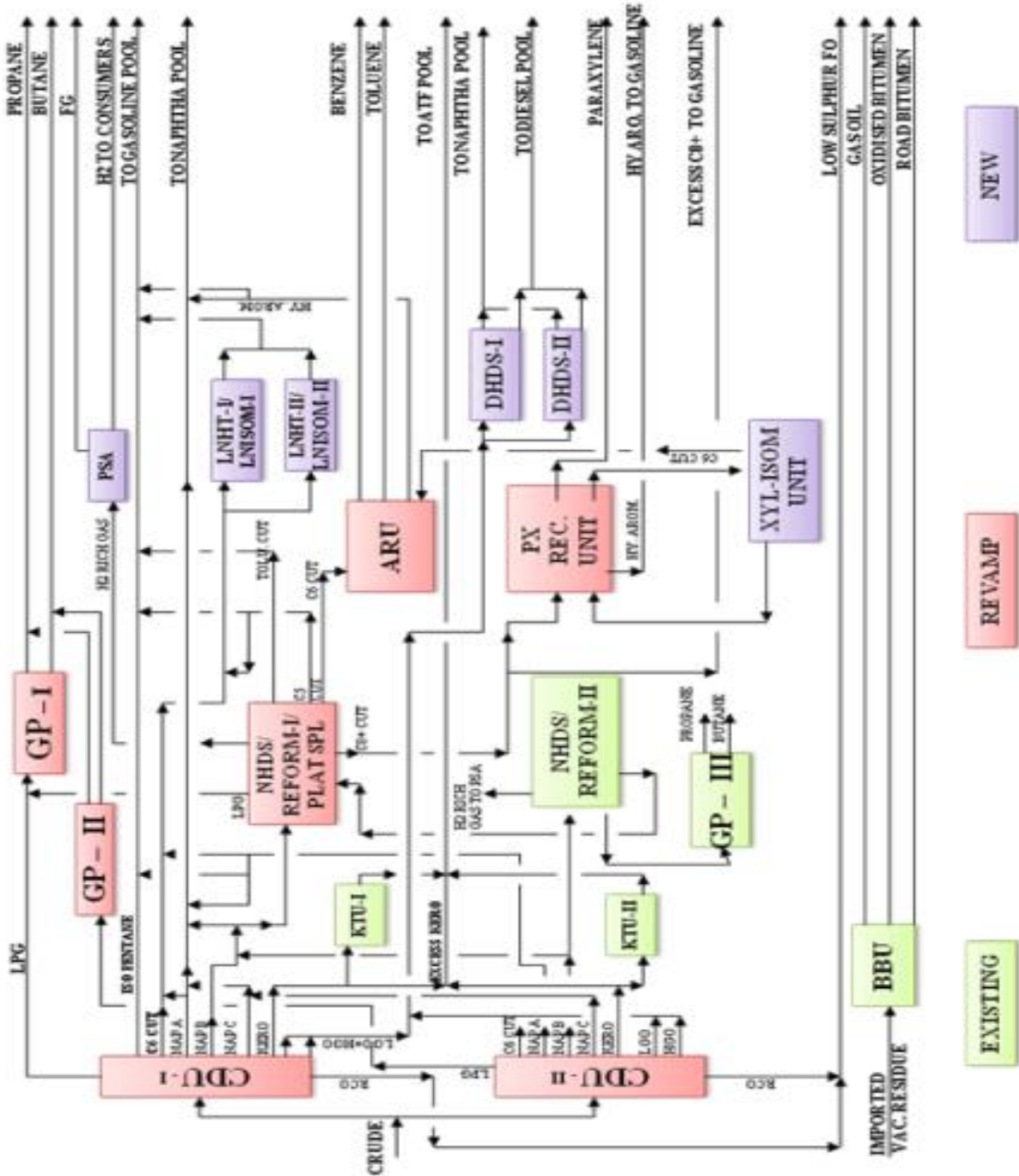


Figure I.2 : Schéma des principaux procédés dans la raffinerie de Skikda [2].

I.5. Conclusion

La raffinerie de Skikda RA1K est divisée en plusieurs unités différentes importants, parmi ceux-ci l'unité U100. L'unité de reforming catalytique U100 est un procédé ayant pour objectif de traiter une charge naphtha B pour produire le maximum des produits aromatiques qui seront séparés au niveau des unités U200 et U400 produisant le benzène, le toluène et le P xylène. Les performances de cette unité U100 sont liées directement à celles des plusieurs équipements tel que la pompe. Donc la pompe jouer un rôle important dans la marche de l'unité.

Dans ce chapitre nous choisissons l'unité 100 (Le lieu de notre stage), dans le but de faire une étude complète sur la sûreté de fonctionnement de la pompe 100-P2A.

Chapitre II : Outils mathématique d'évaluation de la sûreté de fonctionnement

II.1. Introduction

Les préoccupations dites de sécurité sont très présentes dans les procédés continus comme la pétrochimie ou dans le monde des machines-outils. Dans les applications de type manufacturier ou batch, les préoccupations sont plutôt liées à la disponibilité. Dès lors que la sécurité ou la disponibilité d'un système est mise en défaut, on incrimine sa fiabilité. Enfin, il convient de remettre le système en conditions de fonctionnement initial en cas de dysfonctionnement : c'est là qu'intervient la maintenabilité. Ces quatre caractéristiques constituent la sûreté de fonctionnement d'un dispositif, ce à quoi s'attache l'objectif de ce chapitre qui vise à rappeler les concepts de sûreté de fonctionnement qui sont utilisés par la suite [3]. La première section présente les concepts fondamentaux de la sûreté de fonctionnement : les attributs, les moyens et les entraves. La seconde section illustre les mathématiques de la sûreté de fonctionnement. La troisième section présente les méthodes usuelles pour quantifier les attributs de la sûreté de fonctionnement des systèmes.

II.2. Historique de la sûreté de fonctionnement

Les problèmes de Sûreté de Fonctionnement (SDF) existent depuis très longtemps, dès qu'un système a pu échouer ou tomber en panne [4]. Le tableau suivant présente son historique :

Tableau II.1 Historique de la sûreté de fonctionnement [5].

Période	Concepts	Évènements
Année 1950	Approche statistique, taux de défaillance. Théorie de la fiabilité en électronique (USA)	Explosion poudrière (1794) Accident chemin de fer (1842) Titanic (1912)
Année 1960	Quantification de la disponibilité Arbre des causes (NASA) Analyse des défaillances et leurs effets en (aéronautique et le spatiale)	
Année 1970	Analyse des risques (Nucléaire) Collecte des données	La catastrophe nucléaire de Three Miles Island (1979)
Année 1980	Formalisation et généralisation de la SDF (conception des systèmes complexe) Nouvelles techniques simulation modélisation	Tchernobyl (1986) Ariane V (1996)

Année 2000	Utilisation de la SDF dans l'industrie	
---------------	--	--

II.3. Concepts fondamentaux

II.3.1. Définitions de la Sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnements est l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle est la science des défaillances [6].

Selon Laprie la sûreté de fonctionnement c'est " confiance justifier dans le service délivre " se base principalement de la perception des utilisateurs. Une définition alternative donne par laprie c'est l'aptitude à éviter des défaillances du service délivré plus fréquentes ou plus graves qu'acceptable [7].

La « Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité et Sécurité » qu'on rencontre dans l'acronyme FDMS (RAMSS en anglais), fait référence aux définitions de ces termes et met en avant leur complémentarité. Si la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité ou la sécurité ont aussi des performances d'un système, la Sdf ne se réduit pas uniquement à une de ces performances, elle se construit par toutes ces performances [8].

Le « maintien de la qualité dans le temps » prend en considération la conformité aux exigences (explicites ou non). Elle présente le défaut de laisser supposer qu'une activité Sdf se conduit nécessairement dans le cadre d'une démarche qualité, ce qui est insuffisant [9].

Note : La **SDF** est considérée globalement comme la conjugaison de ces quatre définitions précédentes [5].

II.3.2. L'arbre de la sûreté de fonctionnement

Les notions fondamentales de la sûreté de fonctionnement sont classées en trois groupes dans l'arbre de la sûreté de fonctionnement (Avizienis et al.,2000) (Figure II.1) : les attributs de la sûreté de fonctionnement, les entraves à la sûreté de fonctionnement, et les moyens par lesquels la sûreté de fonctionnement est atteinte [9].

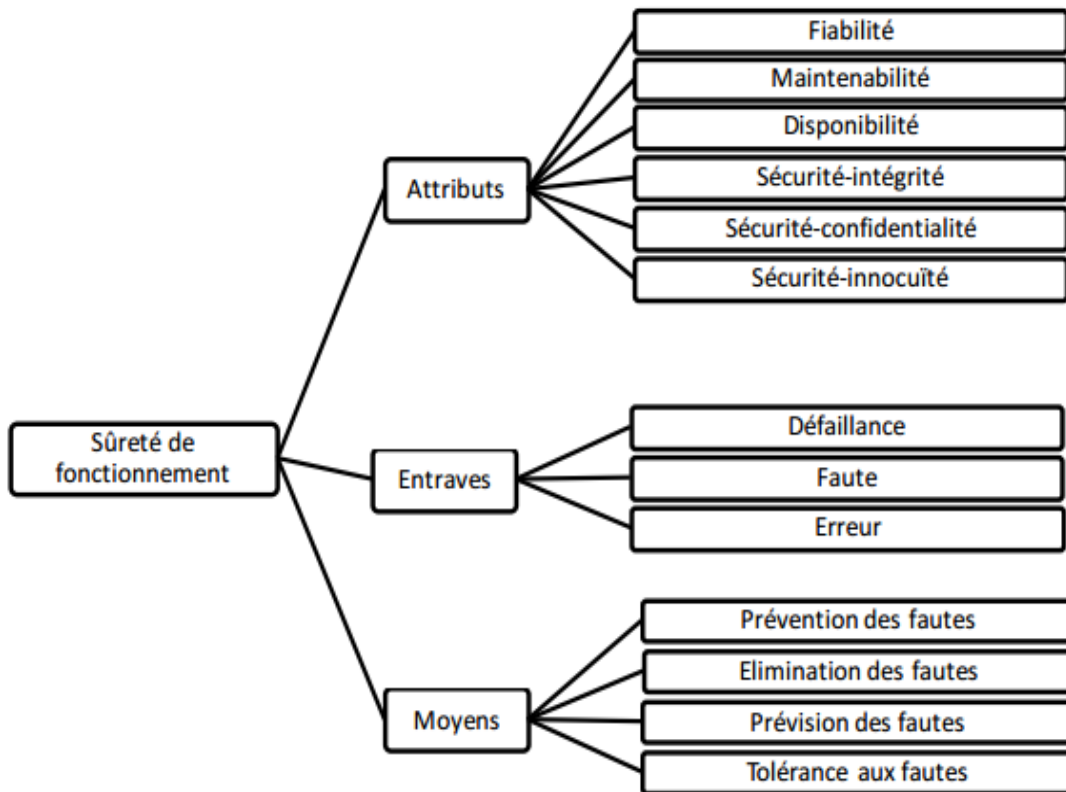


Figure II.1 : Arbre de la sûreté de fonctionnement, adapté de (Avizienis et al.,2000) [9].

II.3.3. Mesures de la sûreté de fonctionnent

II.3.3.1. Fiabilité ou Reliability

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant un intervalle donné. Elle est caractérisée par la probabilité $R(t)$ que l'entité E accomplisse ces fonctions, dans les conditions données pendant l'intervalle de temps $[0, t]$, sachant que l'entité n'est pas en panne à l'instant 0 [10].

$$R(t) = P [E \text{ non défaillant sur } [0 ; t]] \quad (\text{II.1})$$

La dé fiabilité est l'aptitude contraire ci que la probabilité de défaillance de l'entité [4].
On écrit :

$$F(t)=1-R(t) \quad (\text{II.2})$$

Chapitre II : Outils mathématique d'évaluation de la sureté de fonctionnement

Le Mean operating Time to Failure (MTTF) est une grandeur moyenne associée à la fiabilité qui est utilisée dans le fonctionnement de l'entité avant la première défaillance [11]. La définition mathématique est :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (II.3)$$

Le MTBF (Mean Time Between Failure) représente la moyenne des temps entre deux défaillances. On peut écrire :

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (II.4)$$

Le taux instantané de défaillance, note $\lambda(t)$, ainsi que La valeur $\lambda(t)dt$ représente la probabilité conditionnelle d'avoir une d'défaillance dans l'intervalle de temps $[t, t+dt]$, sachant qu'il n'y a pas eu de d'défaillance dans l'intervalle de temps $[0, t]$ [10].

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \quad (II.5)$$

$$\lambda(t) = \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \quad (II.6)$$

La courbe en baignoire représentant le taux de défaillance $\lambda(t)$. Celle-ci permet d'illustrer les 3 phases de la vie d'un système : la période de déverminage, la période de vie utile et la période de vieillissement [9].

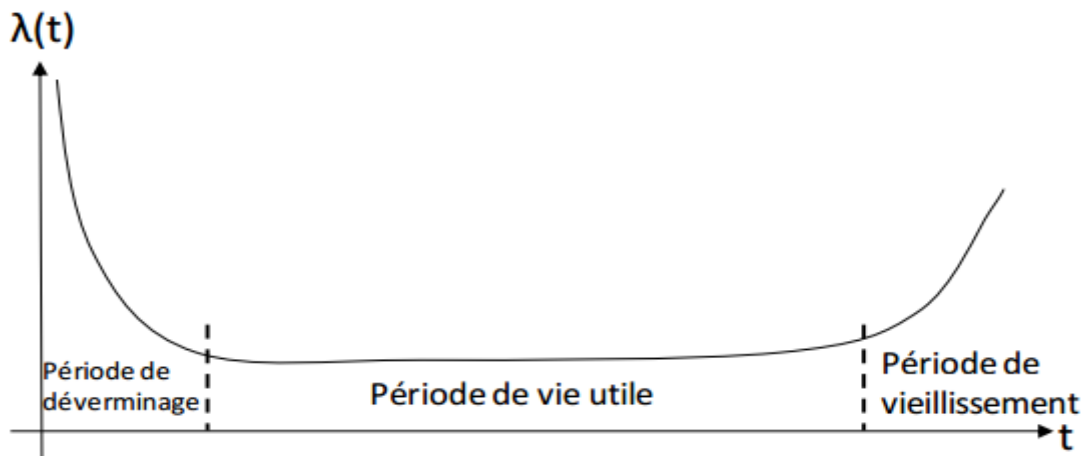


Figure II.2 : Evolution du taux de défaillance d'un système [9].

II.3.3.2. Disponibilité ou availability

La disponibilité est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée [11]. Elle est caractérisée par la probabilité $A(t)$ et s'exprime par :

$$A(t) = P(\text{E non défaillante à l'instant } t) \quad (\text{II.7})$$

L'aptitude contraire ou indisponibilité est définie par :

$$\bar{A} = 1 - A(t) \quad (\text{II.8})$$

II.3.3.3. Maintenabilité (Maintenability)

C'est l'aptitude d'une entité 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 [4].

La maintenabilité est mesurée par une probabilité $M(t)$ que la maintenance d'une entité E accomplie dans des conditions données, avec des procédés et des moyens prescrits, soit achevée au temps t , sachant que E est défaillant au temps $t=0$ [11] :

$$M(t) = P(\text{la maintenance de E est terminée au temps } t) \quad (\text{II.9})$$

$$M(t) = 1 - P(\text{E non réparée sur la durée } [0, t]) \quad (\text{II.10})$$

La probabilité contraire c'est l'immaintenabilité, on écrit :

$$\bar{M} = 1 - M(t) \quad (\text{II.11})$$

Le taux instantané de réparation, note $\mu(t)$, selon (Villemeur, 1991) la définition est [6] :

$$\mu(t) = \frac{\frac{dM(t)}{dt}}{1 - M(t)} \quad (\text{II.12})$$

Le Temps Moyen avant Remise en Service ou temps d'indisponibilité après défaillance (TMRS), Mean Time To Restoration (Mean Time To Repair, MTTR [9] :

$$MTTR = \int_0^{\infty} (1 - M(t)) dt \quad (\text{II.13})$$

MUT : Mean Up Time : durée moyenne de fonctionnement après réparation

MDT : Mean Down Time : Durée moyenne d'indisponibilité après défaillance

MTBF : Mean Time Between Failure : Durée moyenne entre deux défaillances

$$MTBF = MUT + MDT \quad (II.14)$$

Ces indicateurs sont représentés dans la figure [10] :

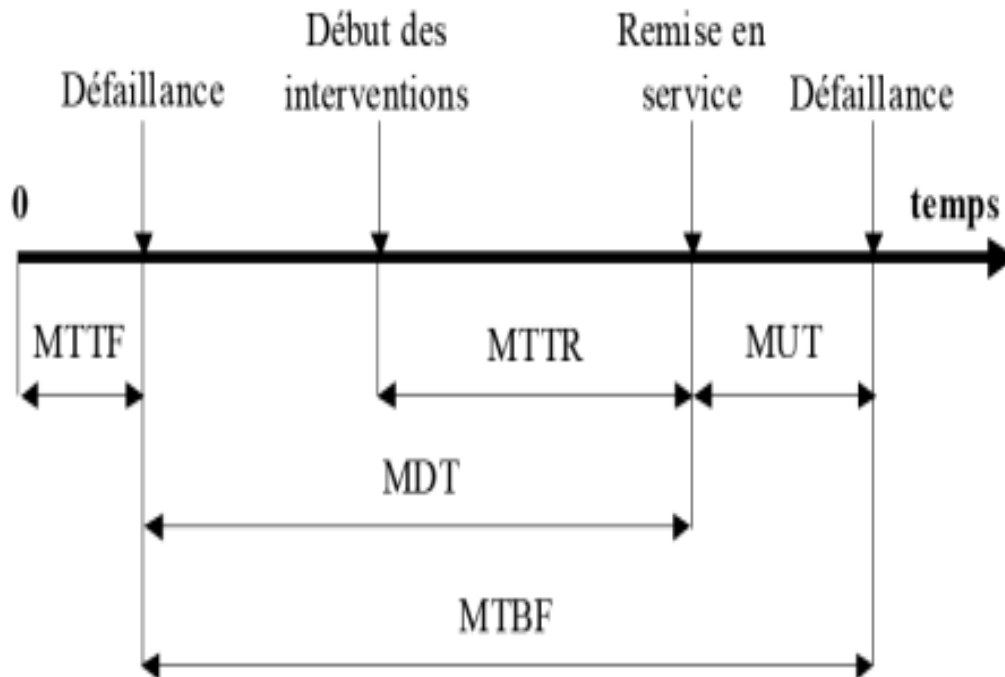


Figure II.3 : Durées moyennes associées à la SDF [10].

La maintenabilité est donc liée à la maintenance, qui 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 [9].

Il existe plusieurs types de maintenance, qui peuvent être classés en 2 groupes : avant l'occurrence d'une défaillance (maintenance préventive) et après l'occurrence d'une défaillance (maintenance corrective) [9].

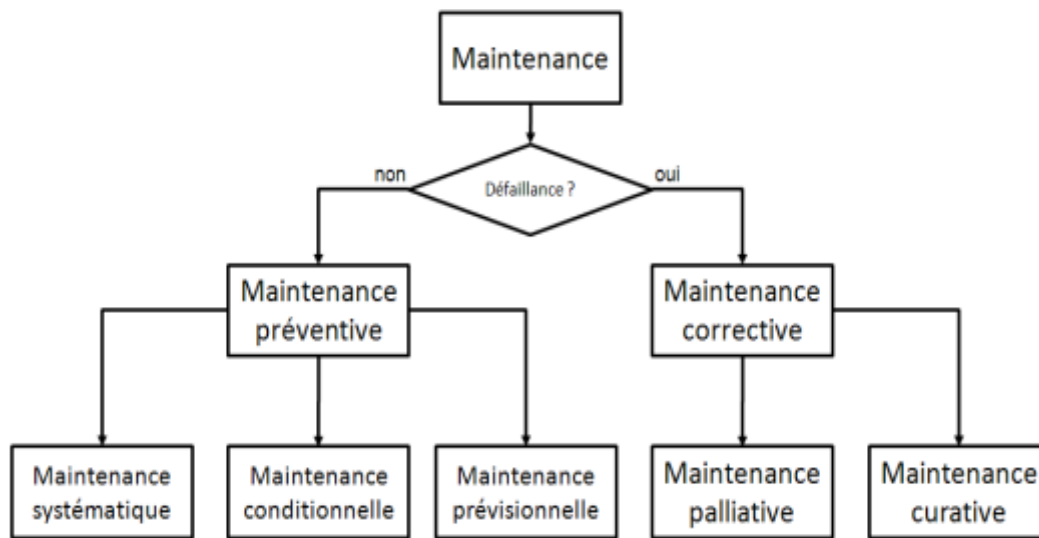


Figure II.4 : Classification des types de maintenance [9].

Plusieurs types de maintenance préventive existent ; elles s'appliquent avant l'occurrence d'une défaillance [9] :

- La maintenance systématique, où les actions peuvent être déclenchées en accord avec un calendrier statique préétabli ou en accord avec une durée de fonctionnement. Lorsqu'il est possible de déterminer l'état de santé des matériels, deux cas peuvent être distingués ;
- La maintenance conditionnelle, qui « comprend une combinaison de surveillance en fonctionnement et/ou d'essai, d'analyse et les actions de maintenance qui en découlent ». Cette maintenance est déclenchée lors du franchissement d'un seuil, qui peut être qualifié par une information issue d'une mesure sur le bien ;
- La maintenance prévisionnelle (aussi appelée maintenance prédictive, est "exécutée suite à une prévision obtenue grâce à une analyse répétée ou à des caractéristiques connues et à une évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien".

Après l'occurrence de la défaillance, le matériel défaillant est remplacé (cas d'une entité élémentaire) ou réparé (cas d'un système complexe réparable). Dans ce cadre ; La maintenance corrective vise à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Il est possible de distinguer parmi les opérations de maintenance corrective [9]

:

- La maintenance palliative (ou maintenance corrective d'urgence) destinée à permettre à un matériel non critique d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Elle correspond aux dépannages provisoires ;
- La maintenance curative (ou maintenance corrective différée), qui vise à "rétablir un bien dans un état spécifié ou à lui permettre d'accomplir une fonction requise ». Le résultat des activités doit présenter un caractère permanent et a pour objet de supprimer la (les) défaillance(s).

II.3.3.4. Sécurité / Safety :

La sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques [6].

La sécurité est caractérisée par la probabilité $S(t)$ qu'un système S évite de faire apparaître, dans des conditions, des événements critiques ou catastrophiques [6].

$$S(t) = P(\text{E évite des évènements critiques ou catastrophiques sur } [0, t])$$

II.3.4. Moyens pour la sûreté de fonctionnement

Le développement d'un système sûr de fonctionnement nécessite l'utilisation combinée d'un ensemble de méthodes qui peuvent être classées en [4] :

- Prévention des fautes : comment empêcher l'occurrence ou l'introduction de fautes ;
- Tolérance aux fautes : comment fournir un service à même de remplir la fonction du système en dépit des fautes ;
- Élimination des fautes : comment réduire la présence (nombre, sévérité) des fautes ;
- Prévision des fautes : comment estimer la présence, le taux futur, et les possibles conséquences des fautes.

II.3.5. Entraves

Les entraves à la sûreté de fonctionnement sont définies comme les circonstances indésirables, mais non attendues, causes ou résultats de la non-sûreté de fonctionnement. Il est généralement distingué [9] :

- La défaillance, qui est un évènement défini comme « la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise » ;
- La faute, qui est la cause supposée d'une erreur ;

- L'erreur, qui est la partie de l'Etat d'un système qui est susceptible d'entraîner une défaillance. Une défaillance se produit, lorsque l'erreur devient active.

II.4. Mathématiques de la sûreté de fonctionnement

Les statistiques sont utilisées en sûreté de fonctionnement des variables aléatoires modélisent les défaillances et réparations des entités. Ces variables aléatoires suivent des lois de probabilité. On distingue deux types de variables aléatoires [9] :

II.4.1. Variables aléatoires discrets

Une variable aléatoire discrète prend ses valeurs sur un ensemble fini ou dé- nombrable de points. La loi de probabilité d'une telle variable est appelée loi discrète [12].

$$P(X = x_i) = P_i \quad 0 \leq P_i \leq 1 \quad \sum_i P_i = 1 \quad (II.15)$$

La fonction de répartition est une fonction en escalier, on exprime la fonction de répartition F d'une variable aléatoire discrète en fonction des valeurs prises par sa loi de probabilité [13] :

$$P(\alpha) = \sum_{x \leq \alpha} P(x) = p(x \leq \alpha) \quad (II.16)$$

Dans la théorie des probabilités, l'espérance mathématique d'une variable aléatoire discrète est l'un des concepts les plus importants. Pour une aléatoire discrète X de loi de probabilité $p(X=x)$, l'espérance mathématique de X , notée $E(X)$, on écrit [13] :

$$E(x) = \sum_{i=1}^n x_i P(X = x_i) \quad (II.17)$$

Soit X une variable aléatoire discrète, alors la variance se définit par l'expression suivante [13] :

$$v(x) = E[X - E(X)^2] \quad \Leftrightarrow \quad v(x) = E(x^2) - [E(x)]^2 \quad (II.18)$$

II.4.2. Variables aléatoires continues

Une variable aléatoire continue prend ses valeurs sur un ensemble infini non dénombrable de points, elle décrit par exemple la durée de vie d'une batterie de voiture, l'heure d'arrivée des voitures à un péage donné d'autoroute... [12]

Il existe une fonction f non négative, définie pour toute valeur x appartenant à \mathbb{R} et vérifiant, pour toute partie A de \mathbb{R} , la propriété [12].

$$\Pr(x \in A) = \int_A f(x) dx \quad (II.19)$$

Et telle que

$$\int_{\mathbb{R}} f(x) dx = 1 \quad (II.20)$$

La fonction f est la densité de probabilité de la variable aléatoire X .

La relation entre la fonction de densité $f(x)$ d'une variable aléatoire X et la fonction de répartition $F(x)$ est donnée par [12] :

$$F(x) = P(x \leq k) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (II.21)$$

L'Espérance : Si X est une variable aléatoire continue ayant pour densité f , alors [12] :

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x) dx \quad (II.22)$$

Soit X une VA continue, alors

$$v(x) = E[X - E(X)^2] \quad \Leftrightarrow \quad v(x) = E(x^2) - [E(x)]^2 \quad (II.23)$$

II.5. Les lois principales de probabilités

II.5.1. Lois continues

II.5.1.1. Loi exponentielle

La loi exponentielle a de nombreuses applications dans le domaine de l'ingénierie en particulier dans l'étude de fiabilité d'un système pour décrire la période durant laquelle le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant (défaillance aléatoire). Elle décrit le temps s'écoule jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances. Elle est caractérisée par un seul paramètre, le taux de défaillance, λ [14].

- Sa fonction de fiabilité prend la forme :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (II.24)$$

- Sa densité de probabilité de paramètre X s'écrit :

$$F(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (II.25)$$

- Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \lambda \quad (II.26)$$

- Sa fonction de répartition est exprimée :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (II.27)$$

- La moyenne des temps de fonctionnement (MTTF) :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (II.28)$$

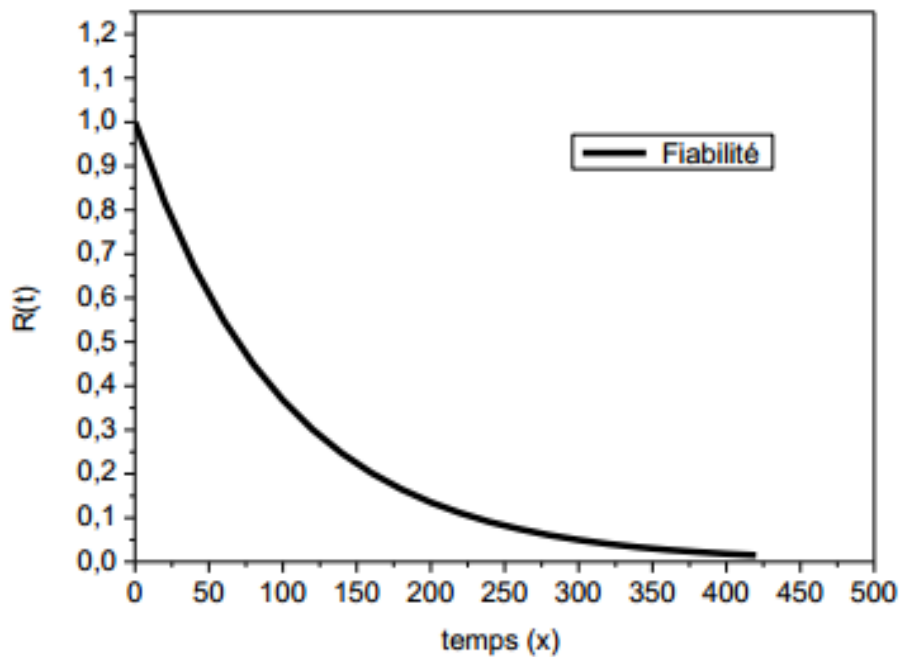


Figure II.5 : Courbe théorique de fiabilité de la loi exponentielle [14].

II.5.1.2. Loi de Weibull

La loi de Weibull est souvent utilisée en mécanique ; elle distingue bien le comportement du produit dans les trois phases de vie selon la valeur du paramètre de forme β : période de jeunesse ($\beta < 1$), période de vie utile ($\beta = 1$) et période d'usure ou vieillissement ($\beta > 1$). La loi de Weibull est caractérisée par deux paramètres η (paramètre d'échelle) et β (paramètre de forme) [10].

- Sa fonction de fiabilité prend la forme :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (II.29)$$

- La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (II.30)$$

- Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (II.31)$$

Avec les paramètres et signification : γ , β , η définissent la distribution de Weibull. On utilise trois paramètres [14] :

β : paramètre de forme ($\beta > 0$)

η : paramètre d'échelle ($\eta > 0$)

γ : paramètre de position ($-\infty > \gamma > +\infty$)

Signification des paramètres

Paramètre d'échelle éta (η) : Ce paramètre permet d'utiliser le papier d'Allan Plait quel que soit l'ordre de grandeur de t . Il n'a donc pas à être interprété [14].

Paramètre de forme bêta (β) : Ce paramètre donne des indications sur le mode des défaillances et sur l'évolution du taux de défaillances dans le temps [14].

Papier de Weibull

Ce papier de Weibull sert à lire graphiquement les paramètres d'une loi de Weibull dans le cas où le paramètre γ est nul. En effet, la fonction de répartition associée à une loi de Weibull de paramètres $\beta, \gamma = 0, \eta$ est définie par [14] :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (II.32)$$

$$\Leftrightarrow \ln(1 - F(t)) = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \quad (II.33)$$

$$\Leftrightarrow -\ln(1 - F(t)) = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \quad (II.34)$$

$$\Leftrightarrow \ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln\left(\frac{t}{\eta}\right) \quad (II.35)$$

$$\Leftrightarrow \ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln t - \beta \ln \eta \quad (II.36)$$

$$\Leftrightarrow y = \beta X - \beta \ln \eta \quad (II.37)$$

La dernière équation obtenue est l'équation d'une droite dans le repère rouge (O ; X ; Y) où O est le point correspondant à $\mathbf{X} = \mathbf{0}$ et $\mathbf{Y} = \mathbf{0}$ soit à $\mathbf{t} = \mathbf{1}$ et $\mathbf{F}(\mathbf{t}) = \mathbf{1} - \mathbf{1}/\mathbf{e}$. Le paramètre se lit directement à l'intersection de la droite précédente avec l'axe des abscisses puisque celui-ci est gradué en échelle logarithmique, ce qui est montré sur la figure II.7. Le paramètre est le coefficient directeur de la droite précédente, il suffit de tracer une droite parallèle à la précédente et de lire directement le coefficient directeur de cette droite sur l'axe d'équation $X = -1$ [14].

Echelles utilisées sur le papier de Weibull

- Abscisse haute : échelle naturelle en X ;
- Abscisse intermédiaire : échelle logarithmique (lecture du paramètre t) ;
- Abscisse basse : échelle logarithmique (on fait correspondre à chaque valeur de t son Logarithme népérien $\ln t$) ;
- Ordonnée gauche : on place les valeurs de F (t) en pourcentage en échelle $\ln(-\ln(1 - F(t)))$;
- Ordonnée sur l'axe $X = -1$ (lecture du paramètre) : ce sont les valeurs $\ln(-\ln(1 - F(t)))$ [14].

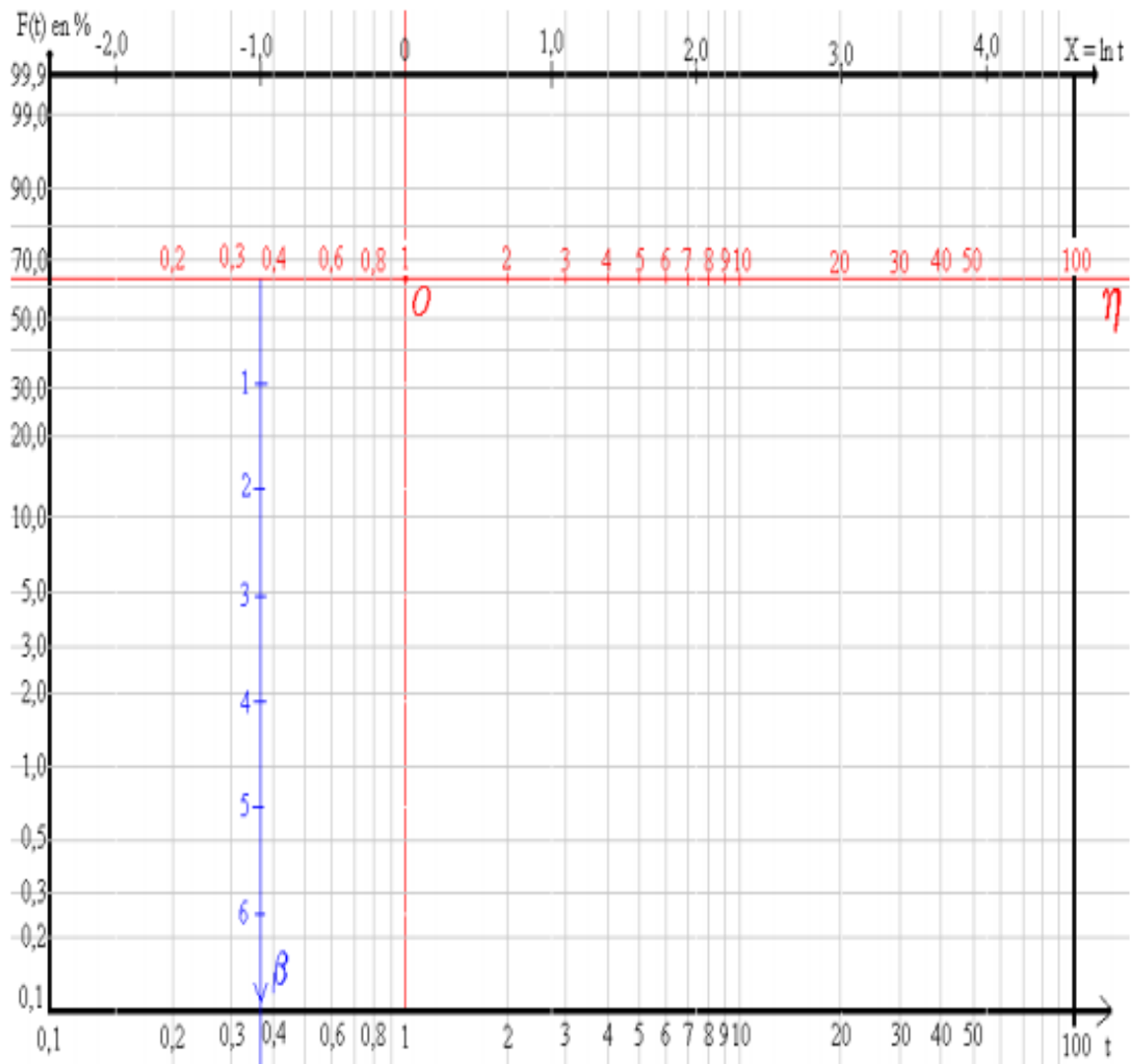


Figure II.6 : Papier de Weibull [14].

II.5.1.3. Loi normale

La loi normale occupe une place centrale en statistique, autant d'un point de vue théorique que dans ses applications. Elle renvoie vers des utilisations très fréquentes et diverses.

C'est la raison pour laquelle quelques brefs rappels de notions élémentaires sur cette loi de probabilité importante sont proposés ici [15].

Une variable aléatoire réelle X suit une loi normale (ou loi gaussienne, loi de Laplace-Gauss) d'espérance μ et d'écart type σ (nombre strictement positif, car il s'agit de la racine carrée de la variance σ^2) si cette variable aléatoire réelle X admet pour densité de probabilité la fonction $f(x)$ définie, pour tout nombre réel x , par [16] :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (II.35)$$

- La fonction f définit une densité. En effet :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (II.36)$$

- Par ailleurs, la fonction de répartition d'une loi normale de moyenne μ et d'écart type σ est donnée par la formule suivante [16]:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (II.37)$$

- Représentation graphique de la fonction de densité [12] :

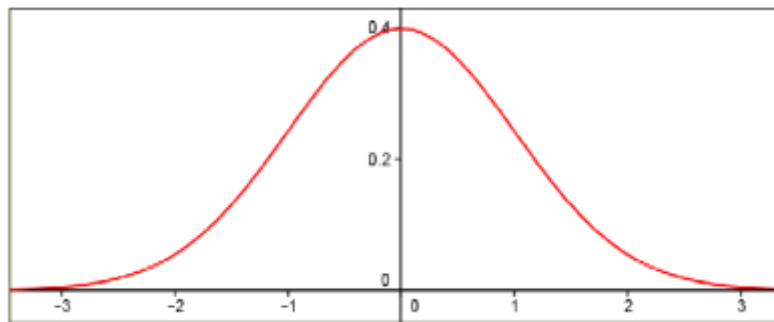


Figure II.7: fonction de densité d'une loi normale [12].

Variable aléatoire centrée réduite [13]

On dit que la variable aléatoire y est centrée réduite associée à la variable X ($X \sim N(\mu; \sigma)$) [13].

Si est seulement si
$$Y = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (II.38)$$

- La fonction de densité de la variable aléatoire normale centrée réduite :

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y)^2}{2}} \quad (II.39)$$

- La fonction de répartition de la variable aléatoire normale centrée réduite :

$$F(X) = P(Y < y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{(t)^2}{2}} dt \quad (II.40)$$

Remarque : il ya d'autres lois de probabilités continue qui sont associées aux variables aléatoires continues, par exemple lorsqu'il s'agit de quantifier la durée de bon fonctionnement d'une entité [9]. Tels que : La loi Bêta, loi log normale, loi gamma.

II.5.2. Lois discrètes

II.5.2.1. Loi de Bernoulli

Soit un univers constitué de deux éventualités, S pour succès et E pour échec = $\{E, S\}$ sur lequel on construit une variable aléatoire discrète, « nombre de succès » telle qu'au cours d'une épreuve [14] :

- Si (S) est réalisé, $X = 1$
- Si (E) est réalisé, $X = 0$

L'expression de la fonction de fiabilité se définit :

$$P(X = 0) = q \quad (II.41)$$

$$P(X = 1) = p \quad (II.42)$$

$$(P + q = 1) \quad (II.43)$$

Selon la loi de Bernoulli on prend quelques Exemples relatifs aux variables aléatoires [13] :

- On lance une pièce de monnaie, donc les résultats possibles sont : pile ou face ;
- Un étudiant passe un examen, il se pourrait qu'il ait ou pas ;
- Le test de qualité d'un lot de pièces, des pièces défectueuses ou non défectueuses ;
- Une porte fermée ou ouverte.

Les moments d'une variable X qui suit une loi de Bernoulli sont donnés par [13] :

- L'espérance mathématique :

$$E(x) = (1)p + (0)(1-p) = p \quad (II.44)$$

- La variance :

$$v(x) = pq = p(1 - p) \quad (II.45)$$

II.5.2.2. Loi binomiale

Soit X une variable aléatoire discrète dont les résultats possibles succès ou échec. Si on répète la même expérience n fois, alors on dit que la variable X suit une loi binomiale de paramètres n et p on note alors $x \sim B(n, p)$ [13].

Remarque : $\sum B(n) \sim B(n, p)$, c'est dire répéter n fois une loi de Bernoulli va donner une loi binomiale [13].

La loi de probabilité d'une loi binomiale est définie par la formule ci-après [13] :

$$P(X = x) = C_n^x P^x (1 - P)^{n-x} \quad (II.46)$$

Où x : est nombre de succès parmi les n durant les n expériences.

Moments d'une variable sui une loi binomiale [13]:

- L'espérance :

Nous savons que $\sum B(p) \sim B(n, p)$, alors $X \sim B(n, p) \Rightarrow X = \sum X_i$, tel que $X_i \sim B(p)$

Par conséquent $E(X) = E(\sum X_i) = \sum E(X_i)$, (car les X_i sont indépendants) $= np$

- La variance :

$$V(x) = npq = np(1 - P) \quad (II.47)$$

II.5.2.3. Loi de Poisson

Une variable aléatoire x suit une loi de « Poisson » si elle peut prendre les valeurs entières $0, 1, 2, 3 \dots n$. La probabilité pour que x soit égal à k est [14] :

$$p(x = n) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^n}{n!} \quad (II.48)$$

λ : paramètre de la loi (constante positive).

La probabilité pour qu'un événement se produise est d'autant plus vraie que la population concernée est grande et le nombre d'évènement petit. Par conséquence la loi de

Chapitre II : Outils mathématique d'évaluation de la sureté de fonctionnement

Poisson servira à étudier les phénomènes rares, tels que les accidents, pannes, défauts de fabrication où la probabilité p est très faible ($p < 0.05$). Elle peut également dans certaines conditions être définie comme limite d'une loi binomiale [14].

La probabilité de constater un certain nombre de pannes (n) dans le temps (t) et seulement (n) pannes est [14] :

$$p(x = n) = e^{-\lambda t} \cdot \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (II.49)$$

- L'espérance mathématique est $= \lambda t$
- La variance $= \lambda t$
- L'écart type $\sigma = \sqrt{\lambda t}$

Exemple d'application

Calculer la probabilité de constater de 1 à 15 pannes pendant le temps t ($t =$ une année de Fonctionnement $= 24/\text{jours}/\text{an}$) est seulement n pannes sachant que la MTBF est de 41.2 jours [14].

$$\text{Le taux d'avarie est : } \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{41.2} = 0,0243$$

$\lambda = 0,0243$, $t = 240$ et $n =$ valeurs de 1 à 15

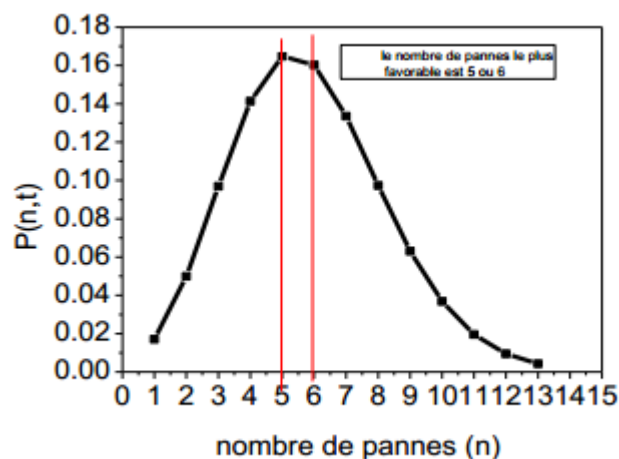


Figure II.8. Nombre de pannes [14].

Le nombre de panne le plus probable est 5 ou 6 (ce que nous savons déjà puisque le taux de panne est constant et qu'il a une panne tous les 41 jours moyens). On peut dire avec une

Chapitre II : Outils mathématique d'évaluation de la sûreté de fonctionnement

certitude de 80 % que le nombre de panne se situera entre 3 et 8. On voit clairement la tendance de la courbe vers une valeur asymptotique quand le nombre de pannes devient très grand. On voit que pour une défaillance, c'est-à-dire pour une panne et une seule de 0 à t la probabilité devient [14] :

$$P(1, t) = \lambda t e^{-\lambda t} \quad (II.50)$$

Une fois connu le nombre de pannes le plus probable, on peut chercher la probabilité P d'avoir N pannes et pas plus. Cette probabilité est la somme des P précédentes pour les valeurs de $n \leq N$, nous avons 0 [14].

P est la probabilité cumulée de pannes entre 0 et le temps t.

Remarque : Les lois de probabilité discrètes sont utilisées, par exemple, lorsqu'il s'agit de quantifier la défaillance à la sollicitation, qui se produit lorsqu'une entité refuse de changer d'état lorsque cela lui est demandé [9]. Tels que : Loi Uniforme. Loi Binomiale négative, Loi Géométrique, Loi Hypergéométrique.

II.6. Méthodes usuelles en sûreté de fonctionnement

La littérature (IEC60300-3-1,2003) (Hoyland&Rausand,2004) (Kumamoto,2007) (Ciame,2009) (Chaufferiez et al.,2012) distingue un certain nombre de méthodes pour réaliser une étude FMD. Une méthode particulière peut être choisie en fonction du type de résultats ou en fonction des buts de l'étude, qui peut être qualitatif, quantitatif ou combiner les deux aspects (Tableau II.2) [9].

Tableau II.2 : Classification des principales méthodes dans le domaine de la sûreté de fonctionnement (Cauffriez et al.,2012) [9].

Méthode	Quantitative /qualitative	Statique/ Dynamique	Objectifs
Analyse Préliminaire des Dangers	Qualitative	Statique	Identification a priori du risque
Analyse des Modes de Défaillance, de leurs effets et de leur Criticité (AMDEC)	Qualitative	Statique	Evaluation des possibles conséquences des Défaillances

Chapitre II : Outils mathématique d'évaluation de la sureté de fonctionnement

Arbre de Défaillance	Qualitative/ Quantitative	Statique	Evaluation des scénarios d'évènements
Bloc diagramme de Fiabilité (BDF)	Qualitative/ Quantitative	Statique	Construction d'un modèle du système basé sur la fiabilité des composants
Arbre d'Evènements	Qualitative/ Quantitative	Statique	Evaluation des possibles conséquences d'un évènement
Table de vérité	Qualitative	Statique	Analyse de toutes les combinaisons d'état
Méthode du Diagramme Cause Conséquence	Qualitative/ Quantitative	Statique	Analyse d'un évènement initiateur
Graphes de Markov	Qualitative/ Quantitative	Dynamique	Identification de l'évolution du système dans Les états bon fonctionnement, dégradé, panne
Réseaux de Petri	Qualitative/ Quantitative	Dynamique	Identification de l'évolution du système dans les états bon fonctionnement, dégradé, panne
Fiabilité dynamique	Quantitative	Dynamique	Identification de l'évolution du système dans Les états bon fonctionnement, dégradé, panne Pour les systèmes hybrides
Réseaux Bayésiens Dynamiques	Qualitative/ Quantitative	Dynamique	Identification de l'évolution du système dans les états bon fonctionnement, dégradé, panne

II.7. Conclusion

Après un tour d'horizon sur l'historique et les concepts fondamentaux de la sûreté de fonctionnement, nous avons passé en revue dans ce chapitre a les principales lois de probabilités et méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement des systèmes.

Chapitre III : Description de la pompe 100-P2A

III.1 Introduction

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. La plus ancienne pompe connue est la pompe à godets inventée en Chine. Les pompes Diesel et électriques, utilisées à nos jours, peuvent avoir des débits de pompage très élevés. Le principe de la pompe est apparu dès que l'homme a pu construire un habitat artificiel pour son confort. Le besoin en eau nécessaire à sa survie l'oblige à trouver un système de transport de cette eau, du puits ou de la rivière à son habitat. Il utilisa d'abord l'énergie développée par ses muscles pour transporter l'eau à l'aide de récipients naturels ou artificiels. Plus la contenance et la distance étaient grandes, plus l'énergie dépensée a été importante. Les principes des pompes à piston, des pompes centrifuges et des pompes à vide sont découverts à cette époque. De manière générale, durant la grande époque de la culture gréco-romaine, de nombreux principes de physique et d'hydraulique sont découverts, mais pas forcément développés [17].

Dans ce chapitre, nous avons pour objectif de faire une étude dans la première section présente quelques généralités sur les pompes, et la deuxième portera sur la description de la pompe 100-P2A, en fin nous avons présenté les principaux modes de défaillances qui manifestent dans la pompe.

III.2 GENERALITES SUR LES POMPES

III.2.1 Définition d'une pompe

On appelle pompe, (de l'italien 'pompa'), tout appareil qui permettant d'aspirer un fluide d'un milieu à basse pression pour le refouler vers un milieu à plus grande pression. Donc on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide liquide. La transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant la pompe se produit l'augmentation de la pression du fluide qu'elle véhiculé [17].

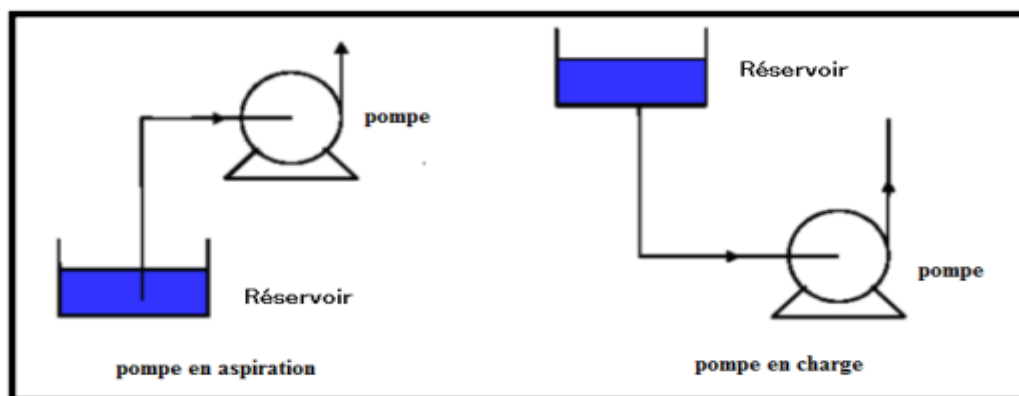


Figure III.1 : Montage d'une pompe en aspiration et en charge [17].

III.2.2 Classification des pompes

Généralement, les pompes se classent en deux grandes familles :

- Les pompes volumétriques.
- Les turbopompes (pompes centrifuges).

Le schéma au-dessous illustre les différents types des pompes :

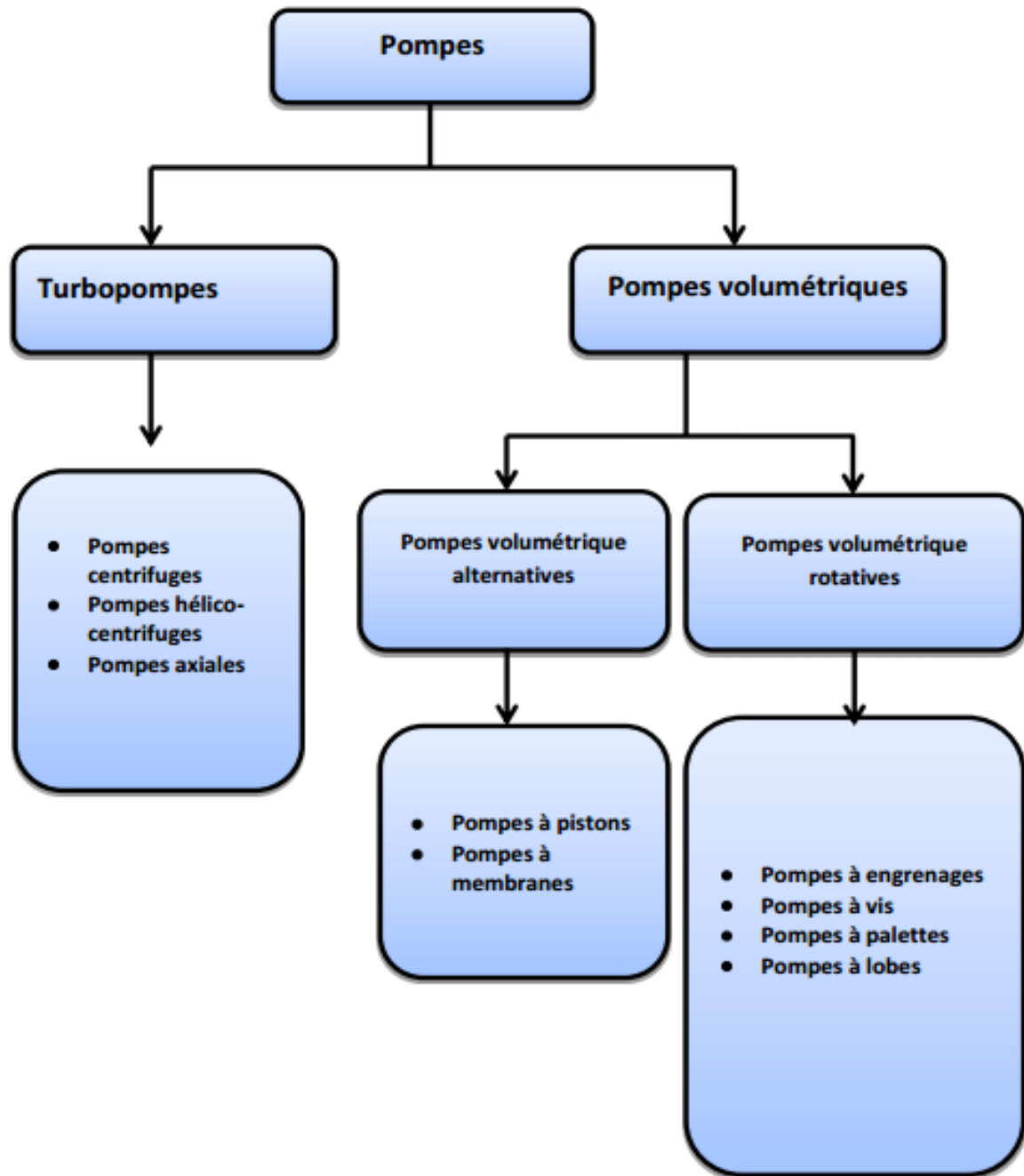


Figure III.2 : Classification des pompes [17].

III.2.2.1 Les pompes volumétriques

Une pompe volumétrique se constitue d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Leur fonctionnement fondé sur le principe suivant [18] :

- Exécution d'un mouvement cyclique pendant un cycle, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé.

Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement [18].

III.2.2.1.1 Les pompes volumétriques rotatives : Ces pompes sont composées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement [18].

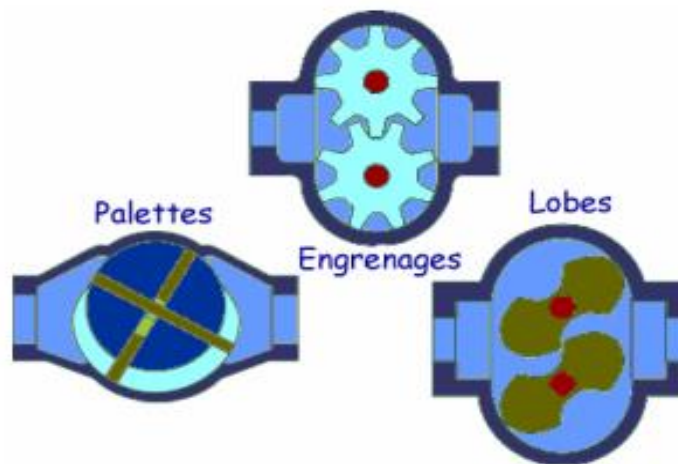


Figure III.3 : Fonctionnement des pompes volumétriques rotatives [19].

Les différents types de pompes volumétriques rotatives sont les suivants :

- **Pompes à engrenages :** Dans un corps de pompe de profil approprié et portant des orifices d'aspiration (Asp.) et de refoulement (Ref.) tournent deux engrenages dont les dents entraînent le liquide entre creux de dents et corps de pompe [19].

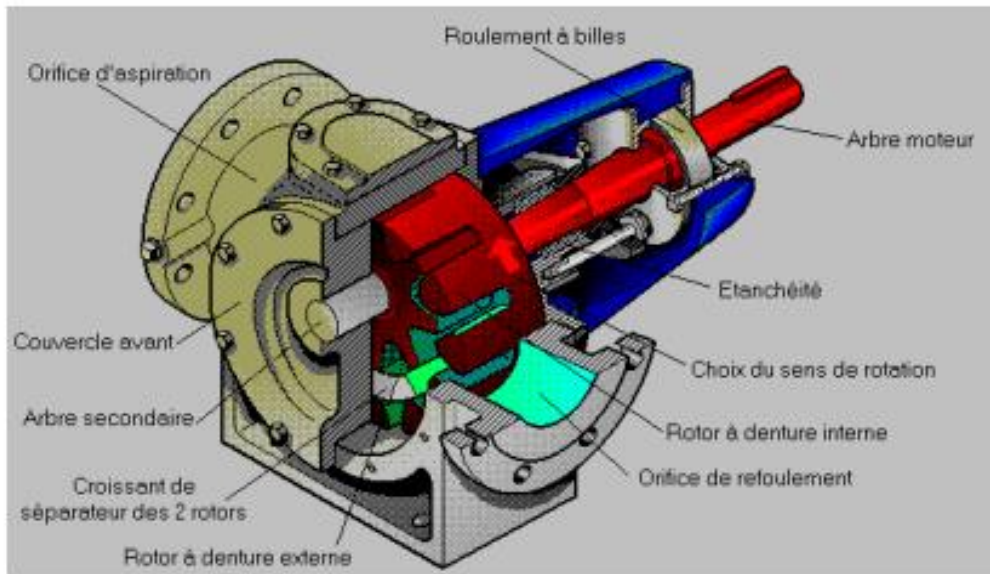


Figure III.4 : Vue écorchée d'une pompe à engrenages [19].

- **Pompes à vis** : Elles sont formées de deux ou trois vis suivant les modèles [18] :
 - Dans le cas d'une pompe à trois vis la centrale seule motrice, les deux autres sont entraînées par la première ;
 - Dans le cas d'une pompe à deux vis, celles-ci sont souvent toutes les deux entraînées par un jeu de pignons extérieurs.

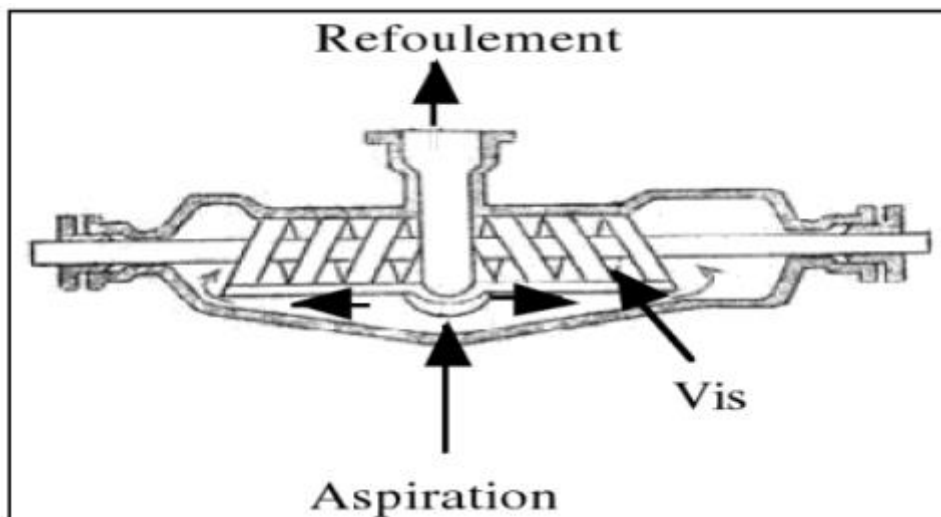


Figure III.5 : Pompes à vis [20]

- **Pompe à palettes** : Dans un corps de pompe circulaire ayant deux ouvertures (aspiration et refoulement) tourne un rotor dont le diamètre est tangentiel au corps de pompe et

situé au milieu des deux lumières. Ce rotor porte des palettes encastrées dans des rainures (nombre variable suivant type de pompe) sur lesquelles elles se déplacent pour piéger le produit à pomper [19].

Sous l'action combinée de la force centrifuge, de ressorts éventuels et de l'excentration rotor corps de pompe, les palettes frottent sur le corps de pompe provoquant des variations de volume qui engendrent l'aspiration et le refoulement [18].

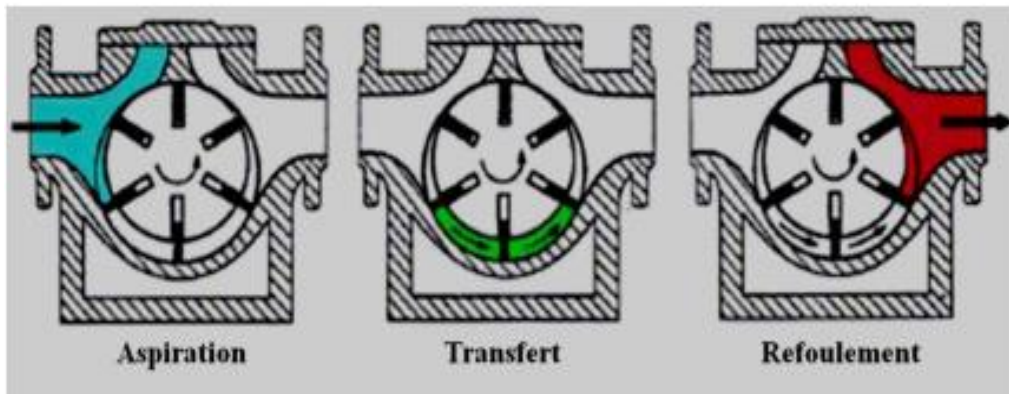


Figure III.6 : Pompe à palettes [20].

- **Pompe à lobes** : Le principe reste le même que celui d'une pompe à engrenages sauf que les dents ont une forme bien spécifique et qu'il n'y a que deux ou trois dents (lobes) par engrenage (figure III.7). Les rotors ne sont jamais en contact et, pour ce faire, sont entraînés par des engrenages externes. De ce fait, le pouvoir d'aspiration reste faible. Ce type de pompe se nettoie facilement, c'est pourquoi il est très utilisé dans l'industrie alimentaire. Le débit peut atteindre 400 m³/h pour les plus gros modèles, la pression au refoulement est de l'ordre de 12 bars et la viscosité quelques dizaines de milliers de [cSt][21].

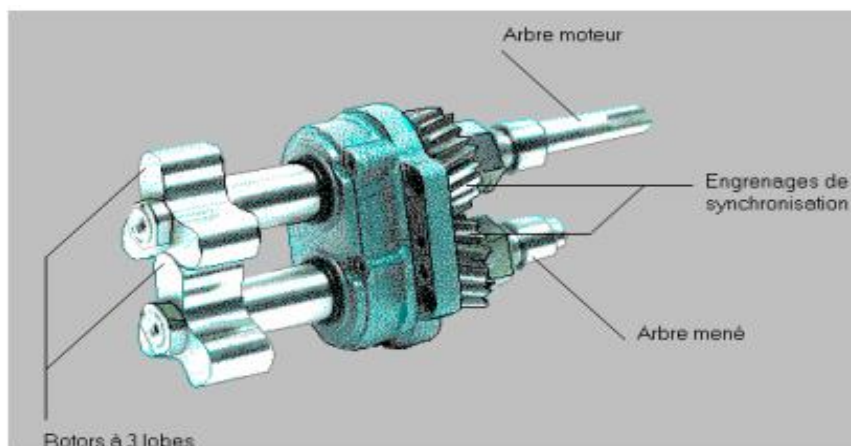


Figure III.7 : Vue intérieure d'une pompe à lobes [17].

III.2.2.1.2 Les pompes volumétriques alternatives : Ces pompes sont caractérisées par le fait que la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif. Les principaux types de ces pompes sont les suivants [17] :

- **Pompes à piston :** Le mouvement alternatif du piston fait varier le volume du corps de la pompe, le fluide progresse ainsi de l'aspiration vers le refoulement. Le principe de fonctionnement d'une pompe à piston nécessite la présence de deux clapets anti retour à l'aspiration et le refoulement [21].

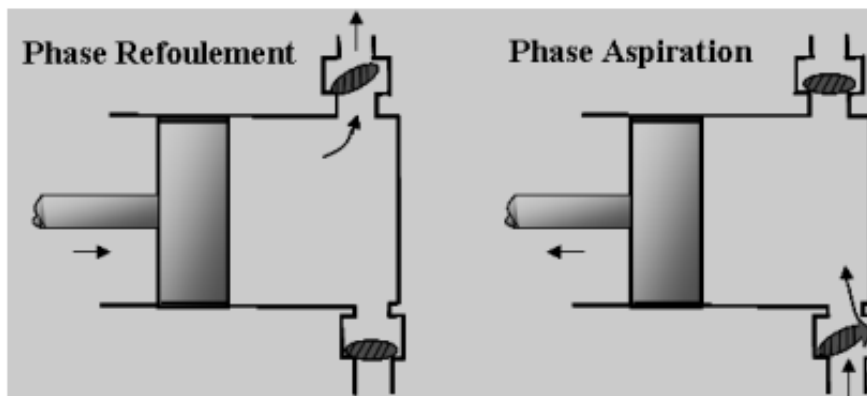


Figure III.8 : Principe pompe à piston [17].

- **Pompes à membranes :** Le déplacement du piston est remplacé par les déformations alternatives d'une membrane en matériau élastique (caoutchouc, élastomère, Néoprène, etc.). Ces déformations produisent les phases d'aspiration et de refoulement que l'on retrouve dans toute pompe alternative (figure III-9). Ces pompes sont utilisées sur les débits moyens de l'ordre de 80 m³/h, pour des températures inférieures à 150 °C et des viscosités faibles [18].

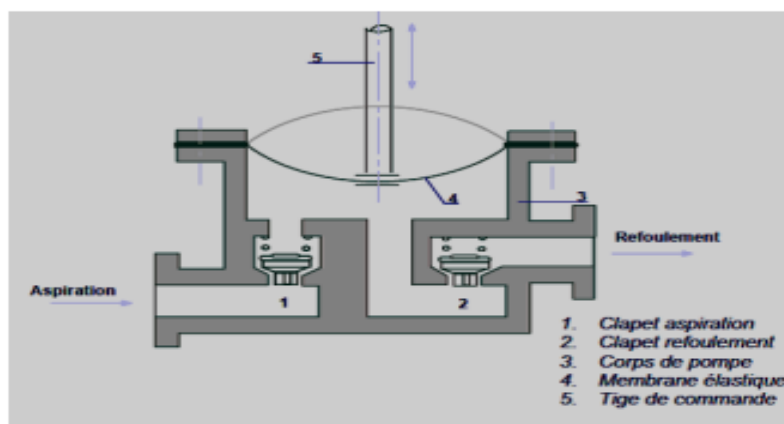


Figure III.9 : Pompe à membranes [17].

III.2.2.2 Les pompes centrifuges

III.2.2.2.1 Définition et domaine d'utilisation

Les pompes centrifuges (centrifugal pumps) transforment l'énergie cinétique fournie au liquide par une roue cloisonnée (rotor), en énergie de pression provoquant le déplacement du liquide [20].

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût. Leur utilisation est infiniment diversifiée, on ne s'intéresse donc ici qu'aux principales d'entre elles. Les grands domaines d'utilisations peuvent être cités comme suit [20] :

- Industrie hydrocarbure (production du pétrole) ;
- Transport des hydrocarbures liquides ;
- Industrie de traitement des hydrocarbures.

Néanmoins, il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas, comme par exemples [20] :

- Utilisation de liquides visqueux, la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles ;
- Utilisation de liquides "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tel que le lait) ;
- Utilisation comme pompe doseuse ; la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.

III.2.2.2.2 Principe de fonctionnement

Une pompe centrifuge dans sa forme la plus simple est constituée d'une roue munie d'ailettes radiales et tournantes à l'intérieur d'une enveloppe corps de pompe. Son principe de fonctionnement est d'utiliser la force centrifuge créée par la rotation de la roue pour transmettre au liquide pompé l'énergie. Le liquide à l'aspiration de la pompe se dirige vers le centre de l'impulseur (rotor) en rotation d'où il sera propulsé radicalement vers l'extérieur par la force centrifuge. Cette vitesse est ensuite convertie en pression au niveau de diffuseur [17]. On peut décomposer le fonctionnement en trois étapes :

- **ASPIRATION** : la pompe étant amorcée (c'est à dire pleine de liquide, cf. ci-après), la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente, et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue, engendrant ainsi une aspiration et le maintien de l'amorçage \mathcal{A} [22] ;
- **ACCELERATION** : la rotation augmente la vitesse du fluide tandis que la force centrifuge qui le comprime sur la périphérie augmente sa pression. Les aubes sont le plus souvent incurvées et inclinées vers l'arrière par rapport au sens de rotation, mais ce n'est pas une obligation. Dans un même corps de pompe on peut monter des roues différentes en fonction des caractéristiques du fluide [22] ;
- **REFOULEMENT** : dans l'élargissement en sortie, qui se comporte comme un divergent, le liquide perd de la vitesse au profit de l'accroissement de pression : l'énergie cinétique est convertie en énergie de pression [22].

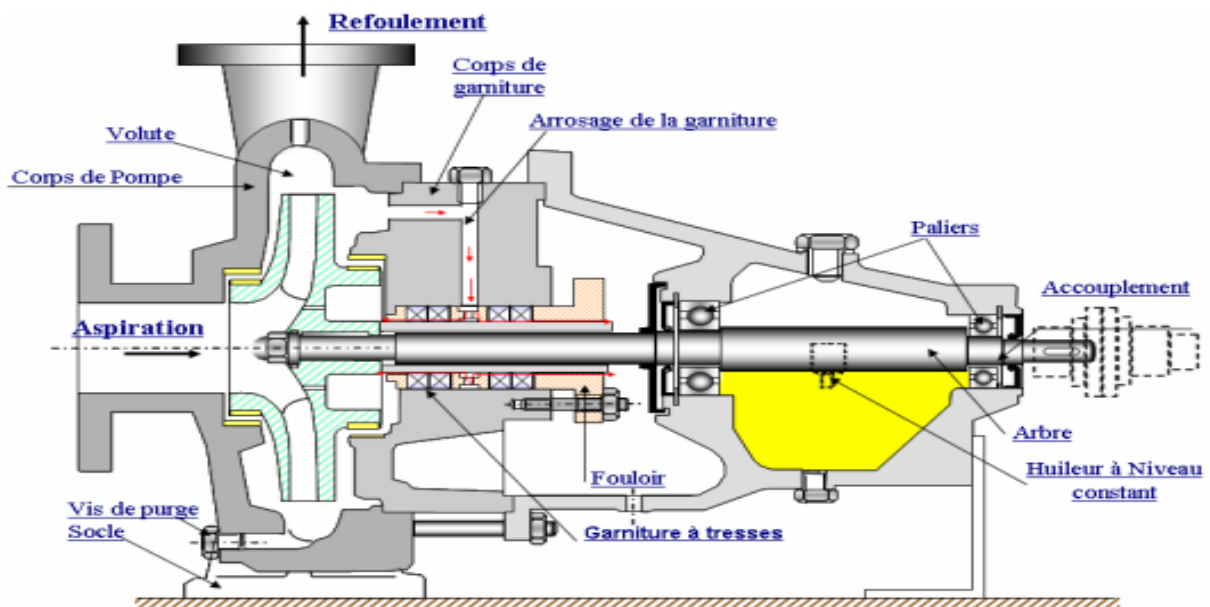


Figure III.10: Pompe centrifuge monocellulaire en porte à faux [19].

III.2.2.2.3 Classification des pompes centrifuges

Les pompes peuvent se classer selon les critères suivants [17] :

Selon le nombre d'étages [17]

- a) Multicellulaire : avec plusieurs roues sur l'arbre déposées en série ;
- b) Monocellulaire : avec une seule roue sur l'arbre.



Figure III.11 : Vue ouverte d'une pompe centrifuge multi-étage [17].

Selon la disposition de l'axe de la pompe [17]

- a) Pompe verticale ;
- b) Pompe horizontale.

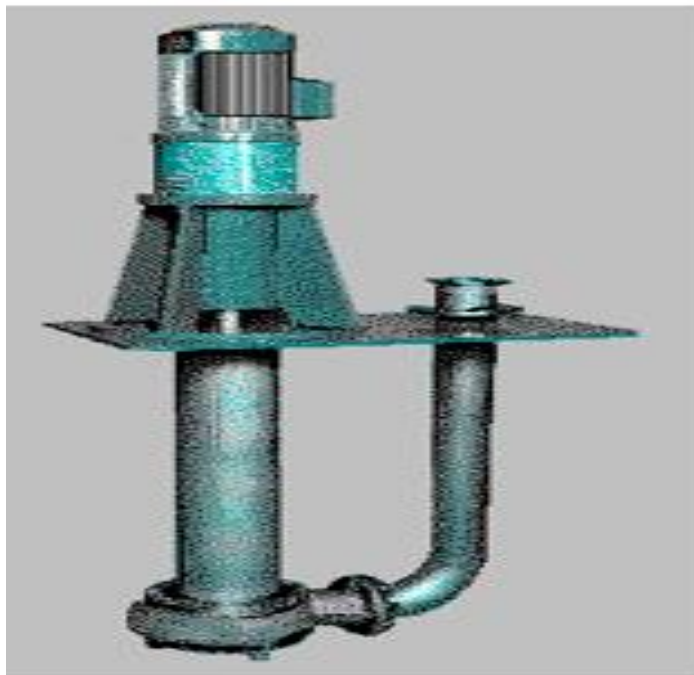


Figure III.12 : Vue extérieure d'une pompe verticale [18].

II.2.2.2.4 Description d'une pompe centrifuge

La figure ci-dessous représente les constituants d'une pompe centrifuge :

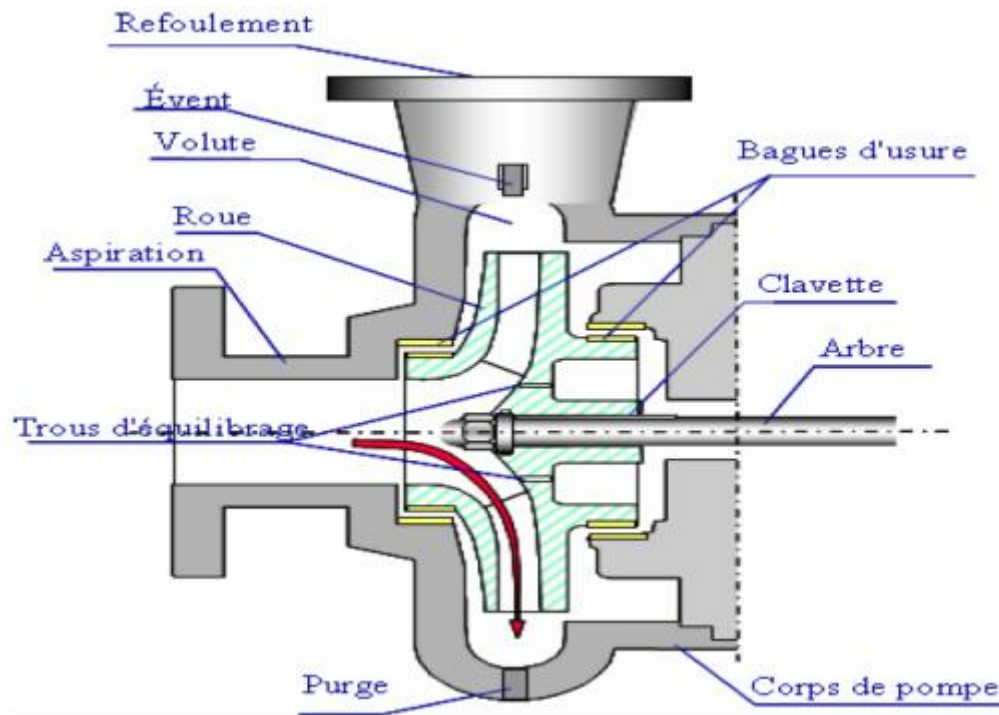


Figure III.13 : composants d'une pompe centrifuge [21]

Les pompes centrifuges comprennent les éléments suivants [21] :

- **Un conduit d'aspiration** du fluide vers la roue (impulseur) de la pompe ;
- **Une roue** : qui est l'élément essentiel de la pompe. La totalité de l'énergie est apportée au fluide sous deux formes distinctes :
 - D'une part, directement, sous la forme d'un accroissement de pression statique ;
 - D'autre part, sous la forme d'un accroissement d'énergie cinétique, qui est lui-même transformé en pression dans les organes situés en aval de la roue.
- **Une volute** : qui a le rôle de recueillir le fluide sortant à grande vitesse de la roue, de le canaliser, puis de le ralentir, transformant ainsi en pression une part importante de son énergie cinétique ;
- **Des dispositifs d'étanchéité internes** : sont destinés à limiter le retour vers l'aspiration et à réduire les débits de fuite internes ;
- **Un arbre** : a pour fonction de porter la roue, d'assurer son centrage dynamique et de transmettre la puissance ;

- **Un système d'étanchéité vers l'extérieur** : a pour fonction d'empêcher une fuite externe— ou tout au moins, d'en limiter l'importance. L'étanchéité externe peut aussi être assurée par une garniture mécanique ;
- **Bagues d'usure de l'impulseur** : Ces bagues sont fournies seulement si demandées, elles sont installées sur l'impulseur à chaud et sont bloquées par des grains ;
- **Carter des paliers** : Il est maintenant nécessaire d'avoir une pièce qui supporte l'arbre et empêche la roue de toucher dans sa rotation ;
- **Chemises de l'arbre** : la chemise est fixée sur l'arbre en interposant une garniture et est maintenue en position au moyen de l'impulseur est insérée dans un logement de chemise et l'empêche de tourner sur l'arbre.

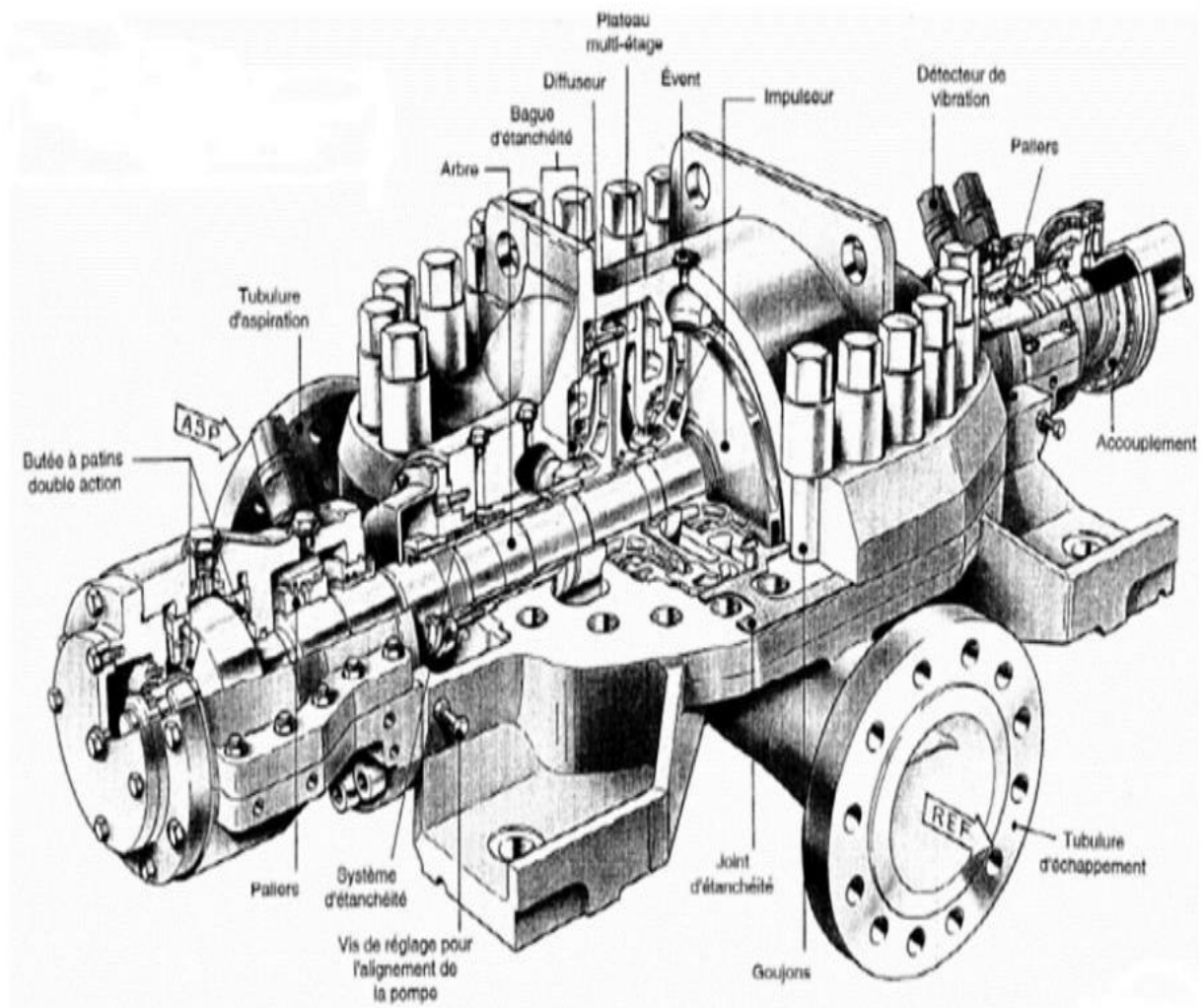


Figure : III.14 : Différents organes d'une pompe centrifuge [19].

III.3 Description de la pompe 100-P2A

III.3.1 Généralité

La **100-P2A** est une pompe centrifuge de type multicellulaire horizontale. Elle est stratégique pour le procès de traitement de naphta. C'est aussi une pompe qui a soulevé beaucoup d'interrogations depuis sa mise en service, ce qui justifie leur place importante dans l'unité 100, donc l'arrêt de **100-P2A** entraine l'arrêt de l'unité complète.



Figure III.15 : photo réelle de la pompe 100-P2A.



Figure III.16 : vue extérieure de la 100-P2A.

III.3.2 Le rôle de la 100-P2A

C'est une pompe de charge (naphta). Elle aspire du **NAPHTA** à partir des réservoirs de stockage 600-S-20/21 pour alimenter la section de prétraitement et elle le refoule vers le réacteur 100-R1 après le préchauffage dans les trains d'échange 100-E-1 A-D et le réchauffeur à combustion 100 F-1.

III.3.3 La situation géographique de la pompe

La pompe 100-P2A, existe au niveau de l'unité 100 (section de prétraitement), elles se situent au-dessous de réacteur 100-R-1. Elles existent deux grandes pompes centrifuges **A** et **B** entraînées par deux moteurs électriques asynchrones, placé horizontalement, quand **A** s'arrête, **B** fonctionne et ainsi de suite.

Le schéma au-dessous permettre de donner une vision bien précise sur le rôle et la situation géographique de la **100-P2A** dans l'unité 100.

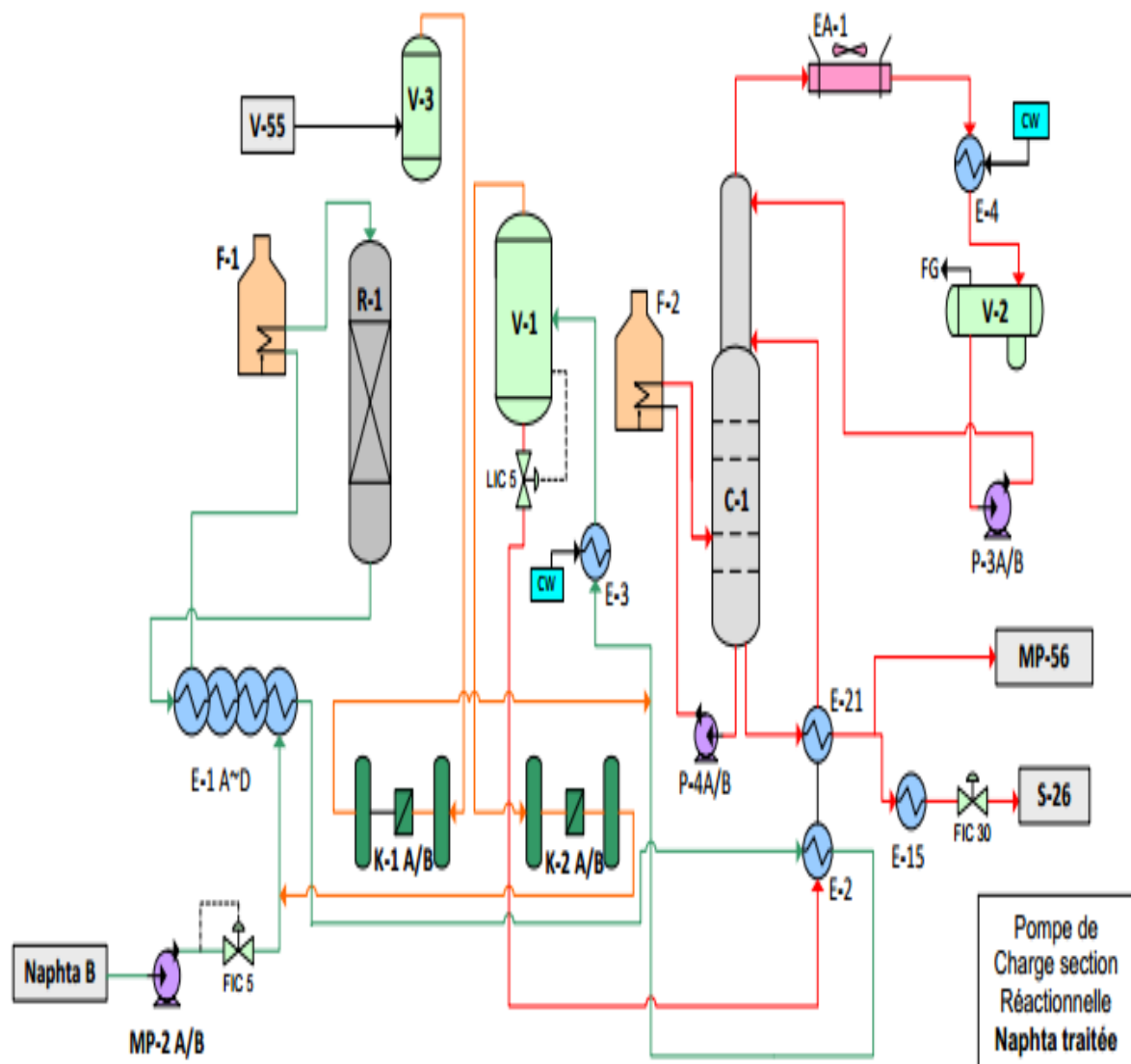


Figure III.17 : Section prétraitement [2].

III.3.4 Les caractéristiques de la pompe 100-P2A

- ✓ Marque : NUOVO PIGNONE ;
- ✓ N° de série : SOA-28267/3 ;
- ✓ Type : horizontale centrifuge (multicellulaire) ;
- ✓ Poids spécifiques : 0,703 [Kg/dm³] ;
- ✓ Température de pompage TP : 38 °C ;
- ✓ Vitesse : 2975 [giri/min] ;
- ✓ Puissance absorbée au débit contractuel : 386,5 cv ;
- ✓ Pression d'aspiration : 1 [ATA] ;
- ✓ Pression de refoulement : 36,2 [ATA] ;
- ✓ Hauteur d'élévation différentielle : 503 m ;
- ✓ Nombre d'étages : 08 ;
- ✓ Produit traité : Naphta ;
- ✓ Type de garniture : garniture mécanique ;
- ✓ Type d'accouplement : Entretoise rigide ;
- ✓ Type de roue : fermée.

III.3.5. Principaux modes de défaillances de la pompe

Les pompes centrifuges, étant l'un des types de pompe les plus utilisés au monde, leurs paramètres de fonctionnement, ainsi que leurs vulnérabilités sont bien connus [20].

En général, les pannes de la pompe entraînent des modifications de fonctionnement qui réduisent l'efficacité de la pompe [20].

Les modes de défaillance des pompes centrifuges peuvent être regroupés en trois catégories [20] :

III.3.5.1. Modes de défaillance hydraulique

- Cavitation : est un événement indésirable. Dans les pompes centrifuges, la cavitation provoque des dommages aux composants (érosion du matériau, des vibrations, du bruit et une perte de rendement [20] ;

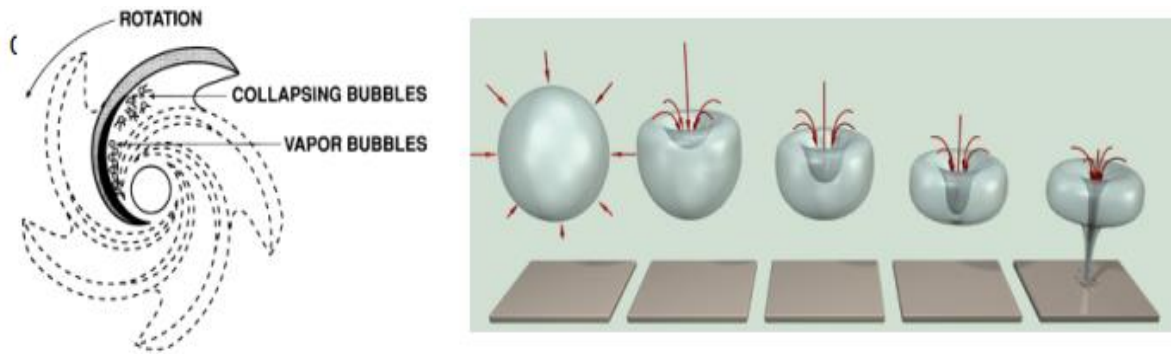


Figure III.18 : phénomène de cavitation [21].



Figure III.19 : Érosion par cavitation d'une roue de pompe centrifuge [17].

- Pulsations de pressions : sont des fluctuations de la pression de base. Pour la pompe à haute pression, les pulsations de pression d'aspiration et de refoulement peuvent provoquer une instabilité des commandes de la pompe, des vibrations des tuyaux d'aspiration et de refoulement et des niveaux de bruit de pompe élevés [20] ;
- Recirculation de la pompe : une pompe fonctionnant à une capacité inférieure aux limites de conception peut être affectée par la recirculation interne des pompes peut provoquer des surtensions [20] ;
- Poussée radiale et axiale : une poussée radiale élevée entraînant des déformations excessives de l'arbre peut entraîner des problèmes persistants de garniture ou de garniture mécanique, voire une défaillance de l'arbre. La poussée axiale est imposée le

long de l'axe de l'arbre. Une poussée axiale élevée peut imposer une charge excessive au roulement [20].

III.3.5.2. Modes de défaillance mécanique [20]

- Rupture de l'arbre ;
- Défaillance des roulements ;
- Echec du joint ;
- Vibrations.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons concentrées nos efforts sur la compréhension de tous les points fondamentaux concernant une pompes, et en particulier la **100-P2A**. Ils se résument comme suit :

- Généralités sur les pompes (définitions, types, classification...) ;
- Description d'une pompe centrifuge multicellulaire horizontale (100-P2A cas particulier) ;
- Principaux modes de défaillances de la pompe.

En pratique (dans le chapitre suivant), on va focaliser notre travail sur l'étude FMDS (fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité) de la pompe **100-P2A**. Pour le calcul de la partie (FMD) en va utiliser des outils de calcul informatiques, ensuite on va terminer l'étude par l'application d'une méthode d'analyse des risques tel que la méthode analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) en se basant sur le diagramme d'Ishikawa.

**Chapitre IV : Analyse de la sûreté de fonctionnement
de la pompe 100-P2A**

IV.1. Introduction

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial, énergie etc.). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus "grand public" : Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques....

De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.

L'analyse de la fiabilité dans le domaine industriel est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission.

Pour trouver la distribution la plus adaptée avec les données historiques pour calculer la fiabilité, un logiciel de calcul statistique (Minitab) propose jusqu'à quatre diagrammes de probabilités différents (dont les distributions sont sélectionnées parmi la loi de Weibull, la loi de valeur extrême, la loi exponentielle, la loi normale, la loi de la base log-normale e, la loi de la base lognormale10, la loi logistique et la loi log-logistique) pour nous aider à déterminer laquelle de ces distributions s'ajuste le mieux à notre données. Cela se fait généralement en comparant la proximité entre points du diagramme et lignes de meilleur ajustement, en particulier les points en fin de distribution. Dans ce chapitre et à partir de l'historique des pannes de la pompe 100-P2A étudiée nous avons réalisé une analyse de fiabilité, maintenabilité et disponibilité pour cet équipement à l'aide des outils statistiques tel que : Minitab...

IV.2. Historique des pannes de la pompe 100-P2A

TBF : Temps de bon fonctionnement ;

TTR : Temps de réparation.

Le tableau suivant résume l'historique des pannes de la pompe 100-P2A :

Tableau IV.1 : Historique de la 100-P2A.

Dates	TBF (Heures)	TTR (Heures)
22.01.2018/14.06.2018	3456	21
14.06.2018/14.08.2018	1464	404
14.08.2018/04.03.2019	4872	21
04.03.2019/05.04.2019	768	12
05.04.2019/11.12.2019	6000	35
11.12.2019/05.01.2020	600	28
05.01.2020/04.05.2020	2280	8
04.05.2020/09.09.2020	3072	234
09.09.2020/29.06.2021	7056	9

IV.3. Détermination de la distribution la plus adaptée avec les données

Minitab propose également deux tests d'adéquation de l'ajustement, à savoir le test d'Anderson-Darling pour le maximum de vraisemblance, et le coefficient de corrélation de Pearson pour la méthode d'estimation des moindres carrés, pour nous aider à évaluer comment la distribution s'ajuste aux données. Nous avons opté pour les deux tests. Notre étude est basée sur un historique des données à partir de l'année 2018 jusqu'à 2021 de la pompe 100-P2A, comme indiquez dans le (Tab IV.1).

Pour le test d'Anderson-Darling la plus petite valeur du test exprime la meilleure distribution.

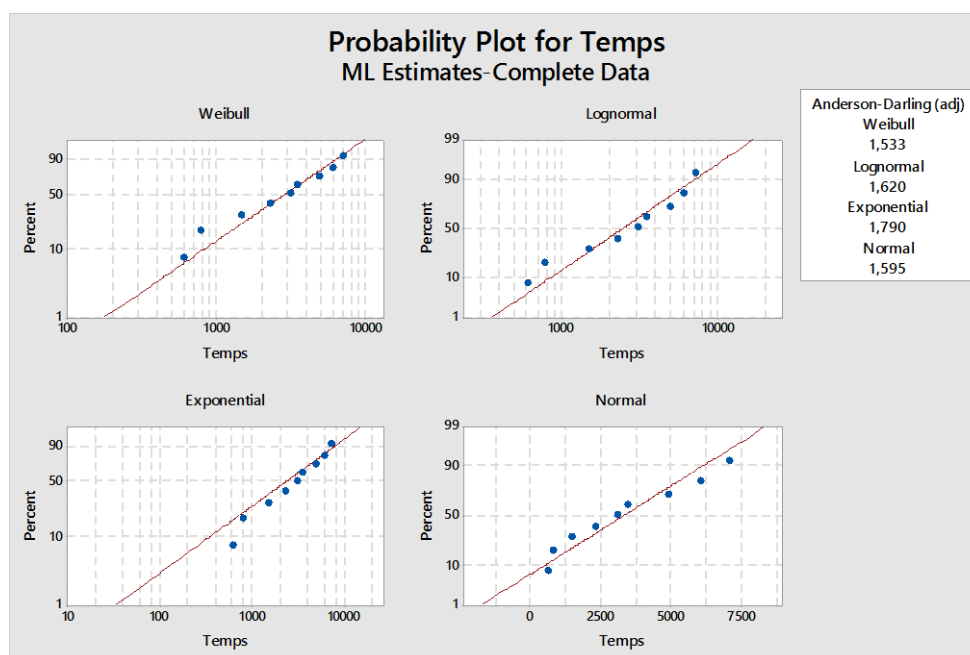


Figure IV.1 : Test d'Anderson-Darling.

Et pour le test de Pearson (coefficient de corrélation) la plus grande valeur du test exprime la meilleure distribution.

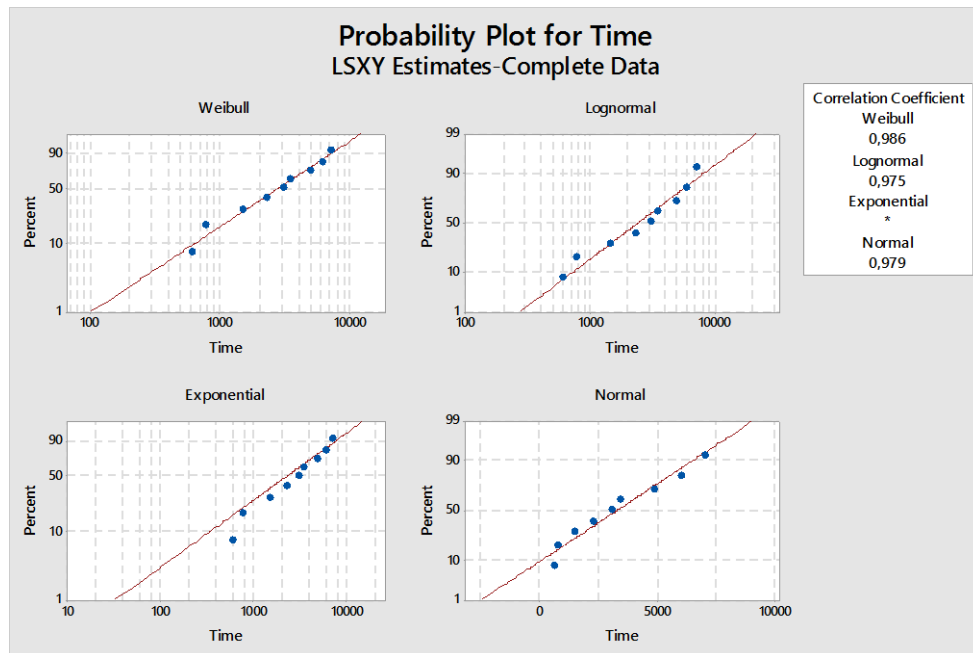


Figure IV.2 : Test de Pearson.

On remarque que la plus petite valeur du test d'Anderson-Darling c'est (1,533) exprime la distribution de Weibull, et la plus grande valeur du test de Pearson c'est (0,986) exprime aussi la distribution de Weibull. Donc nous avons accepté la loi de Weibull.

✓ Calcul des paramètres de Weibull

Ce calcul est fait par le logiciel Minitab pour avoir une certaine conformité qui nous aide à donner le meilleur jugement par la suite.

Le logiciel donne les résultats suivants :

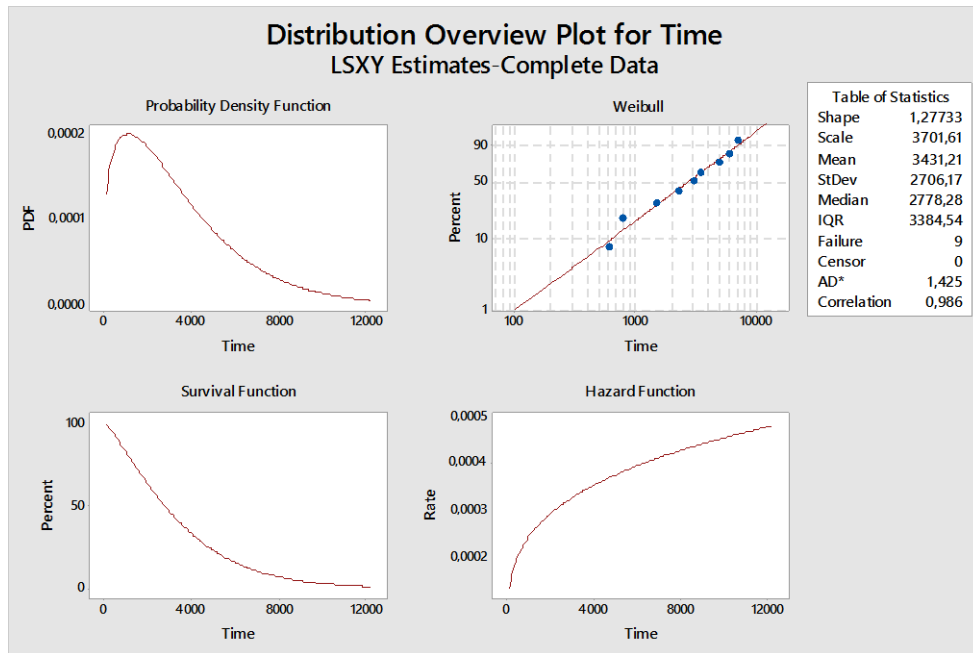


Figure IV.3 : Paramètres de la loi de Weibull.

Tab IV.2: : Paramètres de la loi de Weibull : β , η , γ , MTBF, σ

Paramètre	β	η	Γ	MTBF	σ
Valeur	1.27733	3701.61	0	3431,21	2706,17

☞ Pour le paramètre de position nous prenons : $\gamma = 0$ (Ce qui signifie que les défaillances commencent déjà à se présenter au début de l'axe des temps).

IV.4. Détermination des fonctions de probabilité en fonction de MTBF par Weibull

On a d'après la loi de Weibull :

La fonction de répartition (défaillance) :

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

La fonction de fiabilité :

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

La fonction de taux de défaillance :

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

La fonction de densité de probabilité :

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

✓ **Remarque**

- $F(t) = 1 - R(t)$
- $f(t) = R(t) * \lambda(t)$

a) Calcule de R (MTBF)

$$R(\text{MTBF}) = R(3431.21) = e^{-\left(\frac{\text{MTBF}}{\eta} \right)^\beta} = 0.403469544 = 40.43\%$$

On a : 40.43 % pour que notre pompe **100-P2A** ne tombe pas en panne a $t = 3431.21$ H (insuffisante pour accomplir la fonction requise).

b) Calcul de F (MTBF)

$$F(\text{MTBF}) = F(3431.21) = 1 - e^{-\left(\frac{\text{MTBF}}{\eta} \right)^\beta} = 0.59650456 = 59.65\%.$$

Dans ce cas on à 59.65 % de chance pour que la pompe **100-P2A** tombe en panne a $t = 3431.21$ h.

c) Calcul de λ (MTBF)

$$\lambda(\text{MTBF}) = \frac{f(\text{MTBF})}{R(\text{MTBF})} = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{\text{MTBF} - \gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} = 0.000337.$$

La pompe enregistre 0.00033 pannes par heure.

d) Calcul de f (MTBF)

$$f(\text{MTBF}) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{\text{MTBF} - \gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \cdot e^{-\left[\frac{\text{MTBF} - \gamma}{\eta} \right]^\beta} = 0.000136 = 0.013\%$$

e) Calcul du temps souhaitable pour une intervention systématique

On suppose un seuil de 90 % comme une fiabilité souhaitable :

$$R(t) = 90\% \rightarrow t = ?$$

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

$$\ln R(t) = -\left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta = \ln(0.9) \Leftrightarrow \ln R(t)^{\frac{1}{\beta}} = \frac{t}{\eta} \Leftrightarrow t = \eta \ln[1/R(t)]^{\frac{1}{\beta}}$$

$$t = 635.71 \text{ h}$$

Chapitre IV : Analyse de la sûreté de fonctionnement de la pompe 100-P2A

Pour une fiabilité de 90 % de la pompe il faut faire une intervention systématique chaque 635.71 heures.

IV.5. Calcul des fonctions de probabilité à chaque instant (t)

Les résultats de calcul sont portés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3: Étude du modèle de Weibull.

<i>TBF</i>	<i>R(TBF)</i>	<i>F(TBF)</i>	<i>f(TBF)</i>	<i>λ(TBF)</i>
600	0,906776	0,093224	0,00018891	0,000208332
768	0,87447	0,12553	0,000195089	0,000223094
1464	0,736538	0,263462	0,000196523	0,00026682
2280	0,583628	0,416372	0,000176069	0,000301681
3072	0,454712	0,545288	0,000149002	0,000327685
3456	0,4001	0,5999	0,00013546	0,000338565
4872	0,24162	0,75838	8,99776E-05	0,000372393
6000	0,156727	0,843273	6,18214E-05	0,000394453
7056	0,10232	0,89768	4,22252E-05	0,000412678

IV.6. Représentations graphiques des fonctions

IV.6.1. La fonction de répartition $F(t)$

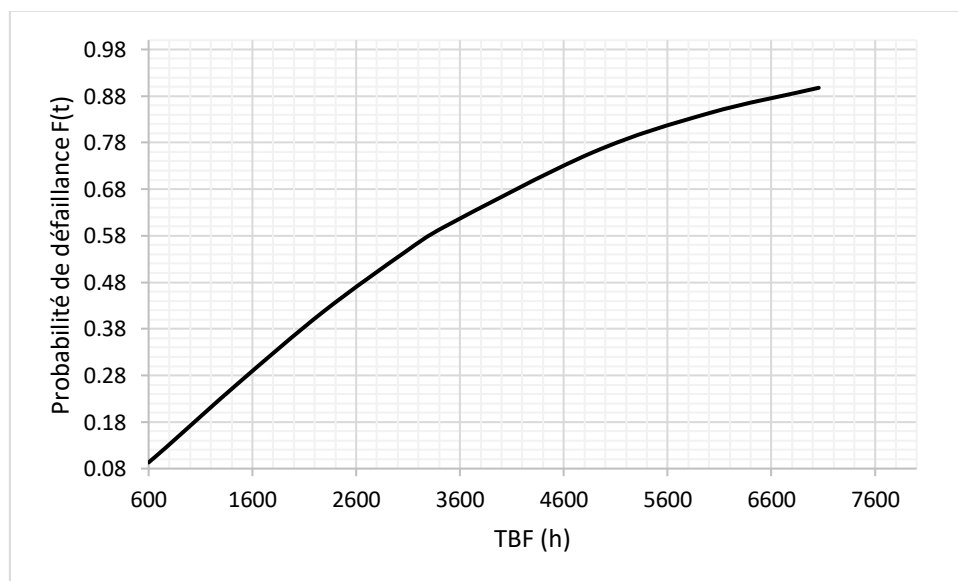


Figure IV.4 : Courbe de la fonction de répartition.

➤ Interprétation

La courbe est croissante ce qui signifie que la pompe 100-P2A subit de plus en plus des problèmes. Ce phénomène montre que la pompe 100-P2A subit plusieurs défaillances pendant le cycle de fonctionnement ce qui est mauvais pour la fiabilité de cet équipement.

IV.6.2. La fonction de taux de défaillance $\lambda(t)$

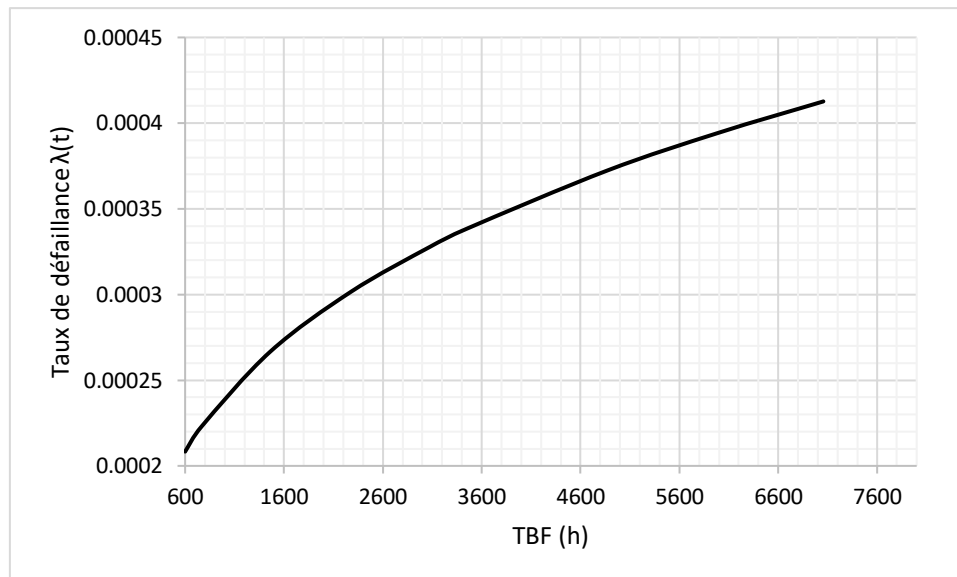


Figure IV.5 : Courbe de taux de défaillance $\lambda(t)$.

➤ Interprétation

Une augmentation progressive du taux de défaillance est remarquable, cette augmentation définit la période de vieillissement qui recouvre la majeure partie de la vie du dispositif. Elle caractérise la dernière partie de la courbe de taux de défaillance des composants mécaniques. Les pièces mécaniques sont soumises à des phénomènes de vieillissement multiples qui peuvent agir en combinaison : corrosion, usure, fluage, fatigue, et finalement rupture. Dans notre cas le paramètre de forme ($\beta > 1$) représente la période de vieillissement (exactement le phénomène de fatigue). La fatigue consiste dans la dégradation ou la modification des propriétés mécaniques des matériaux, suite à l'application répétée d'un chargement cyclique ou d'une vibration, conduisant à une perte de résilience ou fragilisation, et en conséquence une rupture. La fatigue est la plus importante source de défaillance pour les composants mécaniques comme, par exemple, les engrenages, les roulements à billes...

IV.6.3. La fonction de fiabilité $R(t)$

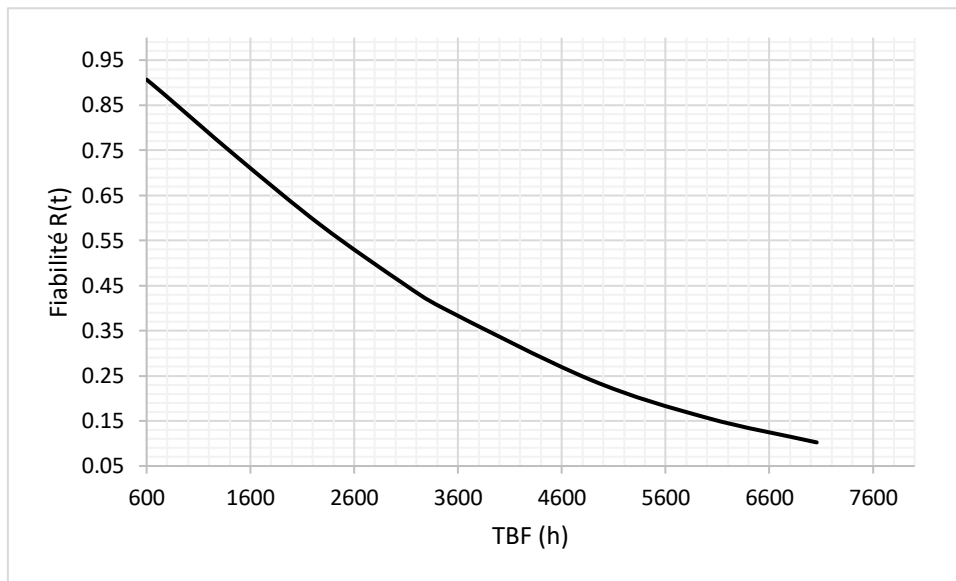


Figure IV.6 : Courbe de fiabilité $R(t)$.

➤ Interprétation

Cette courbe représente que la fiabilité de la pompe 100-P2A est diminuée avec le temps. Plus un équipement est vieux, plus la probabilité de sa fiabilité diminue. En contrepartie, plus l'équipement est récent, plus sa probabilité de sa fiabilité est grande. On dit aussi que c'est la probabilité de survie est une fonction décroître dans le temps.

IV.6.4. La fonction de densité de probabilité $f(t)$

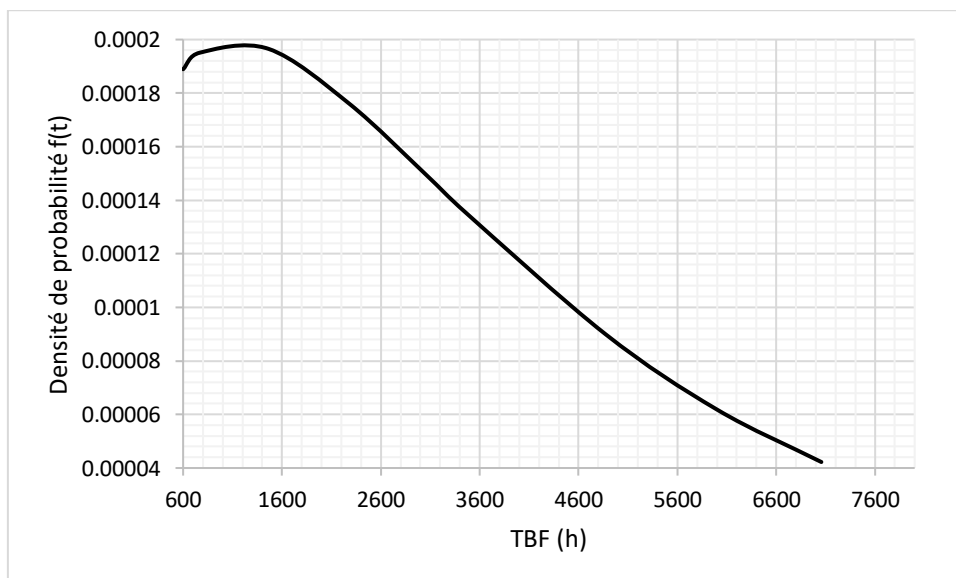


Figure IV.7 : Courbe de la fonction de densité de probabilité $f(t)$.

➤ Interprétation

L'allure de la courbe croît rapidement puis elle descend. Cela s'explique par la variation des deux paramètres λ et $R(t)$. Pendant la phase de croissance, on a une augmentation appréciable de λ instantané avec le temps, (car les pannes sont dues à la fatigue croissante du matériel) plus importante que la diminution de $R(t)$. Alors que c'est le contraire qui se produit pendant la deuxième phase. Donc la probabilité de défaillance pendant l'unité de temps prochaine augmente ensuite diminue.

La courbe ne signifie pas que le matériel ayant dépassé la MTBF aura moins de "chance" de tomber en panne, Au contraire, sur la courbe de répartition (ci-dessus), on constate bien que si t augmente, le risque d'une défaillance augmente aussi.

IV.7. Analyse de la maintenabilité $M(t)$

IV.7.1 Calcul de maintenabilité en fonction de MTTR

La fonction de la maintenabilité est donnée par : $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$

$$\text{On a } MTTR = \frac{\sum TTR}{N}$$

TTR : temps de réparation.

N : nombre de panne = 9

$$MTTR = \frac{772}{9} = 85.777 \text{ H}$$

$$\mu \text{ (Taux de réparation)} = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{85.777} = 0.01165$$

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

$$M(MTTR) = 1 - e^{-0,01165 \cdot 85,777}$$

$$M(MTTR) = 0,63$$

Donc la maintenabilité de cet équipement est 63% (On peut dire que l'équipement est maintenable).

Chapitre IV : Analyse de la sûreté de fonctionnement de la pompe 100-P2A

On a pris les valeurs TTR présenté dans le tableau précédente (Tab IV.1) et par l'application de l'équation (IV.), on a calculé la maintenabilité. Comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 : Résultat de la fonction $M(t)$.

N	TTR (Heure)	M(t)
1	8	0.08898
2	9	0.09954
3	12	0.13046
4	21	0.21702
5	21	0.21702
6	28	0.27833
7	35	0.33485
8	234	0.93452
9	404	0.99096

IV.7.2. Représentations graphiques de la maintenabilité $M(t)$

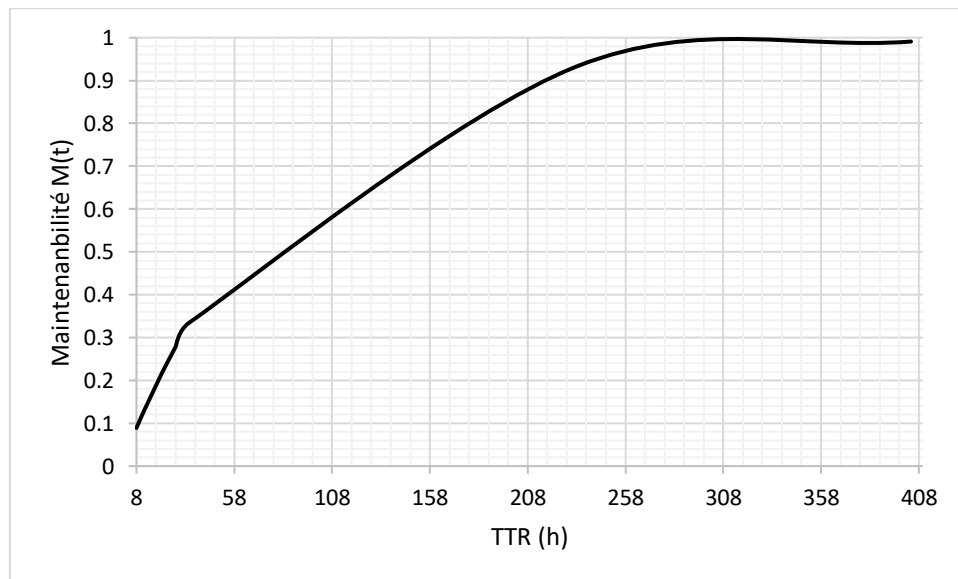


Figure IV.8 : Courbe de maintenabilité $M(t)$.

➤ Interprétation

On remarque que la courbe $M(t)$ croît rapidement avec la variation de TTR, en suite elle se stabiliser à une valeur proche à (99%), ce qui signifie que la pompe 100-P2A possède une meilleure maintenabilité.

IV.8. Analyse de la disponibilité $A(t)$

- **Disponibilité intrinsèque**

MTBF = 3431.21 H

MTTR = 85.777 H

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{3431.21}{3431.21 + 85.777} = 0.97561$$

$D_i = 97.561\%$

- **Disponibilité instantané $D(t)$**

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

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{3431.21} = 0.000291$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{85.777} = 0.01165$$

$$\lambda + \mu = 0.000291 + 0.01165 = 0.011941$$

$$D(t) = \frac{0.01165}{0.011941} + \frac{0.000291}{0.011941} e^{-(0.011941) \cdot TTR}$$

$$D(t) = 0.975630 + 0.024369 e^{-(0.011941) \cdot TTR}$$

Les résultats de calcul de la disponibilité instantanée sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau IV.5 : Disponibilité instantanée.

N	TBF (Heure)	D(t)
1	600	0.975648
2	768	0.975632
3	1464	0.97563
4	2280	0.97563
5	3072	0.97563
6	3456	0.97563
7	4872	0.97563

8	6000	0.97563
9	7056	0.97563

IV.8.1. Représentations graphiques de la disponibilité $A(t)$

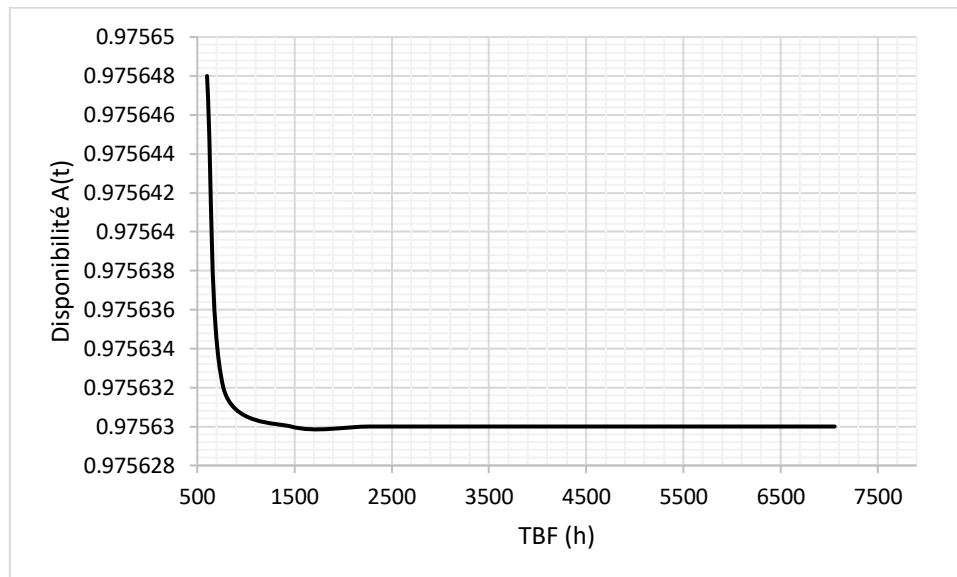


Figure IV.9 : Courbe de la fonction de disponibilité $A(t)$.

➤ Interprétation

La courbe représentative de la disponibilité en fonction du temps de bon fonctionnement (figure ci-dessus) décroît rapidement puis elle a tendance de se stabilisée (devenir constante). Ceci est rencontré lorsqu'un système est réparé de manière continue, soit par une maintenance corrective ou par un programme de maintenance préventive. L'effet de stabilité est le résultat d'une action de maintenance pertinente qui stabilise le système. Lorsqu'on étudie la fiabilité, on s'intéresse non uniquement à la probabilité de panne, mais aussi au nombre de pannes et en particulier au temps requis pour faire les réparations.

IV.9 Analyse de la sécurité

L'objectif de cette partie est l'établissement d'une étude pour analyser et identifier les risques de dysfonctionnement de notre système (100-P2A). A cet effet, nous sommes basés sur analyse des causes à l'aide de diagramme Ishikawa, et on a entrepris une étude AMDEC dans ce qui suit. Les résultats de cette analyse nous aiderons par la suite de mettre des solutions pour limiter ou éliminer ce problème (assurer le fonctionnement de la 100-P2A en état sécurisé).

IV.9.1 Analyse des causes (ISHIKAWA)

IV.9.1.1. Définition de la méthode

Chapitre IV : Analyse de la sûreté de fonctionnement de la pompe 100-P2A

Le Diagramme cause-effet également appelé Diagramme d'Ishikawa ou règle des 5 M se présente sous la forme d'une arborescence visualisant le problème d'un côté, et ses causes potentielles, de l'autre. Les causes sont les facteurs susceptibles d'influer sur le problème. Ces causes sont regroupées classiquement par familles, autour des 5 M. Pour cela il faut [23] :

- Lister à l'aide de la méthode de « brainstorming » par exemple, toutes les causes susceptibles de concerner le problème considéré ;
- Il faut bien approfondir et explorer toutes les dimensions d'une situation donnée ;
- Classer par famille toutes les causes d'un problème déterminé (3 à 5 familles est un choix raisonnable) [23].

IV.9.1.2. Application de la méthode

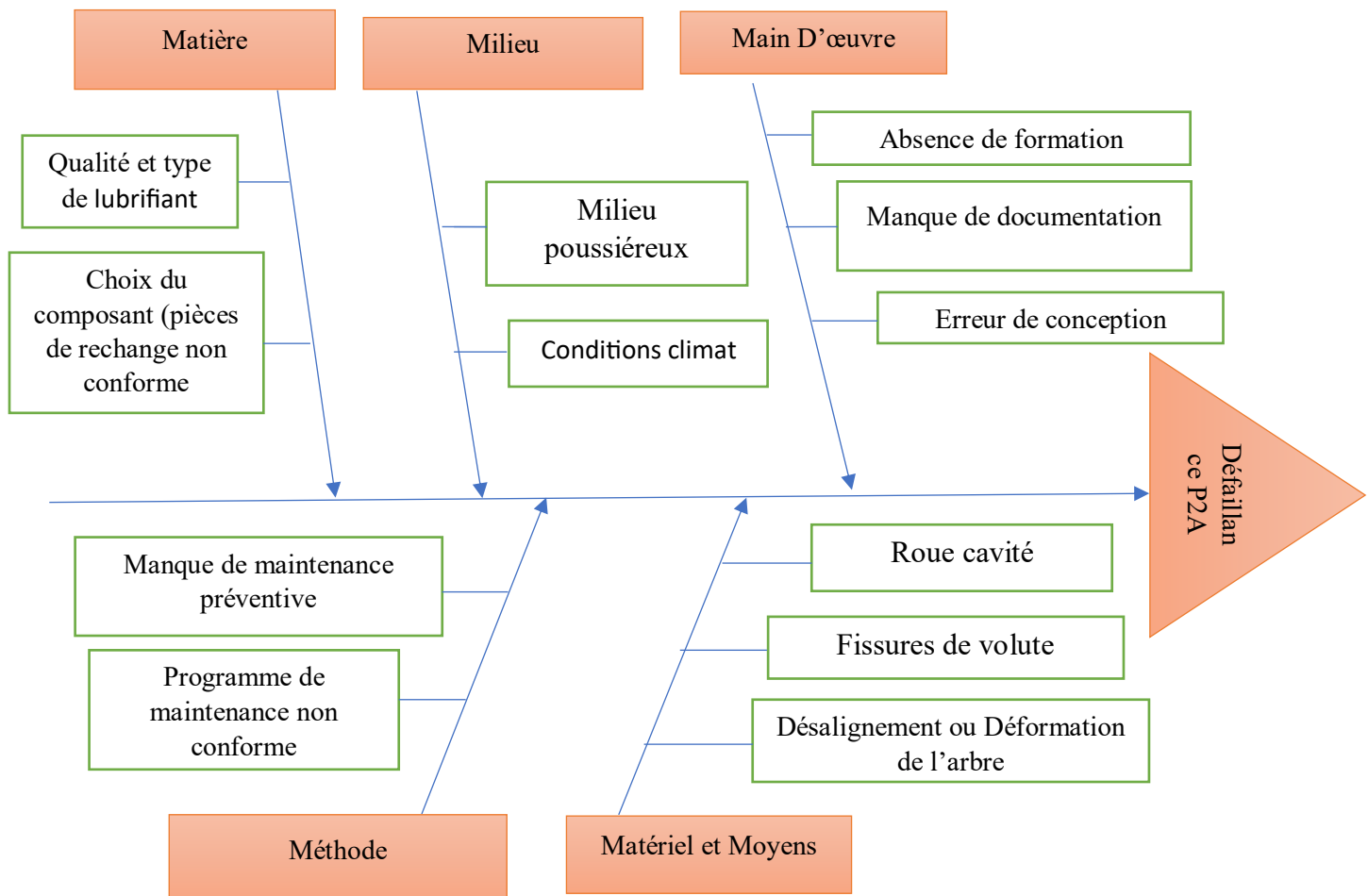


Figure IV.10 : Diagramme d'Ishikawa.

Chapitre IV : Analyse de la sûreté de fonctionnement de la pompe 100-P2A

Le diagramme Ishikawa nous a permis de recenser les causes des défaillances susceptibles de diminuer le bon fonctionnement de la pompe 100-P2A, mais cette méthode ne servira tout de même que pour justifier la présence de sources diverses de déclenchement de la pompe et par conséquent le besoin d'une étude de maintenance préventive basée sur l'amélioration de la fiabilité. Rappelons qu'à ce niveau d'analyse, les causes ne sont pas toutes explicitées, d'autant plus qu'aucune réflexion sur leur niveau de criticité n'est claire d'où le besoin de conduire une étude AMDEC.

IV.9.2. Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC)

IV.9.2.1. Définition de la méthode

L'AMDEC : est une Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité. C'est une technique d'analyse qui part de l'examen des causes possibles de défaillance des éléments d'un système pour aboutir aux effets de ce système. Cette méthode peut s'appliquer à un produit, mais aussi à un procédé ou à un moyen de production [24].

La démarche de l'AMDEC se décompose en 4 étapes suivantes : Analyse des mécanismes de défaillances Evaluation de la criticité à travers [24] :

- La probabilité d'occurrence F ;
- La gravité des conséquences G ;
- La probabilité de non détection D.

La formule de calcul de criticité est : **Criticité=Fréquence*Gravité*Détectabilité.**

Tableau IV.6: Grille de cotation de la fréquence [24].

Niveau de fréquence : F	Indice	Définition des niveaux
Fréquence très faible	1	Défaillance rare : Moins d'une défaillance par an
Fréquence faible	2	Défaillance faible : Moins d'une défaillance par semestre.
Fréquence moyenne	3	Défaillance possible : Moins d'une défaillance par Trimestre
Fréquence fort	4	Défaillance fréquente : moins d'une défaillance par Semaine

Chapitre IV : Analyse de la sûreté de fonctionnement de la pompe 100-P2A

Fréquence très fort	5	Défaillance très fréquente : plusieurs défaillances par Semaine
---------------------	---	---

Tableau IV.7: Grille de cotation de la gravité [24].

Niveau de gravité : G	Indice	Définition des niveaux
Gravité mineure	1	Défaillance mineure : -arrêt de production inférieur à 2 mn, -aucune dégradation notable du matériel.
Gravité significative	2	Défaillance significative : -arrêt de production de 2 à 20 mn, -remise d'état de courte durée ou une petite réparation sur place nécessaire.
Gravité moyenne	3	Défaillance moyenne : -arrêt de production de 20 mn à 1 heure, -changement du matériel défectueux nécessaire.
Gravité majeure	4	Défaillance majeure : -arrêt de production de 1 à 2 heures, -intervention importante sur sous ensemble, -production de pièces non conformes non détectées.
Gravité Catastrophique	5	Défaillance catastrophique : -arrêt de production supérieur à 2 heures, -intervention nécessitent des moyens coûteux.

Tableau IV.8: Grille de cotation de la probabilité de non détection [24].

Niveau de détection : D	Indice	Définition des niveaux
Détection évidente	1	Détection efficace permettant une action préventive
Détection possible	2	Système présentant des risques de non-détection dans certains cas

Détection improbable	3	Système de détection peu fiable
Détection impossible	4	Aucune détection

Tableau IV.9: Tableau de la criticité [24].

Valeur de la criticité	Politique de la maintenance
$C < 16$	Mise sous correctif.
$16 \leq C < 32$	Mise sous préventif à la fréquence faible.
$32 \leq C < 36$	Mise sous préventif à la fréquence élevée.
$36 \leq C < 48$	Recherche d'amélioration.
$48 \leq C < 64$.	Reprendre la conception

IV.9.2.2. Application de la méthode

- **Analyse du système**

Dans un premier lieu on a décomposé fonctionnellement le système (**Figure : IV.11**)

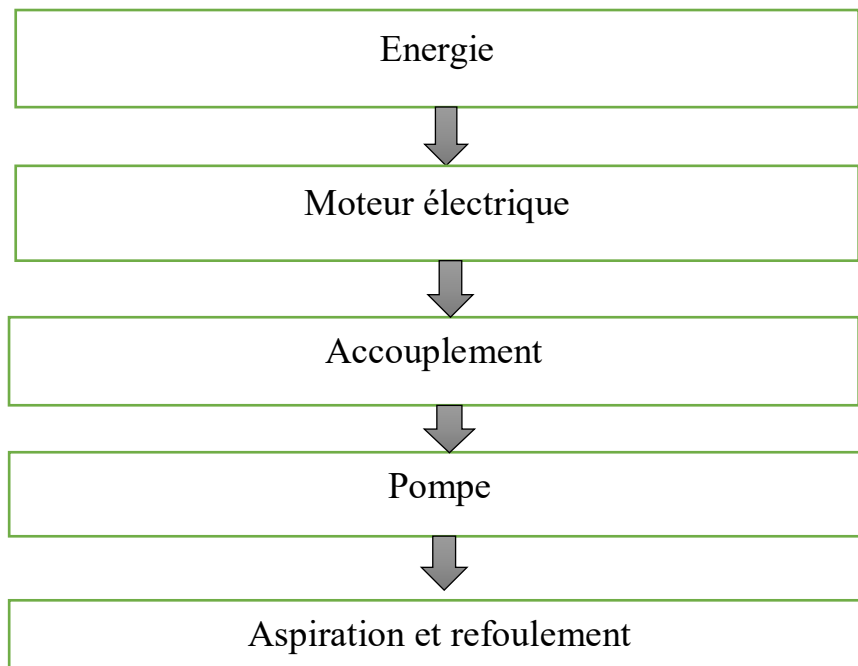


Figure IV.11: Décomposition fonctionnelle du système.

- **Décomposition du système**

L'AMDEC est une méthode de réflexion créative qui repose essentiellement sur la décomposition fonctionnelle de système en éléments simples jusqu'au niveau des composants les plus élémentaires. Dans notre cas on a décomposé la pompe 100-P2A en éléments simples.

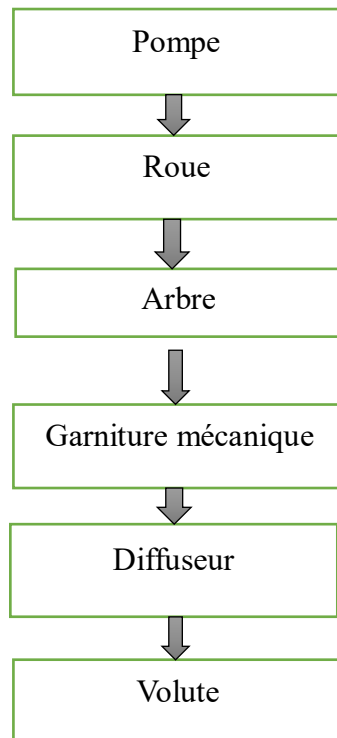


Figure IV.12 : Décomposition du système.

• Tableau AMDEC

Entreprise : RA1K				Analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leurs criticité						
Système : pompage Sous-système : pompe centrifuge 100-P2A				Date : 15.05.2023						
Élément	Fonction	Modes de défaillance	Causes	Effets	Moyens de détection	Criticité				Action préventives
						D	G	F	C	
Roue	Donner une vitesse au liquide	-Usure -Rupture	-Efforts très élevés -Cavitation -Ouïes de la roue usées	-Diminution de débit -Arrêt de la pompe	-Bruit Vibration	4	1	5	20	-Nettoyage mensuel de la pompe -Contrôle d'état de la roue -Contrôle vibratoire -Remplacer la roue usée avec une autre neuve
Arbre	Transmettre une puissance sous forme d'un couple et d'un mouvement de rotation	-Vibration -Usure	-Mauvaise Lubrification -Surcharge -Déformation	Arrêt de la pompe	Vibration	4	1	2	8	-Vérifier les éléments en contact avec l'arbre -Changement de l'arbre
Garnitures Mécanique	Assure l'étanchéité de la pompe, éviter	-Usure des faces -Usure des joints	-Cavitation -Mauvaise qualité d'eau	-Débit insuffisant - Arrêt de la pompe	Fuite d'eau	4	1	5	20	Changement de garniture

Chapitre IV : Analyse de la sûreté de fonctionnement de la pompe 100-P2A

	Les fuites du liquide à l'extérieur									
Diffuseur	Guide-le mouvement de produit	Usure	- Cavitation -Eau chargée	Fonction dégradé	-Bruit - Cavitation	3	1	1	3	Maintenance corrective
Volute	Prolonger l'effet hydraulique de la roue	Fissures	- Cavitation -Eau chargée	Fonction dégradé	-Bruit - Cavitation	3	1	1	3	Maintenance corrective

D'après l'étude AMDEC, on remarque que les défaillances les plus critiques ($16 \leq C < 32$) sont les roues, les garnitures mécaniques.

IV.9.3. Recommandation

Après avoir identifié les éléments ayant la majorité de criticité, il est nécessaire d'intervenir. Pour se faire nous avons proposé les solutions suivantes :

✓ **La roue :**

Actions :

- Nettoyage mensuel de la pompe ;
- Remplacer la roue usée avec une autre neuve ;
- Contrôle d'état de la roue mensuelle par l'opérateur.

✓ **Boîte à garniture :**

Actions :

- Contrôle régulier de la différence de pression entre la boîte à garniture et l'intérieur du corps de pompe ;
- Contrôle régulier du niveau de lubrifiant ainsi que sa température ;
- Remplacement des pièces usées ;
- Refaire la garniture ;
- Contrôle du centrage de l'arbre ;
- Test d'étanchéité de la garniture avant montage ;
- Contrôle de la concentricité de la boîte à garniture ;
- Faire analyse vibratoire pour contrôler l'état des roulements.

Donc L'établissement du plan de maintenance préventif permet d'atteindre les objectifs suivants :

- Garantir une continuité de service ;
- Garantir un niveau de disponibilité connu à un coût global maîtrisé ;

- Prévenir les risques.

IV.10. Conclusion

Le chapitre IV est un chapitre purement pratique (un chapitre de calcul), ou on a essayé de faire une analyse FMD qui constitue un calcul judicieux et donnée des interprétations de :

- La fiabilité $R(t)$;
- La fonction de répartition ;
- La densité de Probabilité ;
- Le taux de défaillance ;
- La maintenabilité ;
- La disponibilité.

Les résultats obtenus sont présentés dans des tableaux et par des graphes.

Nous avons effectué une analyse par la méthode Ishikawa et AMDEC sur les pannes les plus apparentes, suivie par une interprétation et recommandations.

L'AMDEC, par l'analyse des pannes, la fréquence d'apparition et les temps d'arrêt favorise :

- La mise en place des plans de maintenance préventive ;
- L'organisation et la réalisation des actions de maintenance ;
- Améliorer les conditions d'intervention.

Finalement on est arrivés à la nécessité de l'application d'une stratégie de maintenance systématique et préventive sur la pompe 100-P2A afin de diminuer les arrêts, améliorer sa performance et minimiser les couts de la maintenance corrective.

Conclusion générale

Conclusion générale

Suite à un stage pratique, au sein de la RA1K de Skikda et dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons réalisé une étude de la sureté de fonctionnement faite essentiellement à partir d'un historique de pannes de la pompe 100-P2A.

Tout d'abord, on a utilisé la loi de Weibull et ses paramètres à l'aide d'un logiciel statistique Minitab pour arriver à un calcul de fiabilité bien détaillé. Alors on a obtenu les résultats suivants :

- La fiabilité $R(t)$ de la P2A est décroissante avec le temps ce qui signifié l'absence d'une maintenance adéquate.
- La fonction de répartition $F(t)$ augmente avec le temps, cela veut dire que la P2A subi de plus en plus des défaillances.
- La densité de défaillance $f(t)$ est forte entre 600 h et 1600 h (MTBF).
- Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est croissant avec le temps.
- La maintenabilité s'augmente avec le temps contrairement à la disponibilité.

D'après analyse des graphes de l'étude de la maintenance (FMD) sur la pompe 100-P2A on à constater que cette dernière n'est fiable puisque $R(\text{MTBF}) = 0.403$, soit une fiabilité de 40.3%, et pour cela nous recommandons les suggestions suivantes pour améliorer notre pompe :

- Pour l'amélioration de la fiabilité de la pompe 100-P2A on propose de faire des interventions systématiques chaque 635.71 h
- Pour l'amélioration de la maintenabilité de la pompe on à proposer de faire diminuer l'allongement du temps réparation et pour cela on conseil d'appliqué la méthode de l'AMDEC.

Eventuellement, Nous avons réalisé une étude qualitative par la méthode l'analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) en se basant sur le diagramme d'Ishikawa. Donc AMDEC favorise :

- La mise en place des plans de maintenance préventive ;
- L'organisation et la réalisation des actions de maintenance ;
- Améliorer les conditions d'intervention.

Comme conclusion finale, nous pouvons dire que pour augmenter la fiabilité qui donne la possibilité de réduire les temps d'arrêts, l'indisponibilité et les coûts de maintenance il faut concentrer l'ensemble des efforts afin de concrétiser une meilleure organisation de la maintenance.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] YAGHLA MOHAMMED AMINE, KEMCHA Abdeljalil. Etude de fiabilité et analyse des risques de défaillances des pompes centrifuges PM113A, B et C du complexe Topping de condensat (RA2K) de Skikda. 2020.
- [2] Document RA1K, Manuel opératoire.
- [3] La Sûreté de Fonctionnement - revue Intersections oct. 2004.
- [4] INDUSTRIELLE, Automatique. Sûreté de Fonctionnement : Recherche des Scénarios Critiques dans les Systèmes Mécatroniques. Thèse de doctorat. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA. 2015.
- [5] S. Mansouri. Cour – sureté de fonctionnement L.M.D./M1 M.MTH S.2 2019-2020.
- [6] VILLEMEUR, Alain. Sureté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité-facteurs humains, informatisation. 1988.
- [7] J. ARLAT, Jean et LAPRIE, Jean-Claude. Guide de la sûreté de fonctionnement. Editions Cépaduès, 1995.
- [8] MORTUREUX, Yves. La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques. 2001.
- [9] GANDIBLEUX, Jean. Contribution à l'évaluation de sûreté de fonctionnement des architectures de surveillance/diagnostic embarquées. Application au transport ferroviaire. Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.2013.
- [10] DEMRI, Amel. Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle. Thèse de doctorat. Université d'Angers. 2009.
- [11] CHERIF, EMBAREK Mohamed. Développement d'une méthode de contrôle pour l'amélioration de la sûreté de fonctionnement des installations industrielles stratégique. Thèse de doctorat. 2012.
- [12] VEYSSEYRE, Renée. Aide-mémoire-Statistique et probabilités pour les ingénieurs. Dunod, 2014.
- [13] Dr. Mohammed Bouznit, Polycopié de Cours de Statistique II (Probabilités), Maître de Conférences- Université de Bejaia, Juin 2018.

Bibliographie

- [14] BE, Pr Ahmed, BELEULMI, A. Salima, et BELLAOUAR, Pr Ahmed. COURS DE FIABILITE MAINTENABILITE DISPONIBILITE.
- [15] P. Ingrand, 15 minutes pour comprendre Statistique Loi normale de Laplace-Gauss Université de Poitiers, 6 rue de la Milétrie, TSA 51115, 86073 Poitiers cedex, France.
- [16] Pierre DUSART, Cours de Statistiques inférentielles, Licence 2-S4 SI-MASS, Année 2018.
- [17] Yacine OUAZZANI. Yacine SMAIL, MEMOIRE DE FIN D'ÉTUDES En vue de l'obtention du diplôme de Master. Etude de la Maintenance d'une Pompe Centrifuge Verticale par la méthode AMDEC. Promotion 2016-2017.
- [18] BERNARD, Techniques d'ingénieur (B4320) Pompe Volumétriques pour Liquides, Paris.
- [19] Formation Totale : LES ÉQUIPEMENTS LES POMPES, MANUEL DE FORMATION COURS EXP-PR-EQ070 Révision 0.1, Dernière Révision : 13/04/2007.
- [20] DJAAOUI, Mohamed Amine et REMACHE, Leila. Analyse des modes de défaillances, leurs effets et leurs criticités d'une pompe centrifuge. 2020.
- [21] Sonatrach, POMPES, M. DAOUD Sid 'Ahmed Formateur IAP, Arzew.
- [22] cours les pompes, CIRA 1ère année PASCAL BIGOT.
- [23] NASSER M. & TIJANE M. « Les 7 outils de base du système de management de la qualité », Revue du contrôle, de la comptabilité et de l'audit « Volume 4 : numéro 2 » pp : 264 – 280. 2020.
- [24] G. Landy, AMEDC : guide en pratique, Livre, Afnor, 2007.