



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Kasdi Merbah Ouargla  
Faculté des Sciences appliquées  
Département génie Mécanique  
Mémoire de fin d'étude



En vue de l'obtention du diplôme de master Académique  
Filière : électromécanique  
Spécialité : maintenance industrielle  
Présenté par :  
ZEMALI SALAH Eddine  
ET  
BENNADJI BOUBAKEUR

## Thème

Etude de la fiabilité et maintenance d'une pompe à  
boue de forage d'un chantier pétrolier

Soutenu publiquement Le : 16 / 06 / 2021

Devant le jury composé de :

Mr : M.ZERROUKI	MCB. Université d'Ouargla	Président
Mm <sup>e</sup> : I. ALLOUI	MCB. Université d'Ouargla	Encadreur
Mr : R.KAREK	MCB. Université d'Ouargla	Examineur
Mr : Y. AOUF	Directeur de Sonde école ENAFOR	Co-encadreur

Année universitaire : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ

# Remerciement

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nos avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

Premièrement et avant tout, Nous tenons à exprimer notre remerciement et notre gratitude à notre encadreur : **Alloui Imane** pour la confiance qu'elle nous a prodigué pour la direction de ce travail et qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi nos remerciements vont à notre co encadreur **Mr Aouf Yahia** directeur sonde école de l'entreprise ENAFOR.

Je remercie également l'ensemble des membres du jury pour avoir consacré leur Temps pour examiner ce travail malgré leurs nombreuses responsabilités.  
je suis reconnaissant pour leurs attentions qu'ils ont porté à mon travail.

Nous voulons également remercier tous ceux qui ont participés à réaliser ce mémoire.

Enfin, Je tiens aussi à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien Continue.





# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de  
l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure  
bonne santé et longue vie.

A toute ma famille, et mes amis,

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce  
projet

soit achevé, je vous dis merci.

SALAH EDDIN



## Dédicace

Je dédie ce travail en guise d'amour et d'affection  
à mes Chers parents, qui par leurs prières m'ont  
éclairé le chemin de la vie. et surement A ma mère

Et à tout ma famille

A tous mes proches et à mes chers amis

Sans exception qui m'ont soutenu dans les moments les  
plus difficiles

BOBAKER

## Sommaire

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XI
Acronymes et abréviations.....	XII
Nomenclature.....	XII
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Technologie de la pompe à boue triplex a simple effet</b>	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Principe de fonctionnement de l'appareil de forage .....	3
I.3.Etude de la pompe à boue .....	5
I.4.Rôle de la pompe de pompe boue .....	5
I.5.Description de la pompe à boue triplex à simple effet 12p160 .....	6
I.5.1.Construction de la pompe .....	6
I.5.1.1.Partie mécanique de la pompe 12p160.....	7
I.5.1.2.La partie hydraulique de la pompe.....	7
I.5.1.3.Partie électrique de la pompe à boue 12P160.....	8
I.5.2.Annexes de la pompe à boue.....	9
I.6.Principe de fonctionnement de pompe triplex à simple effet .....	9
I.7.Système de circulation de la boue .....	10
I.8.Maintenance de la pompe à boue .....	11
I.9.fiche technique .....	12
<b>Chapitre II : Généralités sur la maintenance, étude théorique de la fiabilité</b>	
II.1.Introduction à la fonction maintenance .....	13
II.2.Définition de la maintenance .....	13
II.3.Objectifs de la maintenance .....	13
II.4.Les niveaux de maintenance .....	14

II.5.Types de maintenance .....	14
II.5.1.Maintenance corrective .....	14
II.5.1.1.Maintenance curative .....	15
II.5.1.2.Maintenance palliative.....	15
II.5.2.Maintenance préventive.....	15
II.5.2.1.Maintenance systématique.....	15
II.5.2.2.Maintenance conditionnelle.....	15
II.5.2.3.Maintenance prévisionnelle.....	15
II.6.Les opérations de maintenance .....	16
II.6.1.Les opérations de maintenance préventive .....	16
II.6.2.Les opérations de maintenance corrective .....	17
II.7.Analyse FMD (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité) .....	17
II.7.1.Introduction .....	17
II.7.2.Etude de la fiabilité .....	17
II.7.2.1.Définition .....	17
II.7.2.2.Types de fiabilité .....	18
II.7.2.3.Objectif de la fiabilité .....	18
II.7.3.Indicateurs de la fiabilité .....	18
II.7.3.1.Moyenne des temps de bon fonctionnement MUT (Mean Up Time)..	18
II.7.3.2.Temps moyen pour réparer MTTR (Mean Time To Repair) .....	18
II.7.3.3.Taux de réparation $\mu$ .....	19
II.7.3.4.La moyenne des temps de fonctionnement entre pannes MTBF (Mean Time Between Failure) .....	19
II.7.3.5.La relation entre les indicateurs de fiabilité : MUT, MTBF, et MDT.	19
II.7.4.Courbe en baignoire .....	20
II.7.5.Méthode de l'actuariat.....	21
II.7.6.Loix de probabilité usuelles en fiabilité .....	22

II.7.6.1.Lois de fiabilité .....	22
II.7.7.Test d'adéquation.....	30
II.7.8.Maintenabilité .....	30
II.7.8.1.Calcul de la maintenabilité .....	31
II.7.9.Disponibilité .....	32
II.7.9.1.Definitin .....	32
II.7.9.2.Quantification de la disponibilité .....	32
II.7.9.3.Les types de Disponibilité.....	32
II.8.Loi de Pareto et la courbe ABC .....	33
II.8.1.Origine de la méthode .....	33
II.8.2.Diagramme de Pareto .....	33
II.8.3.But de la méthode ABC .....	33
II.8.4.Principe de la méthode « ABC ».....	34
II.8.4.1.Description de l'analyse.....	34
II.8.4.2.Déterminer les zones ABC.....	34
II.8.4.3.Tracé de la Courbe ABC.....	34
II.9.Diagramme Causes- Effets/ ishikawa / 5M .....	35
II.9.1.Définition .....	35
II.9.2.Construction du diagramme .....	35
II.10.les coûts de maintenance .....	36
II.10.1.Les coûts directs de maintenance ( $C_m$ ).....	37
II.10.1.1.Coûts de main d'œuvre .....	38
II.10.2.Les coûts d'indisponibilité de maintenance ( $C_i$ ) .....	38
II.10.2.1.Perte de production $C_p$ .....	38
II.10.3.Les coûts de défaillance ( $C_d$ ).....	39
II.11.Conclusion .....	40



### **Chapitre III : Etude de Fiabilité de pompe à boue de chantier pétrolier**

III.1.Introduction.....	41
III.2.Historique des pannes avec TTR et TBF et UT.....	41
III.3.Calcul des indicateurs de fiabilité.....	43
III.3.1.Calcul du M.T.B.F .....	43
III.3.2.Calcul du M.U.T .....	43
III.3.3.Calcul de la disponibilité D .....	43
III.3.4.Calcul du MTTR .....	43
III.3.5.Calcul du taux de réparation $\mu$ .....	43
III.4.Méthode de l'actuariat .....	44
III.5.Utilisation la loi de Weibull.....	47
III.5.1.Tracé de la droite de WEIBULL .....	47
III.5.2.Test d'adéquation.....	49
III.5.3.Exploitation des paramètres de WEIBULL (pompe à boue).....	50
III.5.3.1.Calcul du MUT.....	50
III.5.3.2.Calcul de la densité de probabilité en fonction du MUT.....	50
III.5.3.3.Calcul de la fonction de répartition en fonction de MUT.....	50
III.5.3.4.Calcul de la fiabilité en fonction du MUT.....	50
III.5.3.5.Calcul du le taux de défaillance en fonction de MUT.....	50
III.5.3.6.Calcul du temps souhaitable pour une intervention systématique...51	
III.5.4.Tracé des fonctions de fiabilité du modèle de WEIBULL pour la pompe à boue.....	51
III.5.4.1.Courbe de la fonction de la densité de probabilité.....	52
III.5.4.2.Courbe de la fonction de répartition F(t).....	52
III.5.4.3.Courbe de la fiabilité R(t).....	53
III.5.4.4.Courbe du taux de défaillance $\lambda(t)$ .....	54
III.6.Calcul et tracé de la courbe de Maintenabilité de la pompe à boue .....	54

III.7.Calcul et tracé de la courbe de la disponibilité de la pompe à boue .....	55
III.7.1. Disponibilité intrinsèque ou asymptotique.....	55
III.7.2. Disponibilité instantanée.....	56
III.8.L'analyse de pareto .....	57
III.8.1.Présentation des éléments .....	57
III.8.2.Calculs préliminaires.....	58
III.8.3.Traçage de la courbe .....	59
III.8.4.Détermination des zones ABC .....	59
III.8.5.Interprétation de la courbe ABC.....	60
III.9.Méthode Cause-Effets (ISHIKAWA).....	61
III.9.1.Analyse des causes de défaillance de piston, Chemise + piston, d'huile, roulement, soupape et joint.....	61
III.9.2.Actions d'amélioration de la maintenance de piston, Chemise + piston, d'huile, roulement, soupape et joint .....	61
III.10.les coûts de maintenance.....	62
III.10.1.Calcul des coûts directs de maintenance $C_m$ .....	63
III.10.2.Calcul des coûts d'indisponibilité de maintenance.....	64
III.10.3.Les coûts de défaillance.....	64
III.10.4.Représentation des coûts de maintenance .....	65
III.11.Conclusion.....	65
Conclusion générale .....	66
Références bibliographiques.....	68

## ANNEXE

### Résumé

Liste des figures

**Chapitre I : Technologie de la pompe à boue triplex a simple effet**

**Figure I. 1:** structure de la tour de forage. ....4  
**Figure I. 2:** pompe à boue triplex simple effet.. ....5  
**Figure I. 3:** Pompe triplex simple effet. ....6  
**Figure I. 4:** partie mécanique de la pompe. . ....7  
**Figure I. 5:** partie hydraulique.....8  
**Figure I. 6 :** moteur à courant continu(DC).....8  
**Figure I. 7:** Systèmes de sécurité de la pompe . ....9  
**Figure I. 8:** Principe de fonctionnement de la pompe à boue ... ....9  
**Figure I. 9 :** principe de fonctionnement d'une pompe à boue simple effet..... 10  
**Figure I. 10 :** Système de circulation de la boue. .... 10  
**Figure I. 11:** Coupe d'une pompe à boue avec indication des différents points de contrôle de maintenance..... 11

**Chapitre II : Généralités sur la maintenance, étude théorique de la fiabilité**

**Figure II. 1:** Différents Types De Maintenance.....16  
**Figure II. 2:** probabilité de réparation au cours de temps..... 19  
**Figure II. 3:** Vie d'un système : évolution dans le temps.....20  
**Figure II. 4:** Courbe en baignoire du taux de défaillance .....20  
**Figure II. 5:** Principales propriétés de la distribution exponentielle. ....22  
**Figure II. 6:** Courbe théorique (densité de probabilité  $f(t)$ ).....24  
**Figure II. 7:** Courbe théorique (Fiabilité).....24  
**Figure II. 8:** Courbe théorique (fonction de répartition). ....25  
**Figure II. 9:** Courbe théorique (taux de défaillance).....25  
**Figure II. 10:** Caractéristiques  $f(t)$ ,  $R(t)$  et  $\lambda(t)$ .....26  
**Figure II. 11:** La densité. ....27  
**Figure II. 12:** La densité. ....27  
**Figure II. 13:** Schématisation des axes.....28  
**Figure II. 14:** Papier de Weibull.....28  
**Figure II. 15:** Papier de Weibull.....29  
**Figure II. 16:** Allure de la courbe de maintenabilité. ....31  
**Figure II. 17:** Courbe ABC.....34  
**Figure II. 18:** diagramme Causes- Effets.....35

## Liste des figures

---

<b>Figure II. 19:</b> Décomposition des coûts de maintenance.....	37
<b>Figure II. 20:</b> Evolution des coûts de défaillance.....	39
<b>Chapitre III : Etude de Fiabilité de pompe à boue de chantier pétrolier</b>	
<b>Figure III. 1 :</b> histogramme du nombre de pannes dans l'intervalle de temps (pompe à boue).....	44
55 ..... <b>Figure III. 10 :</b> La courbe de maintenabilité (pompe à boue).	
57 ..... <b>Figure III. 11 :</b> La courbe de disponibilité de la pompe à boue.	
58 ..... <b>Figure III. 12 :</b> récapitulatif des pannes.	
59 ..... <b>Figure III. 13 :</b> la courbe Cumulées de pannes-élément.	
59 ..... <b>Figure III. 14 :</b> Courbe théorique de Pareto.	
<b>Figure III. 15 :</b> Diagramme cause- effet de piston, Chemise + piston,	
61 .....d'huile, roulement, soupape et joint.	
<b>Figure III. 16 :</b> Graphiques pour le calcul détaillé des coûts de	
64 ..... maintenance.	

Liste des tableaux

**Chapitre I : Technologie de la pompe à boue triplex a simple effet**

**Tableau.I 1:** Maintenance de la pompe à boue..... 11  
**Tableau.I 2:** références clients..... 12  
**Tableau.I 3:** dimensions et spécifications (pompe à boue). ..... 12

**Chapitre II : Généralités sur la maintenance, étude théorique de la fiabilité**

**Tableau II. 1:** méthodologie de WEIBULL .....23

**Chapitre III : Etude de Fiabilité de pompe à boue de chantier pétrolier**

**Tableau III. 1:** Historique de pannes de la pompe à boue (SAP ENAFOR).....42  
**Tableau III. 2 :** distribution des pannes la pompe à boue par classe.....44  
**Tableau III. 3 :** Tableau des résultats (pompe à boue). .....45  
**Tableau III. 4 :** Tableau des valeurs du temps de bon fonctionnement UT de la pompe à boue. ....47  
**Tableau III. 5 :** comparaison des erreurs entre la fonction de répartition théorique et réelle (pompe à boue).....49  
**Tableau III. 6 :** Tableau Fonctions de fiabilité  $f(t)$ ,  $F(t)$ ,  $R(t)$  et  $\lambda(t)$  pour la pompe à boue.....51  
**Tableau III. 7 :** Attributs de sûreté de fonctionnement pour les lois usuelles.....54  
**Tableau III. 8 :** Tableau La maintenabilité (pompe à boue). .....54  
**Tableau III. 9 :** Tableau de disponibilité (pompe à boue).....56  
**Tableau III. 10 :** Tableau récapitulatif des pannes. ....57  
**Tableau III. 11 :** Calculs préliminaires de Pareto. ....58  
**Tableau III. 12 :** amélioration de la maintenance de piston et de Chemise. ....61  
**Tableau III. 13 :** amélioration de la maintenance d'huile, roulement, soupape et joint.62  
**Tableau III. 14 :** prix des pièces détachées. ....63  
**Tableau III. 15 :**Tableau récapitulatif du calcul détaillé des couts de maintenance. .63  
**Tableau III. 16 :** Coût d'entretien mensuel.....64

## Acronymes et abréviations

<b>ENAFOR</b>	Entreprise Nationale de Forage.	
<b>SAP</b>	Systems, applications, and products for data processing, un progiciel de gestion intégré, en informatique et management.	
<b>TTR</b>	Temps de réparation.	Heure
<b>TBF</b>	Temps entre défaillances.	Heure
<b>UT</b>	Temps de bon fonctionnement.	Heure
<b>MUT</b>	"Mean Up Time" La moyenne des temps de bon fonctionnement.	Heure
<b>MTBF</b>	"Mean time between frailer" Moyenne de temps entre pannes	Heure
<b>MTTR</b>	"Mean Time To Repair" Moyenne des temps de réparation.	Heure
<b>MDT</b>	"Mean Down Time" Durée moyenne d'indisponibilité.	Heure
<b>MINITAB</b>	Logiciel de statistiques et d'analyse de données.	
<b>ABC</b>	Méthode de Pareto.	
<b>RD</b>	Le ratio de discrimination.	
<b>FMD</b>	Fiabilité, maintenabilité, disponibilité.	

## Nomenclature

$R(t)$  : Fonction de fiabilité.

$F(t)$  : Fonction de défaillances.

$f(t)$  : Densité de probabilité.

$\lambda(t)$  : Taux de défaillance.

$\mu$  : Taux de réparation.

$F$  : Fiabilité.

$M$  : Maintenabilité.

$D$  : Disponibilité.

$\beta$  : Paramètre de forme de la loi de Weibull.

$\gamma$  : Paramètre de position de la loi Weibull.

$\eta$  : Paramètre d'échelle de la loi de Weibull.

$C_d$  : Coûts de défaillance.

$C_m$  : Coûts directs de maintenance.

$C_i$  : Coûts d'indisponibilité.

$C_{mo}$  : dépenses de main d'œuvre.

$C_f$  : dépenses fixes du service maintenance.

$C_c$  : dépenses de consommables.

$C_e$  : dépenses externalisées.

# **Introduction générale**

### **Introduction générale :**

Le pétrole et le gaz jouent un rôle fondamental dans l'économie nationale, ils constituent la source la plus importante d'énergie qui a une valeur inestimable.

Pour exploiter ces richesses souterraines, on procède au forage qui est une opération très délicate et la plus coûteuse du processus d'exploitation de cette énergie.

L'objectif prioritaire des foreurs est la réalisation d'un trou, conformément au programme qui leur a été fourni, au meilleur coût possible dans les meilleures conditions techniques.

La technologie de forage des puits de pétrole et de gaz demande l'emploi d'un matériel complexe de surface et du fond et des outils modernes, ainsi que d'une grande quantité de matériaux.

Dans l'installation de forage on trouve le système de circulation d'un liquide qui est généralement la boue de différentes natures afin d'absorber la chaleur dégagée lors du frottement de l'outil de forage avec les roches et de faire monter les déblais des roches vers la surface par circulation en recyclage. Cette circulation nécessite l'utilisation d'un équipement qui est la pompe volumétrique appelée pompe à boue qui assure un débit important et avec une grande pression.

Les pompes de forage les plus utilisées dans les chantiers sont les pompes à piston triplex à simple effet. L'utilisation intensive et continue ou presque sans arrêt de ces pompes dans les opérations de forage provoque plusieurs pannes, C'est pour cela qu'on a choisi d'étudier la maintenance de la pompe triplex à simple effet de marque NATIONAL OIL WELL 12P160.

La maintenance joue un rôle très important dans le domaine industriel, à partir leur influence sur le niveau de la sûreté de fonctionnement des systèmes électromécaniques. Le niveau de la sûreté de fonctionnement peut être amélioré par l'optimisation d'un ensemble des paramètres tel que la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité.

Pour démarrer cette étude, nous avons utilisé l'historique de défaillance sur trois ans (2018, 2019 et 2020) de la pompe à boue du site ENAFOR 47, qui a pris du temps et des efforts pour classer et filtrer pour s'adapter à l'étude et obtenir des résultats réalistes satisfaisants.

Le mémoire est structuré comme suit :

Chapitre I : Technologie de la pompe à boue triplex à simple effet.

Chapitre II : Généralités sur la maintenance, étude théorique de la fiabilité.



## **Introduction générale**

---

Chapitre III : Etude de Fiabilité de pompe à boue de chantier pétrolier  
Enfin vient une conclusion générale.

# **CHAPITRE I**

## **Technologie de la pompe à boue triplex a simple effet**

### **I.1. Introduction :**

Dans l'industrie pétrolière les travaux de forage des puits de pétrole et de gaz exigent beaucoup de main d'œuvre et nécessitent de grands investissements des capitaux.

La puissance nécessaire pour réaliser la circulation de la boue dans un forage a considérablement augmenté avec l'utilisation généralisée des outils à jets et l'utilisation des turbo-foreuses.

En dehors de sa puissance et de son débit, une pompe doit être souple, robuste et facile à entretenir. Les pompes de forage moderne sont de type duplex à double effet et triplex à simple effet. Actuellement les pompes triplex à simple effet ont complètement remplacé les pompes duplex à double effet.

### **I.2. Principe de fonctionnement de l'appareil de forage :**

L'outil de forage (trépan) est entraîné dans son mouvement de rotation au fond du trou par une colonne de tiges creuses vissées les unes aux autres.

A l'extrémité supérieure de ce train de tiges et à hauteur du plancher de la tour de sondage se trouve la tige d'entraînement qui est creuse également, mais de section extérieure carré ou hexagonale, et qui passe à travers la table de rotation par laquelle elle est entraînée.

La table de rotation est entraînée par les moteurs par l'intermédiaire d'un ensemble de transmission par chaîne et roues dentées. L'ensemble du train de sonde est suspendu au crochet de levage par l'intermédiaire de la tête d'injection qui joue le rôle de palier de rotation pour l'ensemble du train de tiges, elle comprend une partie mobile solidaire du train de sonde et une partie fixe solidaire du crochet.

Ce crochet de levage peut être manoeuvré du haut en bas de la tour métallique grâce à un système de mouflage composé d'un moufle mobile auquel est suspendu le crochet et d'un moufle fixe, fixe en haut du mât de sondage.

Le brin du câble va s'enrouler sur le tambour du treuil de forage lequel est entraîné par les moteurs par l'intermédiaire d'un jeu de transmission et d'embrayages.

Une injection continue de boue dans le trou est assurée pendant toute la durée de forage.

Des pompes à boue aspirent la boue des bacs et la refoulent par l'intermédiaire de la colonne montante, du flexible et de la tête d'injection dans l'intérieur du train de sonde, la boue, descend ainsi jusqu'au fond du trou, sort par les événements du trépan et remonte par l'espace annulaire compris entre les tiges et le trou foré, cette boue qui remonte du fond du trou est chargée des déblais de forage. [2]

Ainsi dès son arrivée à la surface, elle passe aux tamis vibrants qui la sépare des déblais ; de là, elle retourne dans les bacs d'aspiration.

La boue effectue donc un circuit fermé, durant le forage. Aux deux tiers (2/3) environ du mât de forage se trouve la passerelle d'accrochage, qui sert au gerbage des tiges dans le mât lors des manœuvres de remontée ou descente.

Le train de tige est donc remonté puis redescendu par éléments de deux ou trois tiges grâce au système de levage qui constituent le treuil, le câble, les mouffles et le crochet.

Le mât de forage repose sur une substructure de 3m de hauteur, ce qui élève d'autant le plancher de travail et permet l'installation sur la tête du puits d'un ou plusieurs obturateurs de sécurité. [2]

L'appareil de forage oil well se décompose des sous-ensembles suivants [2]:

- ✚ La structure de la tour de forage.
- ✚ Le treuil de forage (draw works).
- ✚ Le mouflage.
- ✚ Les pompes de forage.
- ✚ La tête d'injection.
- ✚ La table de rotation.
- ✚ Le trepan.
- ✚ Equipement d'obturation BOP [blow-out preventers].

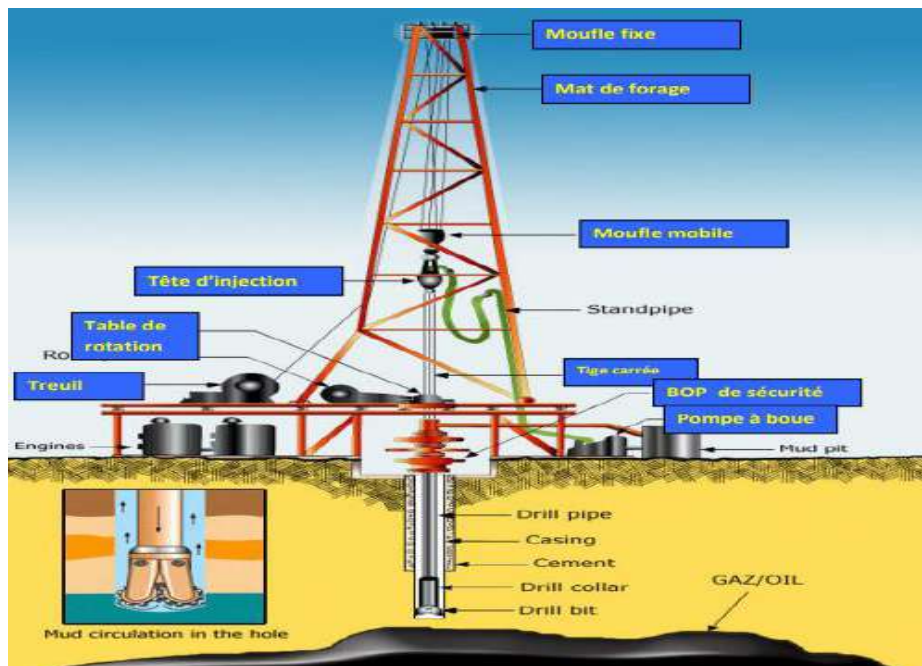


Figure I. 1: structure de la tour de forage. [2]

### I.3. Etude de la pompe à boue :

Dans le domaine du forage des puits profonds il est montré que seule la pompe horizontale à piston répond aux exigences du forage. la circulation de la boue de forage dans une installation nécessite l'utilisation des pompes (mud pumps) puissantes. [2]

Une bonne installation de pompage doit assurer [2]:

- ✚ Une vitesse de remonté des déblais suffisants pour éviter leur décantation.
- ✚ Une pression de refoulement suffisante pour vaincre les pertes de charges dans le circuit

De nos jours les pompes les plus couramment utilisées sont les triplex à simple effet, du principe équivalent, mais beaucoup plus robuste. Ces pompes comportent trois cylindres à simple effet (la boue est aspirée et refoulée par un seul côté du piston). [2]

Dans l'opération de forage on utilise différents types de pompes à boues on peut citer [2]:

- ✚ OIL WELL TRIPLEX 1400 PT.
- ✚ OIL WELL DUPLEX 560 PD.
- ✚ OIL WELL DUPLEX 1400 PT.
- ✚ IDECO TRIPLEX 1600.
- ✚ IDECO TRIPLEX T800.
- ✚ NATIONAL OIL WELL 9P100.
- ✚ NATIONAL OIL WELL 12P160.



Figure I. 2: pompe à boue triplex simple effet. [1]

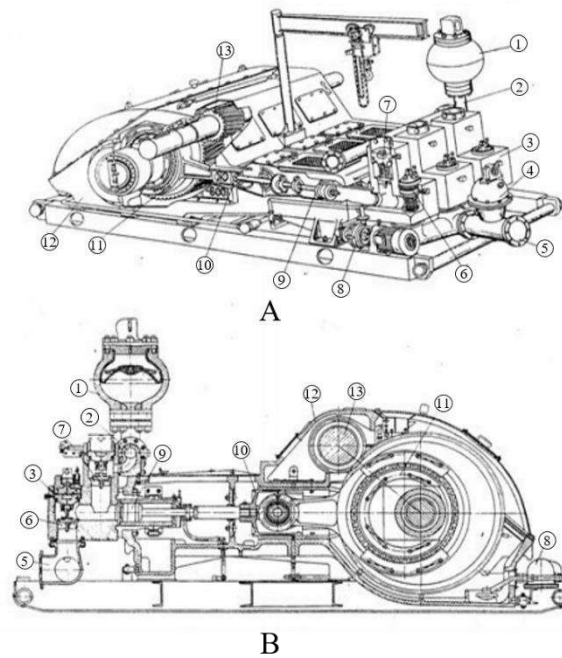
### I.4. Rôle de la pompe de pompe boue :

Les pompes à boue sont les consommateurs principaux de la puissance fournie à l'installation de forage, la consommation de la puissance d'une pompe à boue 80% de la puissance totale de l'appareil de forage. Aujourd'hui le forage d'un puits profond s'effectue

avec des pressions de 25 à 35 Mpa développées à la sortie de la pompe à boue, le débit de la pompe ou débit de forage est de 50 à 80 l/mn.

On utilise les pompes de forage dans le but d'assurer le débit nécessaire et la pression voulue pour la circulation de la boue entre la pompe et le fond du puits qui doit revenir à la surface. [3]

### I.5. Description de la pompe à boue triplex à simple effet 12p160 :



**Figure I. 3:** Pompe triplex simple effet. [1]

A - Vue générale ; B- coupe transversale

1 - Amortisseur de pulsations de sortie ; 2- collecteur ; 3- boîte hydraulique ; 4- amortisseur de pulsations d'aspiration ; 5- collecteur d'entrée ; 6,7- clapets d'aspiration et de refoulement ; 8- pompe de graissage ; 9- piston avec la tige ; 10- crosse ; 11- arbre coude avec manivelle ; 12- corps ; 13- arbre de transmission ; 15- châssis. [1]

#### I.5.1 Construction de la pompe :

Comme toutes les pompes triplex à simple effet, elle est constituée de trois parties principales : [3]

- ✚ Partie mécanique.
- ✚ Partie hydraulique.
- ✚ Partie électrique.

### I.5.1.1. Partie mécanique de la pompe 12p160 :

#### + Description :

Le coté mécanique d'une pompe à boue représente la partie la plus importante de la valeur d'achat, il doit être robuste et permettre une longue période de service sans entretiens importants en dehors de la lubrification. [1]

La partie mécanique de la pompe se compose des sous-ensembles suivants [1] :

- + L'arbre grand vitesse.
- + L'arbre petite vitesse ou vilebrequin.
- + Système bielle-manivelle.
- + La crosse et la rallonge de crosse.
- + Le bâti/carter de lubrification.
- + Le système d'entraînement (chaîne + pignon + roue dentée).
- + Roulement.
- + Pompe à l'huile.

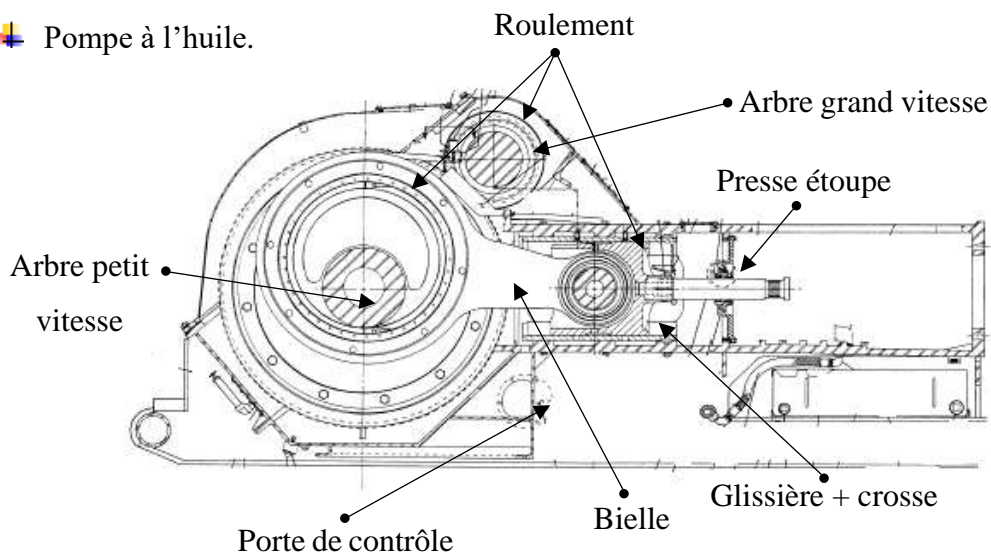


Figure I. 4: partie mécanique de la pompe. [3]

### I.5.1.2. La partie hydraulique de la pompe :

La partie hydraulique est constituée de trois cylindres identiques. Dans chaque cylindre se trouve une chemise dans laquelle coulisse un piston prolongé par une tige qui le relie à la rallonge de crosse. Au bout des cylindres se trouvent les clapets : clapet d'aspiration et l'autre de refoulement. Chaque clapet repose sur son siège. [3]

La partie hydraulique de la pompe se compose des sous-ensembles suivants [3]:

- + Le corps hydraulique.
- + Le piston et la tige du piston.
- + Presse-étoupe.

- ✚ Les chemises.
- ✚ Les sièges et les clapets.
- ✚ Les pompes de suralimentation.

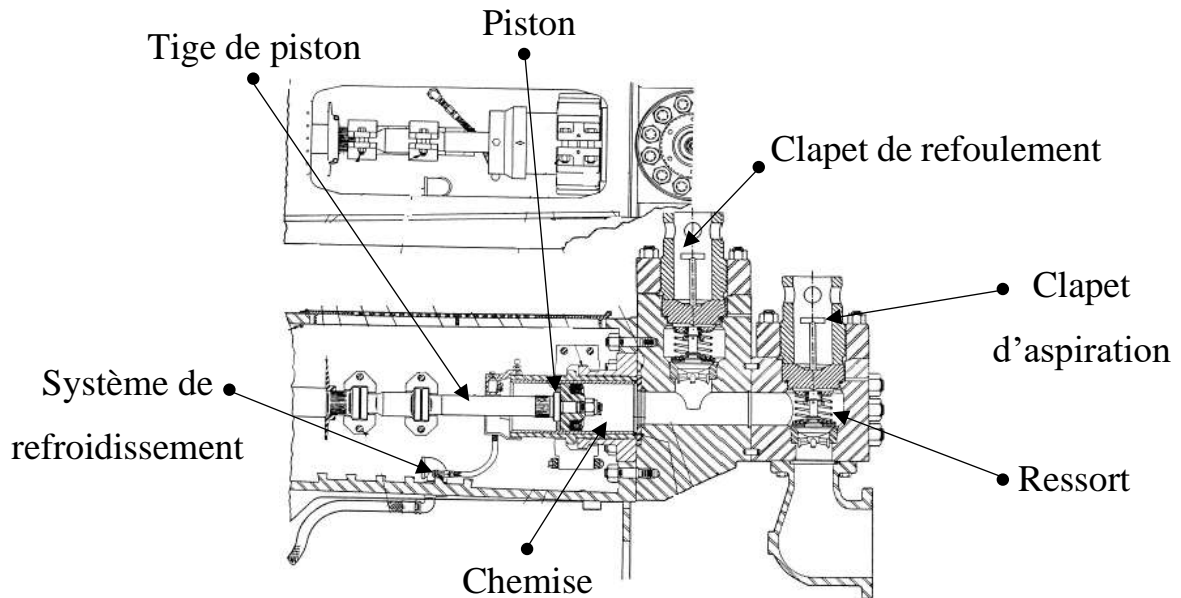


Figure I. 5: Partie hydraulique. [3]

### I.5.1.3. Partie électrique de la pompe à boue 12P160 :

La puissance qui arrive à l'arbre d'attaque de la pompe est développée par la rotation de deux moteurs électriques d'entraînement (mcc à excitation série) alimente en courant continu à travers un redresseur commande. [3]

La transmission entre les moteurs d'entraînement et l'arbre d'attaque de la pompe se fait par chaine. [3]

Les deux extrémités de l'arbre sont identiques, ce qui permet l'entraînement d'un côté comme de l'autre. [3]



Figure I. 6 : moteur à courant continu(DC).



### I.5.2 Annexes de la pompe à boue :

Les pompes de forage comportent les équipements auxiliaires suivants :

- ✚ Un amortisseur de pulsation.
- ✚ Une soupape de sécurité pour protéger le circuit contre les fluctuations et les augmentations brusques de pression (Soupape à ressort et Soupape à clou). [3]

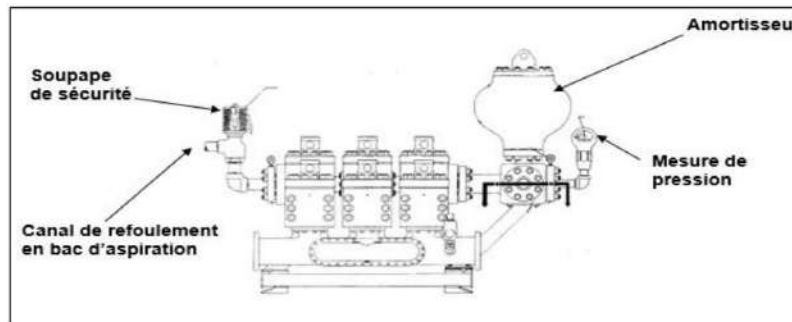


Figure I. 7: Systèmes de sécurité de la pompe [3]

### I.6. Principe de fonctionnement de pompe triplex à simple effet :

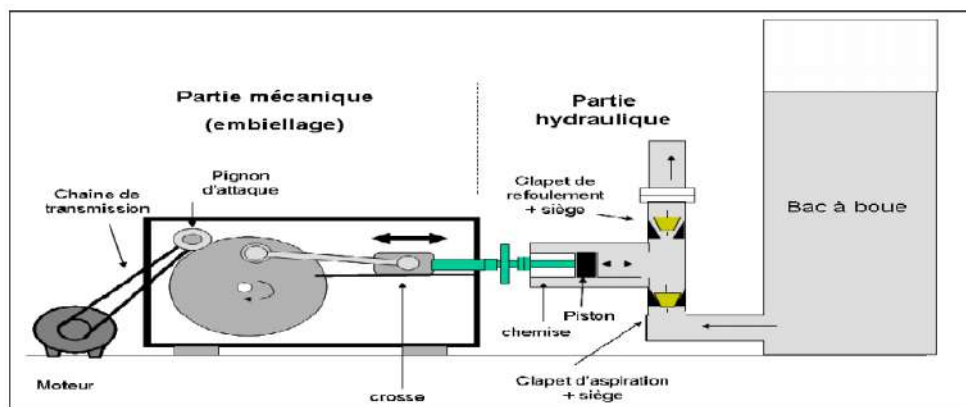


Figure I. 8: Principe de fonctionnement de la pompe à boue [1]

Ce sont des pompes qui comportent trois cylindres dans lesquels coulisent trois pistons à simple effet, c'est-à-dire que chaque piston aspire et refoule d'un seul côté.

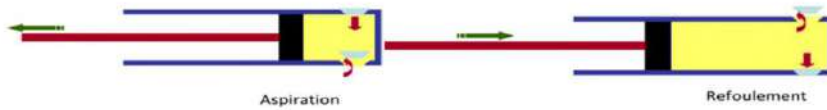
Chaque cylindre comporte un clapet d'aspiration et un autre de refoulement à l'avant seulement. [1]

Lorsque le piston se déplace vers l'arrière, le clapet d'aspiration s'ouvre et celui de refoulement se ferme, la chemise se remplit de boue.

Lorsque le piston arrive en fin de course et revient vers l'avant, le clapet d'aspiration se ferme et celui de refoulement s'ouvre et la boue est ainsi refoulée dans la conduite de refoulement. [1]

Ainsi pendant un aller et retour du piston, c'est à dire un tour complet de l'arbre petite vitesse, un piston refoule une seule fois le volume de la chemise correspondant à sa course.

Le même cycle se produit par les autres pistons avec un décalage de  $1/3$  de tour. [1]

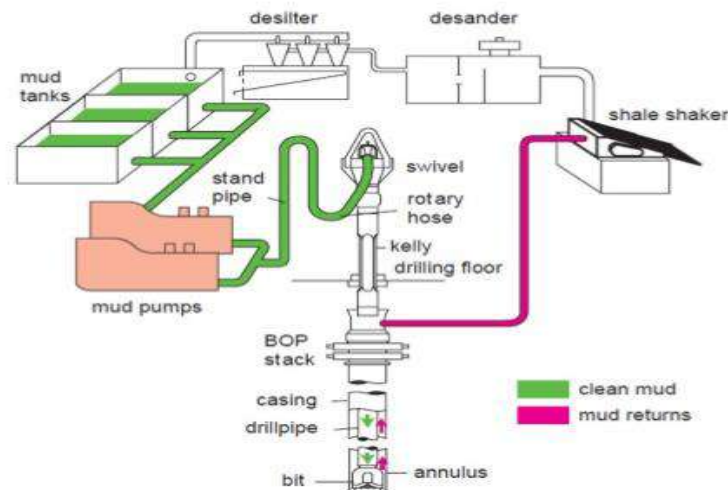


**Figure I. 9** : principe de fonctionnement d'une pompe à boue simple effet. [1]

### I.7. Système de circulation de la boue :

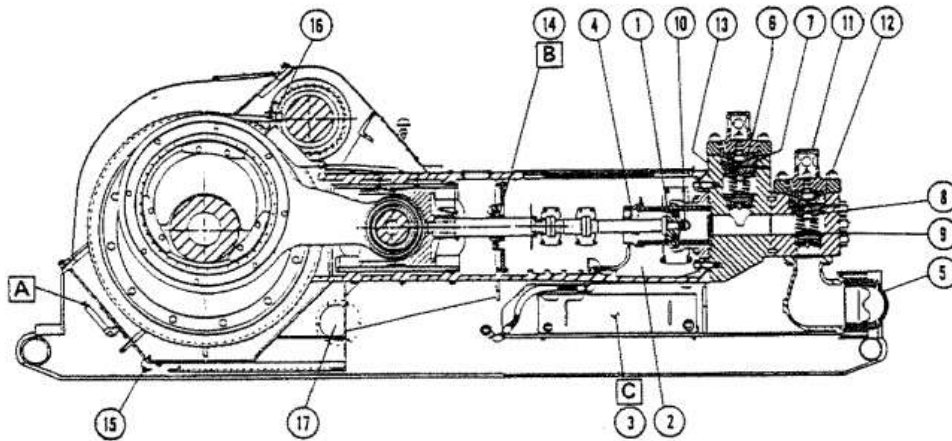
Généralement, le liquide de forage circule en circuit fermé, à partir des pompes dans le puits et du puits avec les déblais de terrain vers les équipements.

Afin d'assurer la circulation du liquide, les installations de forage sont équipées d'un système de circulation qui est destiné à amener le liquide de forage sous pression à partir des pompes vers la tête d'injection se déplaçant de haut en bas et vice versa, à renvoyer le liquide de tête de puits dans les réservoirs de recueil des pompes, à éliminer les déblais du liquide et à préparer un nouveau liquide de forage. [2]



**Figure I. 10** : Système de circulation de la boue.

### I.8. Maintenance de la pompe à boue :



**Figure I. 11:** Coupe d'une pompe à boue avec indication des différents points de contrôle de maintenance.[4]

**Tableau I. 1:** Maintenance de la pompe à boue. [4]

La Fréquence	Point De Contrôle	Procédure
du quotidien	1	Observez l'état des chemises et des pistons, ils doivent fonctionner jusqu'à ce que la dérivation de fluide soit à chaque course ou devienne excessive
	2	Nettoyez les chambres du revêtement au besoin
	3	Vérifier et remplir le puisard après une contamination excessive
	4	Vérifiez le serrage des écrous à oreilles du collecteur de chemise et assurez-vous que les buses de pulvérisation ne sont pas obstruées
	5	Vérifiez que l'amortisseur est correctement chargé. Les instructions sont dans le manuel d'entretien et sur l'amortisseur à côté du voyant
Hebdomadaire	6	Nettoyez les deux côtés des cales de verrouillage et enduisez-les d'un composé de filetage à base de plomb très résistant
	7	Nettoyez et enduisez la partie conique du bouchon avec le même composé de filetage utilisé sur les cales de verrouillage. Inspectez l'emballage, nettoyez et enduisez le cylindre avant la réinstallation
	8	Inspectez l'insert dans le guide de tige de soupape supérieur et remplacez-le s'il est usé
	9	Vérifier l'usure des soupapes et des sièges. Remplacez les disques coupés ou usés et les verrous de soupape s'ils sont desserrés ou usés
	10	Remplacez le contre-écrou de la tige de piston s'il a été endommagé, corrodé ou si la fibre de verrouillage a perdu son efficacité. Tout écrou utilisé trois fois doit être remplacé

Bihebdomadaire	11	Retirez les couvercles et nettoyez les filets sur la vis du couvercle et dans le boulon sur la bague. Enduire les filets d'un composé de filetage à base de plomb très résistant
Mensuel	12	Vérifiez le serrage de tous les goujons et écrous du cylindre
	13	Retirez et nettoyez la crépine de la croix de décharge
	14	Vérifier l'état des racleurs intermédiaires, les remplacer s'ils sont usés
Six mois	15	Vérifier l'aimant sur le bouchon de vidange pendant le changement d'huile
	16	Nettoyer les aimants dans le bac à huile accessible par le couvercle d'inspection
	17	Nettoyer le carter d'huile lors d'un changement d'huile régulier

### I.9. fiche technique :

**Tableau I. 2:** références clients. [4]

IDENTIFICATION	
Désignation	Pompe à boue
Constructeur	NOV-EDMONTON
UTILISATEUR FINAL	ENAFOR
Type	12P160
Modèle	pompe triplex
N° .P.O	128254
N° Ref	1292400-68
bon de commande	LS5040501
Date de Mise en service	Dec-2005

**Tableau I. 3:** dimensions et spécifications (pompe à boue). [4]

Taille de la pompe (alésage max. de la chemise x course)	Pouces	7 ¼" * 12"
Pression d'essai hydrostatique	Psi	11.250
Puissance nominale au frein absorbée à la vitesse nominale	kw	1600
Boîtier d'engrenages	Pouces	75"
rapport d'engrenages	-	3.439
Double extension sur pignon arbre Dia. x Largeur	Pouces	113 ¾ "
Connexion d'aspiration	Pouces	10"
Connexion de décharge, croix	Pouces	5"
Pot de Valve, numéro API	-	MOD.7
Nominal, vitesse de la pompe	Spm	120
Poids net, pignon complet moins pignon	kg	54.700
Longueur totale	Inches	209"

# **CHAPITRE II**

**Généralités sur la maintenance, étude  
théorique de la fiabilité**

## II.1. Introduction à la fonction maintenance :

La maintenance industrielle, qui a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est une fonction stratégique dans les entreprises. Intimement liée à l'incessant développement technologique, à l'apparition de nouveaux modes de gestion, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution. Elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et éviter les dysfonctionnements. [5]

## II.2. Définition de la maintenance :

D'après la norme NF EN 13306, La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Une fonction requise est une fonction, ou un ensemble de fonctions d'un bien considérées comme nécessaires pour fournir un service donné. [6]

Maintenir c'est donc effectuer des opérations (de nettoyage, graissage, visite, réparation, révision, amélioration...etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de production.

Ainsi que choisir les moyens de prévenir, de corriger ou de rénover suivant l'utilisation du matériel. L'état d'esprit de la maintenance est de maîtriser les interventions. La maintenance a pour but : [7]

- ✚ Le maintien du capital machine.
- ✚ La suppression des arrêts et des chutes de production (garantir la capacité de livraison).
- ✚ L'amélioration de la sécurité et la protection du personnel et de l'environnement.

## II.3. Objectifs de la maintenance :

Assurer le maintien (disponibilité) des équipements de production et diminuer les pannes car ces dernières occasionnent : [7]

- ✚ Coûts de maintenance (intervention).
- ✚ Coûts d'indisponibilité (non production).
- ✚ Problèmes de sécurité (biens et personnes) La maintenance intègre également :
- ✚ Amélioration de la sécurité des biens et des personnes,
- ✚ Intégration de nouveaux biens,
- ✚ Organisation des activités de maintenance,
- ✚ L'animation et l'encadrement des équipes d'intervention.

## II.4. Les niveaux de maintenance :

Pour faciliter principalement la gestion des personnels affectés à la maintenance, on définit [8] :

- ✚ **Niveau 1** : Réglages simples au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité (voyants, fusibles...etc.).
- ✚ **Niveau 2** : Dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventive telles que les graissages ou contrôles de bon fonctionnement (rondes).
- ✚ **Niveau 3** : Identification et diagnostic des pannes réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réaligement des appareils de mesure.
- ✚ **Niveau 4** : Tous les travaux de maintenance corrective ou préventive sauf rénovation et reconstruction. Avec réglages des appareils de mesure utilisés. Au besoin vérification des étalons de mesure par des organismes spécialisés.
- ✚ **Niveau 5** : Rénovation, reconstruction, et toutes les opérations importantes confiées à un atelier central ou à des unités extérieures.

## II.5. Types de maintenance :

Il existe plusieurs façons d'organiser les actions de maintenance pour obtenir la disponibilité maximale du matériel au coût minimum. Il en ressort les types de maintenance suivants :

- ✚ La maintenance corrective.
- ✚ La maintenance préventive.

### II.5.1. Maintenance corrective :

La norme (NF EN 13306) définit ainsi la maintenance corrective : « Exécutée après détection d'une panne est destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». Ou bien c'est l'ensemble des activités réalisées après la panne du système pouvant être liée à sa défaillance ou à la dégradation de sa fonction, elle a alors pour but de le remettre en état de marche. Il faut distinguer là, deux aspects : la maintenance curative et la maintenance palliative. [9]

**II.5.1.1. Maintenance curative :** (AFNOR) X 60-000 « Action de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelée couramment «dépannage», la maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui doivent être suivies d'actions curatives. » [10]

**II.5.1.2. Maintenance palliative :** Le dépannage est une opération de maintenance palliative qui est destinée à remettre le système en état provisoire de fonctionnement de manière à ce qu'il puisse assurer une partie des fonctions requises. [11]

**II.5.2. Maintenance préventive :** (Extrait de la norme NF EN 13306 X 60-319).

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien.

Une opération de maintenance préventive est donc une intervention prévue, préparée et programmée en fonction de différents paramètres en vue d'éviter l'apparition probable d'une défaillance identifiée. [9]

A partir de cette définition générale, on distingue trois variantes qui peuvent être utilisées conjointement en complément l'une de l'autre : maintenance préventive systématique; maintenance préventive conditionnelle et maintenance préventive prévisionnelle. [9]

**II.5.2.1. Maintenance systématique :** D'après la norme AFNOR X 60-010 ; la maintenance préventive systématique est une forme de maintenance dont « les activités correspondantes sont déclenchées selon un échancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unité d'usage » et aussi « les remplacements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leurs états de dégradation, et ce de façon périodique ».

**II.5.2.2. Maintenance conditionnelle :** La norme AFNOR X 60-010 définit la maintenance conditionnelle ainsi : « les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service ».

**II.5.2.3. Maintenance prévisionnelle :** Selon la Norme AFNOR X 60-000 la Maintenance prévisionnelle : « maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien permettant de retarder et de planifier les interventions. Elle est parfois improprement appelée maintenance prédictive ». [10]



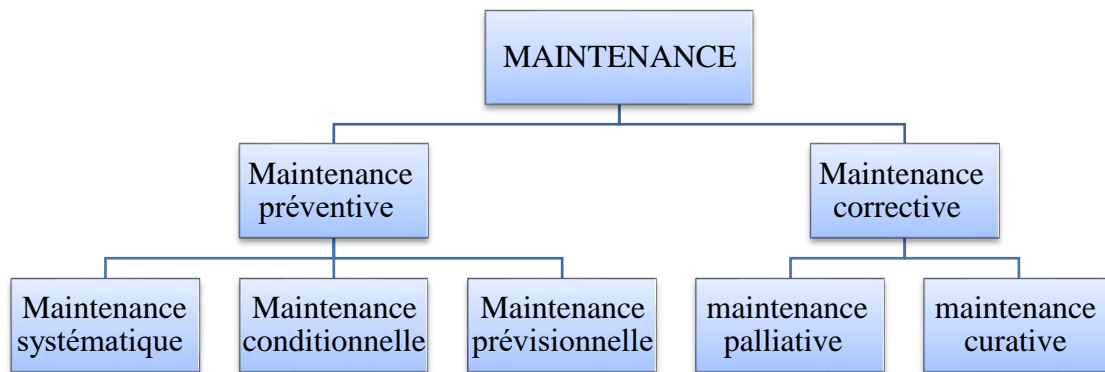


Figure II. 1 : Différents Types De Maintenance.

## II.6. Les opérations de maintenance :

Les différentes opérations de la maintenance sont montrées ci-dessous :

### II.6.1 Les opérations de maintenance préventive :

- 1) **Inspection** : c'est le contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un équipement informatique. Elle permet de relever des anomalies et d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements c'est-à-dire pas de démontage. [12]
- 2) **Contrôle** : c'est la vérification de la conformité a des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective ou alors inclure une décision de refus, d'acceptation ou d'ajournement. [12]
- 3) **Visite** : c'est un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments de l'équipement informatique pouvant impliquer des opérations de maintenance de premier et deuxième niveau. il peut également déboucher sur de la maintenance corrective. [12]
- 4) **Test** : c'est une comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de référence ou à un phénomène physique significatif d'une marche correcte. [12]
- 5) **Echange standard** : remplacement d'une pièce ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur. [12]

- 6) **Révision** : ensemble complet d'examens et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un bien. Une révision est souvent conduite à des intervalles prescrits de temps ou après un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel du bien. Le terme révision ne doit donc pas être confondu avec surveillance. [12]

### II.6.2 Les opérations de maintenance corrective :

- 1) **Le dépannage** : Actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée. [13]
- 2) **La réparation** : Actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne. [13]
- 3) **Les révisions** : Ensemble des actions et examens de contrôle et d'intervention effectuée en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour nombre d'unités d'usage donné. [13]

## II.7. Analyse FMD (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité) :

### II.7.1. Introduction :

La sûreté de fonctionnement regroupe les activités d'évaluation de la fiabilité (assurer la continuité du service), de la Maintenabilité (être réparable), de la disponibilité (être prêt à l'emploi), d'un système, d'un produit ou d'un moyen. Ces évaluations permettent, par comparaison aux objectifs ou dans l'absolu, d'identifier les actions de construction (ou d'amélioration) de la sûreté de fonctionnement de l'entité. Ces évaluations sont prévisionnelles et reposent essentiellement sur des analyses inductives ou déductives des effets des pannes, dysfonctionnements, erreurs d'utilisation ou agressions de l'entité. [14]

### II.7.2. Etude de la fiabilité :

#### II.7.2.1 Définition :

Définition selon la NF X 06-501 : la fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une période de temps déterminée.

La fiabilité d'un groupe d'éléments à un instant  $t$  est la probabilité de fonctionnement sans défaillance pendant la période  $[0, t]$ , c'est donc la probabilité que l'instant de première défaillance  $T$  soit supérieur à  $t$ , [15].

### II.7.2.2 Types de fiabilité :

De cela, nous mentionnons [16]:

- a. **Fiabilité explicite** : elle est basée sur des modèles mathématiques, cette probabilité est devenue un trait d'union entre la technique et l'économie.
- b. **Fiabilité implicite** : c'est la fiabilité estimée par le service de la maintenance compte tenu d'une certaine expérience.
- c. **Fiabilité intrinsèque** : il s'agit de la fiabilité propre qui est liée à la conception et la réalisation.
- d. **Fiabilité extrinsèque** : Elle est liée aux conditions de travail et à l'environnement.
- e. **Fiabilité projetée** : C'est la fiabilité déterminée au stade de la conception.
- f. **Fiabilité opérationnelle** : C'est la fiabilité réelle de la machine.

### II.7.2.3 Objectif de la fiabilité :

La fiabilité utilisée depuis bientôt une dizaine d'années dans l'industrie, le concept de fiabilité permet à l'aide de renseignement statistique recueilli pendant la vie du matériel [17] :

- + De mesurer une garantie dans le temps.
- + Dévaluer rigoureusement de degré de confiance.
- + De chiffrer une dure de vie.
- + Dévaluer une précision du temps de bon fonctionnement.
- + De calculer le risque pris.
- + De déterminer la stratégie d'entretien.
- + De choisir le stock magasin judicieux.

### II.7.3 Indicateurs de la fiabilité :

#### II.7.3.1 Moyenne des temps de bon fonctionnement MUT (Mean Up Time) :

Le temps moyen jusqu'à défaillance (ou moyenne des temps de bon fonctionnement) est [18]

$$MUT = \frac{\sum \text{temps de bon fonctionnement}}{\text{nombre d'intervalles de temps de bon fonctionnement}} \quad (\text{II. 1})$$

$$MUT = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (\text{II. 2})$$

#### II.7.3.2 Temps moyen pour réparer MTTR (Mean Time To Repair) :

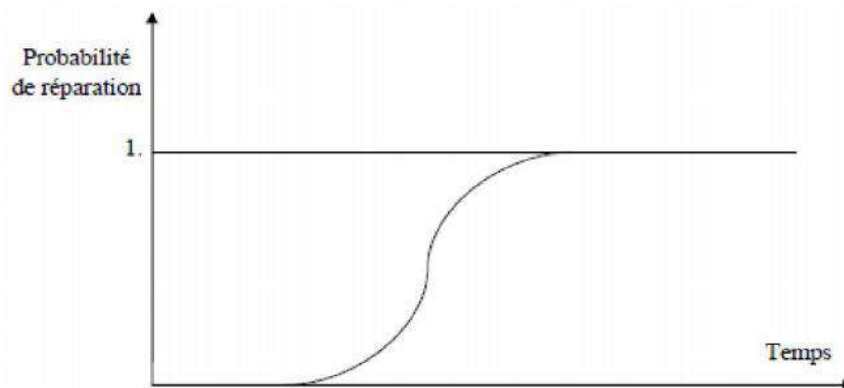
Exprime la moyenne des temps de tâches de réparation. Il est calculé en additionnant les temps actifs de maintenance ainsi que les temps annexes de maintenance, le tout divisé par le nombre d'interventions. [18]

$$MTTR = \frac{\text{Temps d'arrêt Total}}{\text{nombre d'arrêt}} \quad (\text{II. 3})$$

### II.7.3.3 Taux de réparation $\mu$ :

La probabilité de réparation d'un composant est principalement fonction du temps écoulé depuis l'instant de défaillance. Il existe un certain délai  $t$  avant que le composant puisse être réparé. Ce délai  $t$  comprend le temps de détection et le temps d'attente de l'équipe de réparation. Il s'y ajoute le temps de réparation proprement dit. **Figure II.1** donne l'allure de la probabilité de réparation d'un composant tombé en panne en  $t = 0$ . [20]

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (\text{II. 4})$$



**Figure II 2:** probabilité de réparation au cours de temps. [20]

### II.7.3.4 La moyenne des temps de fonctionnement entre pannes MTBF (Mean Time Between Failure) :

C'est le temps qui sépare deux défaillances consécutives. Le MTBF est la moyenne sur un ensemble d'entités « identiques » et sur leurs durées de vie considérées des TBF. [18]

$$MTBF = \frac{\text{temps total de fonctionnement pour l'ensemble des produits}}{\text{Nombre total défaillances}} \quad (\text{II. 5})$$

### II.7.3.5 La relation entre les indicateurs de fiabilité : MUT, MTBF, et MDT :

$$\text{On a: } MTBF = MUT + MDT \quad (\text{II. 6})$$

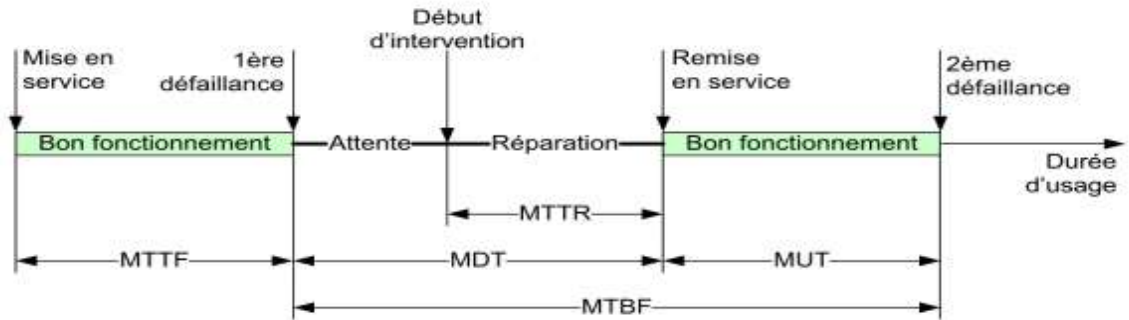


Figure II 3: Vie d'un système : évolution dans le temps. [13]

**a. Indicateurs opérationnels :**

MTTF : (Mean Time To Failure) Durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance.

MTTR : (Mean Time To Repair) Durée moyenne de réparation.

MUT: (Mean Up Time) Durée moyenne de fonctionnement après réparation.

MDT : (Mean Down Time) Durée moyenne d'indisponibilité. Cette durée correspond aux phases suivantes : Détection de la panne, la réparation de la panne et la remise en service.

MTBF : (Mean Time Between Failure) Durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée. [13]

**II.7.4 Courbe en baignoire :**

L'allure générale des variations des taux de défaillance  $\lambda(t)$  d'un équipement le long de sa durée de vie est représentée par la **Figure II 4**.

Cette géométrie de courbe a un caractère « universel », elle représente aussi bien des taux de défaillances « des organes des équipements et humaines ». [22]

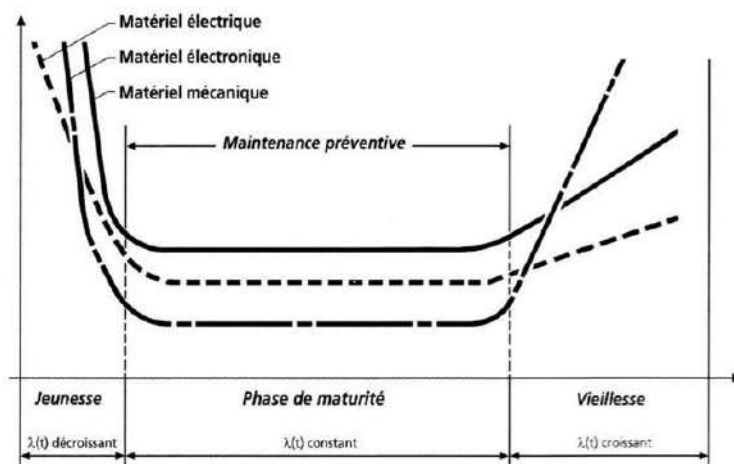


Figure II 4: Courbe en baignoire du taux de défaillance [22]

**Zone (1). Période de jeunesse (rodage) :**

Le taux de défaillance décroît relativement vite après élimination des composants de qualité médiocre ou mal montés. [22]

**Zone (2). Période de maturité (pleine activité) :**

Le taux de défaillance est constant. C'est la période de vie utile (ou période de pannes fortuites). [22]

**Zone (3). Période de vieillesse ou d'usure :**

Les défaillances sont dues à l'âge ou à l'usure des composants,  $\lambda(t)$  croît avec le temps du fait de la dégradation du matériel (usures mécaniques, fatigue, etc...). [22]

**II.7.5 Méthode de l'actuariat :**

Il s'agit donc de déterminer de façon expérimentale le taux de défaillance  $\lambda(t)$ , il correspond à la probabilité d'avoir une défaillance dans les différents intervalles de temps constituant la vie du matériel étudié. Cette méthode s'appuie sur le retour d'expérience ou bien l'historique des pannes du bien à étudier, elle permet d'estimer le taux de défaillance dans le but de le situer dans la courbe de baignoire et ainsi avoir une idée plus claire concernant la loi de fiabilité à appliquer. [23]

Une estimation de  $\lambda(t)$  par tranche de temps est déterminée par le calcul suivant :

$$\lambda(t) = \frac{n_i}{N_i \Delta t_i} \quad (\text{II. 7})$$

Avec :

$n_i$ : Nombre de défaillances.

$N_i$  : Nombre de survivants au début de la tranche de temps  $t(i)$ .

$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$  : intervalle de temps observé.

La détermination du nombre de classe doit être telle que la courbe ne soit pas trop déformée, il dépend du nombre total de défaillance ; on peut déterminer le nombre de classe ( $r$ ) tel que :

$$r = 1 + 3.3 \left( \log \sum_{i=1}^n (n_i) \right) \quad (\text{II. 8})$$

On bien :

$$r = \sqrt{\sum_{i=1}^n (n_i)} \quad (\text{II. 9})$$

## II.7.6 Loïs de probabilité usuelles en fiabilité :

Nous présentons dans ce paragraphe les loïs de fiabilité les plus couramment utilisées.

### II.7.6.1 Loïs de fiabilité :

En raison de la complexité des loïs citées précédemment, nous étudierons que celles qui sont largement employées dans le calcul de la fiabilité des systèmes. [23]

On distingue :

#### ✚ Les loïs discrètes :

- La loi binomiale.
- La loi de poisson.

#### ✚ Les loïs continues :

- La loi log normale.
- La loi exponentielle.
- La loi Weibull.

#### a. Loi exponentielle :

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C'est une loi simple, très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance est constant. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales. [22]

Durant la vie utile, le taux de défaillance  $\lambda$  est constant.

La fiabilité est solution de :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{II. 10})$$

Densité de probabilité :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{II. 11})$$

Fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{II. 12})$$

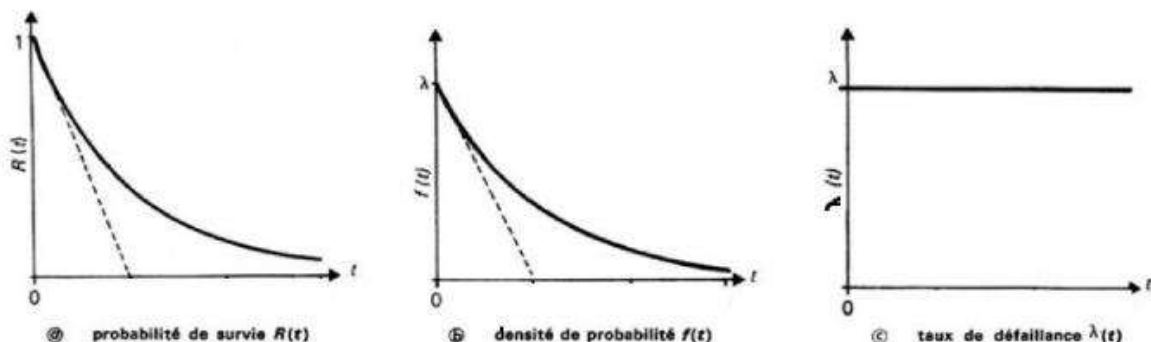


Figure II 5 : Principales propriétés de la distribution exponentielle.

**b. Loi de Weibull :**

La loi de Weibull est un modèle couramment employé pour modéliser la durée vie d'un matériel.

Cela permet de déterminer par exemple les périodicités dans le cas d'une maintenance préventive systématique.

La loi de Weibull est très souple d'utilisation, ce qui lui permet de s'ajuster à un grand nombre d'échantillons prélevés au long de la vie d'un équipement. Elle couvre les cas de taux de défaillance variables, décroissants (périodes de jeunesse), ou croissant (période de vieillesse). Elle permet d'ailleurs, à partir des résultats obtenus de déterminer dans quelle période de sa vie se trouve le système étudié. [25]

**1) Méthodes d'approximation des valeurs de la fonction de répartition :**

On dispose pour nos études de fiabilité d'un certain nombre de données expérimentales ou réelles sur les TBF ; TBF dont on veut étudier la fonction de répartition.

Ces données représentent un échantillon « i » de la population que l'on veut appréhender.

Elles doivent être classées par ordre croissant de durée (en heures, jours, etc.), suivant l'unité la plus adaptée. [25]

L'estimation de la fonction de densité pour une durée (ti) est donnée par :

Ces valeurs (N) seront classées par valeurs selon un ordre (i) allant de (i=1 à i=N). F(i) est la probabilité consultative de défaillance sur (o, t) suivant la taille (N) de l'échantillon. [22]

**Tableau II. 1 : méthodologie de WEIBULL**

<b>Si N &gt;50</b>	$F(i) = \frac{i}{N}$ (II. 13)	Formule de "Weibull".
<b>Si 20 &lt;N&lt;50</b>	$F(i) = \frac{i}{N+1}$ (II. 14)	Formule des rangs moyens.
<b>Si N&lt;20</b>	$F(i) = \frac{i-0.3}{N+0.4}$ (II. 15)	Formule des rangs médians.

**2) Signification des paramètres de fiabilité de "Weibull" :**

$\beta$  : appelé paramètre de forme ( $\beta > 0$ ), souvent il est égal, inférieur ou supérieur à 1. La loi de "Weibull" correspond à un taux de défaillance instantané, constant, décroissant ou croissant.

$\eta$  : est appelé paramètre d'échelle ( $\eta > 0$ ) parfois nommé « caractéristique de vie » c'est un simple paramètre de temps.



$\gamma$  : est appelé paramètre de position ( $-\infty < \gamma < +\infty$ ) il définit un changement d'origine dans l'échelle de temps. [22]

3) Expressions mathématiques :

✚ Densité de probabilité  $f(t)$  :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \times \exp \left( -\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right) \tag{II. 16}$$

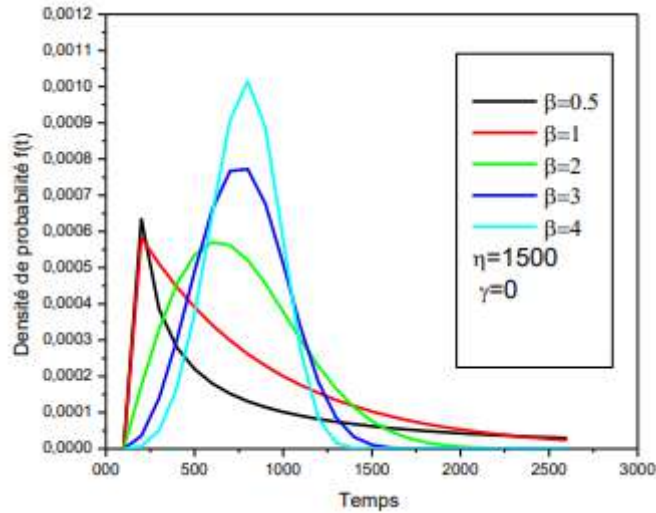


Figure II. 6 : Courbe théorique (densité de probabilité  $f(t)$ ). [23]

✚ Fonctions de fiabilité  $R(t)$  :

$$R(t) = \exp \left[ -\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \tag{II. 17}$$

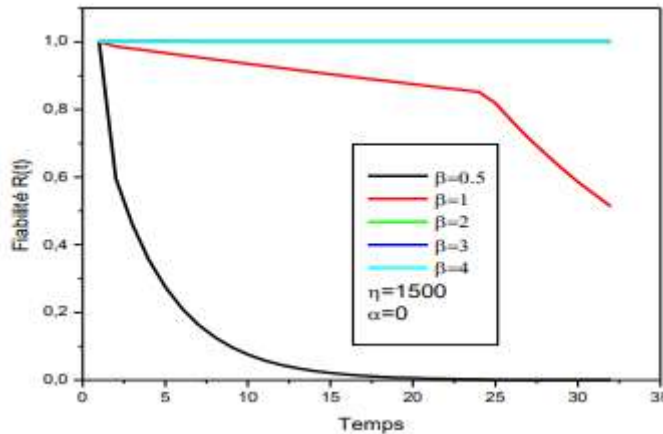


Figure II. 7 : Courbe théorique (Fiabilité). [23]

✚ Fonction de répartition  $F(t)$  :

$$F(t) = 1 - \exp \left[ -\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \tag{II. 18}$$

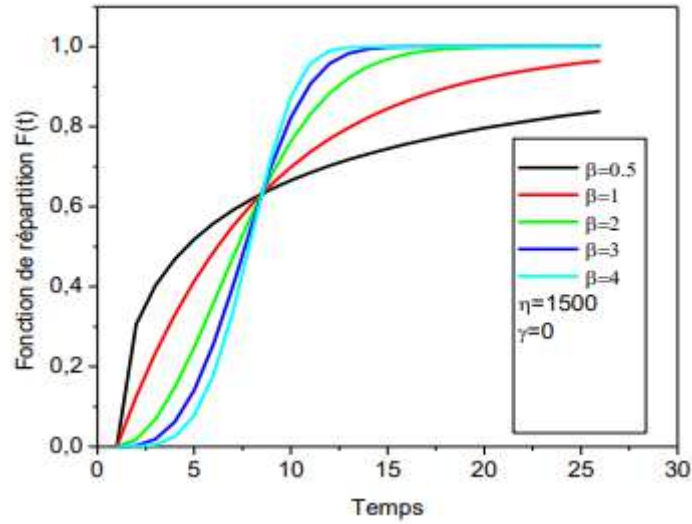


Figure II. 8 : Courbe théorique (fonction de répartition). [23]

✚ Taux de défaillance  $\lambda(t)$  :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \times \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \tag{II. 19}$$

Remarque :

$$Si \begin{cases} \gamma=0 \\ \beta=1 \end{cases} \Rightarrow \lambda(t) = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MUT} \tag{II. 20}$$

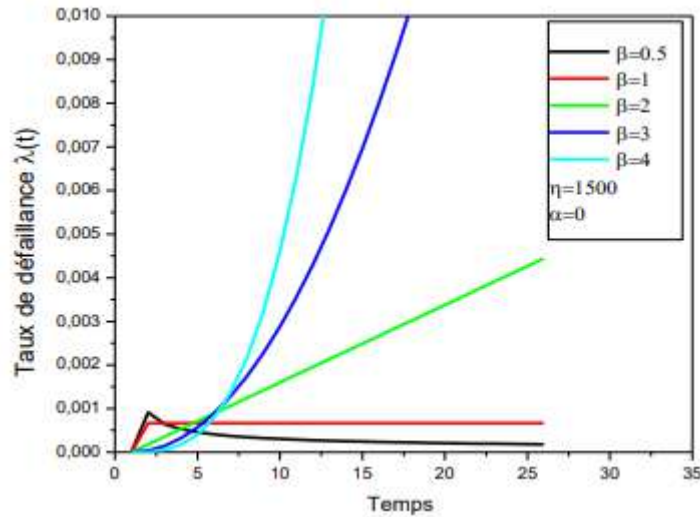


Figure II. 9 : Courbe théorique (taux de défaillance). [23]

### ✚ Moyenne des temps de bon fonctionnement :

$$MUT = \gamma + \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (\text{II. 21})$$

$\Gamma(x)$  Est la fonction eulérienne de 2<sup>ème</sup> espèce. Le tableau (ANNEXE 02) donne les valeurs de :

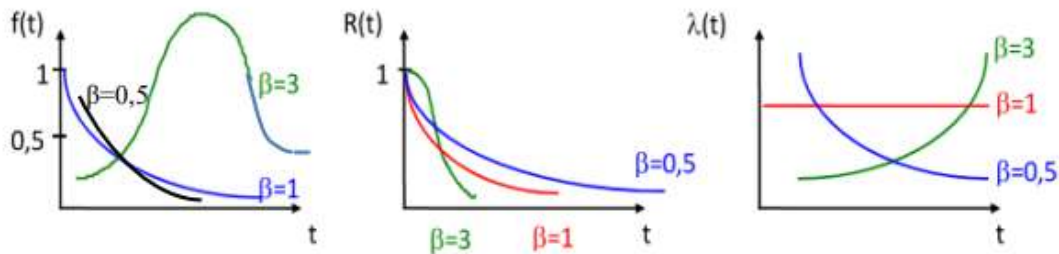
$$A = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (\text{II. 22})$$

$$\text{En fonction de } \beta ; \text{ d'où } MUT = \gamma + \eta \times A \quad (\text{II. 23})$$

### ❖ Paramètre de forme $\beta$ :

Paramètre de forme bêta ( $\beta$ )  $> 0$  sans dimension : Ce paramètre donne des indications sur le mode des défaillances et sur l'évolution du taux de défaillances dans le temps. [25]

- ✚ Si  $\beta > 1$ , le taux de défaillance est croissant, caractéristique de la zone de vieillesse
    - ✓  $1,5 < \beta < 2,5$  : fatigue.
    - ✓  $3 < \beta < 4$  : usure, corrosion.
  - ✚ Si  $\beta = 1$ , le taux de défaillance est constant, caractéristique de la zone de maturité.
  - ✚ Si  $\beta < 1$ , le taux de défaillance est décroissant, caractéristique de la zone de jeunesse.
- [25]



**Figure II. 10 :** Caractéristiques  $f(t)$ ,  $R(t)$  et  $\lambda(t)$  pour différentes valeurs de  $\beta$  / loi Weibull. [13]

### ✚ Paramètre de forme $\gamma$ :

Paramètre de position,  $-\infty < \gamma < +\infty$ , qui s'exprime dans l'unité de temps :

- ✚  $\gamma > 0$  : survie totale sur l'intervalle de temps  $[0, \gamma]$ .
- ✚  $\gamma = 0$  : les défaillances débutent à l'origine des temps.
- ✚  $\gamma < 0$  : les défaillances ont débuté avant l'origine des temps. [25]

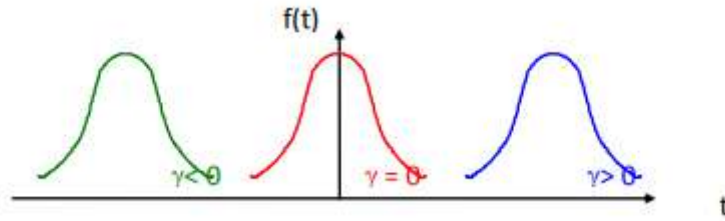


Figure II. 11 : La densité. [25]

**Remarque :** pour  $\gamma = 0$  et  $\beta = 1$ , on retrouve la distribution exponentielle, cas particulier de la loi de Weibull :

$$\lambda = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MUT} \quad (\text{II. 24})$$

#### ✚ Paramètre de forme $\eta$ :

Paramètre d'échelle (*Netta* ( $\eta$ ) > 0) qui s'exprime dans l'unité de temps : Ce paramètre permet d'utiliser le papier d'Allen Plait quel que soit l'ordre de grandeur de  $t$ . Il n'a donc pas à être interprété. [25]

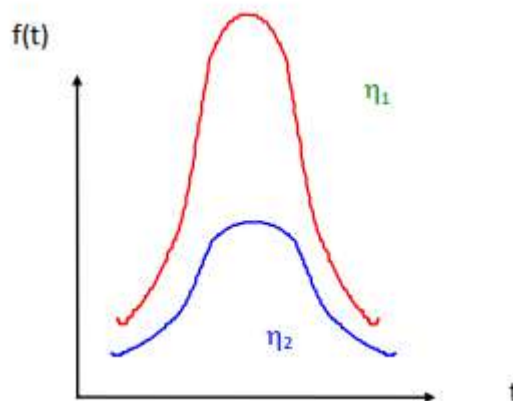


Figure II. 12 : La densité. [25]

#### 4) Domaine d'application :

La distribution de Weibull est souvent utilisée dans le domaine de l'analyse de la durée de vie, grâce à sa flexibilité car elle permet de représenter au moins approximativement une infinité de lois de probabilité. Un taux de panne croissant suggère une "usure ou un problème de fiabilité" : les éléments ont de plus en plus de chances de tomber en panne quand le temps passe. [23]

#### 5) Détermination graphique des paramètres de la loi de Weibull :

La courbe est tracée sur un papier spécial appelé papier de Weibull ou d'Allen Plait, ce qui permet de tracer une droite et de Simplifier les calculs. [24]

a. Schématisation des axes :

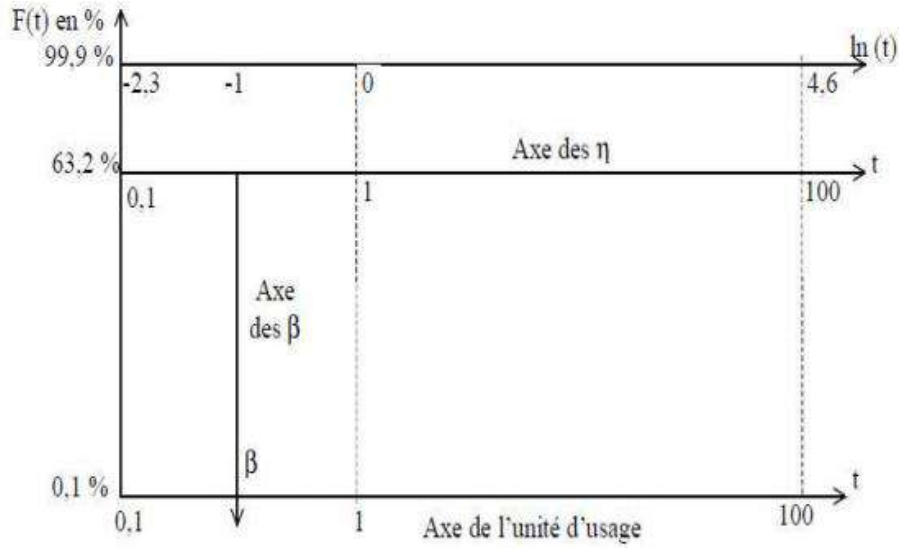


Figure II. 13 : Schématisation des axes. [23]

b. Aspect du papier de Weibull :

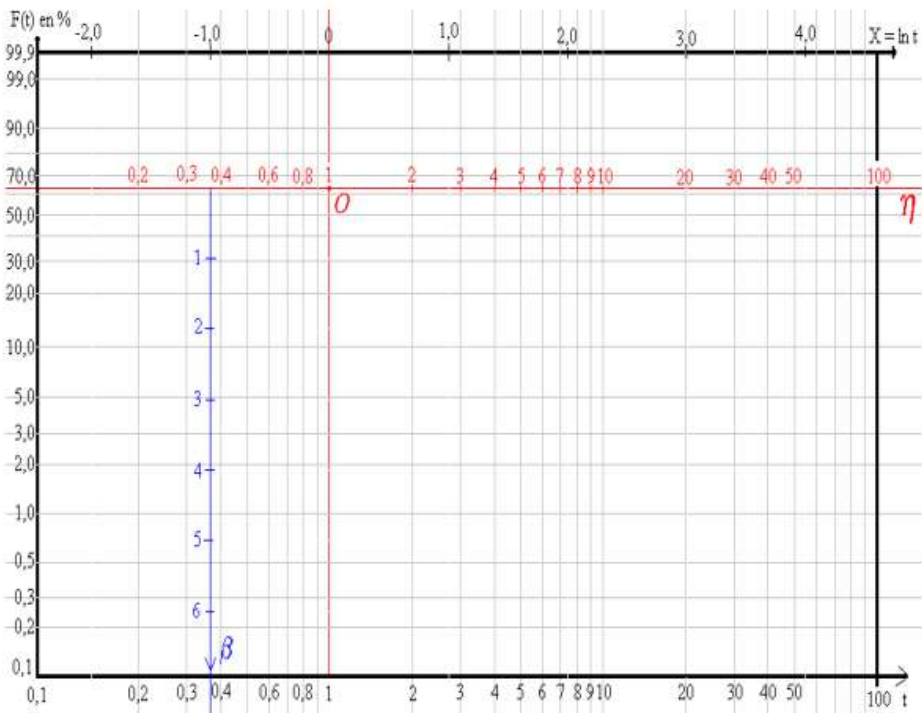


Figure II. 14 : Papier de Weibull. [23]

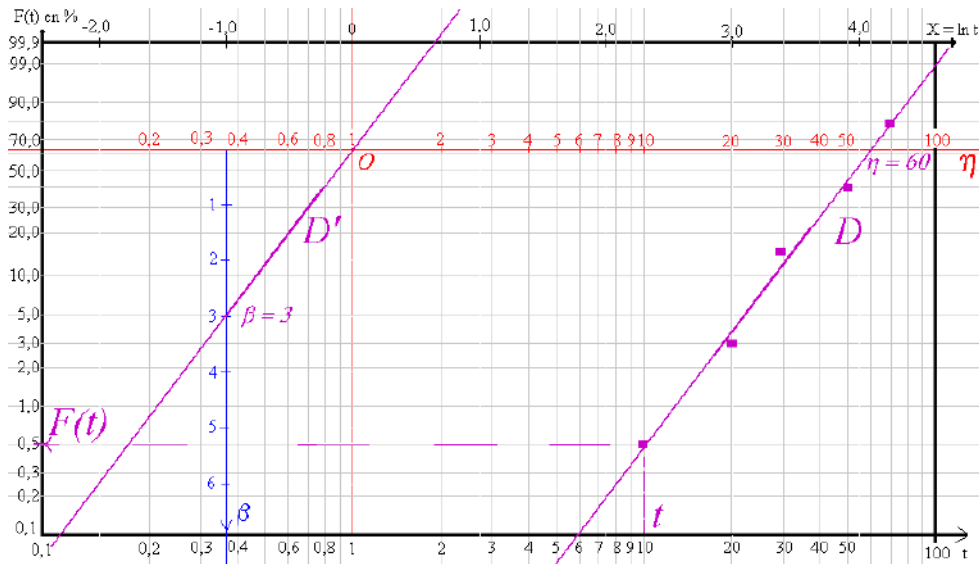


Figure II. 15 : Papier de Weibull. [23]

### 6) Méthodologie de l'analyse de fiabilité par le modèle de Weibull :

- 1) Consulter les historiques de pannes et dresser la liste des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances.
- 2) Classer ces temps par ordre croissant.
- 3) Cumuler le nombre de défaillances (rang). Au premier temps il y a 1 avarie, au deuxième temps, il y en a 2, etc.
- 4) Calculer les fréquences des avaries  $F(i)$ , en fonction de la taille  $N$  de l'échantillon. Pour calculer gamma. Si le nuage de points correspond à une droite, alors  $\gamma = 0$ . Si le nuage de points correspond à une courbe, on la redresse par une translation de tous les points en ajoutant ou en retranchant aux abscisses "t", une même valeur (gamma) afin d'obtenir une droite.
- 5) Reporter les points ainsi trouvés sur le papier de WEIBULL en plaçant les UT en abscisse et les  $F(i)$  en ordonnée.
- 6) Tracer la droite passant au mieux par les points obtenus.
- 7) Si les points sont alignés sur une droite, on a  $\gamma = 0$ . [25]
- 8) Détermination des paramètres  $\eta$  et  $\beta$  [23]:
  - ✓ Le paramètre ( $\eta$ ) est obtenu par l'intersection de la droite tracée avec l'axe des  $\eta$  lue sur ce dernier axe. L'échelle utilisée pour la lecture devra être la même que celle choisie pour l'axe de t.

- ✓ Le paramètre ( $\beta$ ) est obtenu en traçant une parallèle à la droite précédente et passant par la valeur 1 de l'axe des  $\eta$ . La valeur de  $\beta$  se lit sur l'axe des  $\beta$ , à l'intersection avec la droite parallèle tracée ci-dessus.
- ✓ Interpréter les résultats.

### II.7.7 Test d'adéquation :

Les modèles que l'on peut établir en fiabilité sont issus d'un échantillon de population, puis on fait l'hypothèse qu'ils suivent une loi particulière (loi normale, loi exponentielle, ...) ainsi, il reste à vérifier la validité de cette Loi, cette vérification est obtenue par un test d'adéquation. Pour cela utilisons le test de Kolmogorov-Smirnov. [4]

L'idée est de comparer la fonction réelle de répartition des défaillances à la fonction de répartition théorique.

Nous avons la taille d'échantillon  $N$ , on mesure l'écart, point par point entre les deux fonctions de répartition.

$$\Delta D_i = F(i) - F(t) \quad (\text{II. 25})$$

$F(i)$ : fonction de répartition réelle.

$$F(i) = \frac{i}{N + 1} \quad (\text{II. 26})$$

$F(t)$ : fonction de répartition théorique.

Avec  $i$  : ordre de  $t_i$ ,  $N$  : nombre total

On montre que  $D_n = \text{Max} | F(i) - F(t) |$  suit une loi ne dépendant que de  $n$  et on écrit que :

$$P [\text{Max} | F(i) - F(t) | < D_n, \alpha] = 1 - \alpha$$

La valeur de  $D_n, \alpha$  est donnée par la table de Kolmogorov-Smirnov (ANNEXE 01). Si :

$$D_n > D_n, \alpha$$

On refuse l'hypothèse du modèle théorique

### II.7.8 Maintenabilité :

Dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

(Norme NF EN 13306). [13]

La maintenabilité d'une entité réparable est caractérisée par une probabilité  $M(t)$  que la maintenance d'une entité  $E$  accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits, soit achevée au temps  $t$ , sachant que  $E$  est défaillante au temps  $t = 0$ . [26]

$$M(t) = P(\text{la maintenance d } E \text{ est achevée au temps } t) \\ = 1 - P(E \text{ non réparée sur la durée } [0, t]) \quad (\text{II. 27})$$

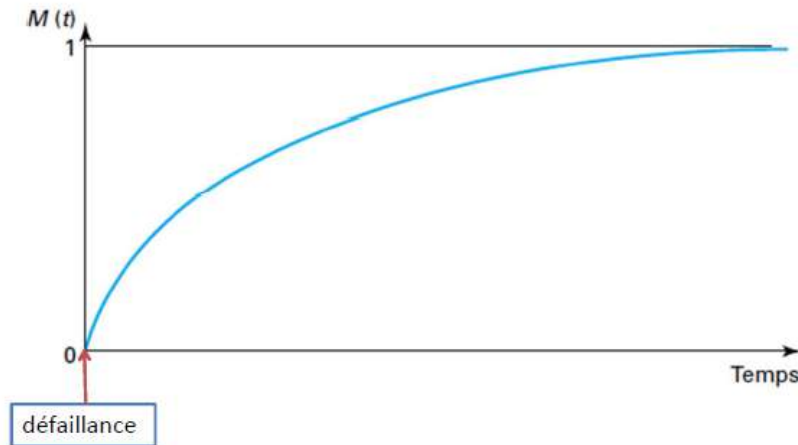


Figure II. 16 : Allure de la courbe de maintenabilité. [26]

C'est aussi la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. [23]

A partir de ces définitions, on distingue :

- ✚ **La Maintenabilité intrinsèque** : elle est « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges prenant en compte les critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc.).
- ✚ **La Maintenabilité prévisionnelle** : elle est également « construite », mais à partir de l'objectif de disponibilité.
- ✚ **La Maintenabilité opérationnelle** : elle sera mesurée à partir des historiques d'interventions.

L'analyse de maintenabilité permettra d'estimer la MTTR ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité (sur les mêmes modèles que la fiabilité). [23]

### II.7.8.1 Calcul de la maintenabilité :

La Maintenabilité se calcule par la formule suivante :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (\text{II. 28})$$



### II.7.9 Disponibilité :

#### II.7.9.1 Définition :

Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée.

Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance.

Les moyens extérieurs nécessaires autres que la logistique de maintenance n'affecte pas la disponibilité du bien (NF EN 13306). [23]

#### II.7.9.2 Quantification de la disponibilité :

La disponibilité peut se mesurer :

- a) sur un intervalle de temps donné (disponibilité moyenne),
- b) à un instant donné (disponibilité instantanée),
- c) à la limite, si elle existe, de la disponibilité instantanée lorsque  $t \rightarrow \infty$  (disponibilité asymptotique). [23]

#### II.7.9.3 Les types de Disponibilité :

##### a) Disponibilité intrinsèque ou asymptotique :

La disponibilité moyenne sur intervalle de temps donné peut être évaluée par le rapport suivant :

$$D = \frac{\sum \text{temps de bon fonctionnement}}{\sum \text{temps entre défaillances}} \quad (\text{II. 29})$$

$$D = \frac{MUT}{MUT + MTTR} = \frac{MUT}{MTBF} \quad (\text{II. 30})$$

##### b) Disponibilité instantanée :

La disponibilité instantanée (ou ponctuelle) est la probabilité qu'un système (ou un composant) soit opérationnel (en service) à un moment précis,  $t$ .

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \times e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (\text{II. 31})$$

##### c) Disponibilité opérationnelle :

Il s'agit de prendre en compte les conditions réelles d'exploitation et de maintenance. C'est la disponibilité du point de vue de l'utilisateur.

Le calcul de **Do** fait appel aux mêmes paramètres **MTBF**, **MTTR** et **MUT** sauf que ces 3 paramètres ne sont plus basés sur les conditions idéales de fonctionnement mais sur les conditions réelles (historiques d'exploitation). [27]

## II.8. Loi de Pareto et la courbe ABC :

### II.8.1. Origine de la méthode :

Elle est issue des travaux de Wilfred Pareto (1848-1923) économiste italien né à Paris. Il constata en étudiant la répartition de l'impôt foncier aux USA que 15% des contribuables payaient 85% du total. Depuis, cette méthode se nomme loi de Pareto, loi des 15-85 ou 20-80. [28]

### II.8.2. Diagramme de Pareto :

Parmi la multitude de préoccupations qui se posent à un responsable maintenance, il lui faut décider quelles défaillances doivent être étudiées et/ou améliorées en premier. Pour cela, il faut identifier celles qui sont les plus importantes et dont la résolution ou l'amélioration serait le plus rentable, en particulier en termes de coûts d'indisponibilité. La difficulté réside dans le fait que ce qui « est important » et ce qu'il « l'est moins » ne se distinguent pas toujours de façon claire. [13]

La loi de Pareto (appelé aussi loi des 20/80 ou la courbe ABC) apporte une réponse. Elle permet l'investigation qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités. [13]

### II.8.3. But de la méthode ABC :

En maintenance cette méthode est très utile pour déterminer les urgences ou les tâches les plus rentables, par exemple : [13]

- ✚ S'attacher particulièrement à la préparation des interventions sur les défaillances les plus fréquentes et/ou les plus coûteuses (documentation, gammes opératoires, contrats, ordonnancement, etc....).
- ✚ Rechercher les causes et les améliorations possibles pour ces mêmes défaillances.
- ✚ Organiser un magasin en fonction des fréquences de sortie des pièces (nombre de pièces et emplacement).
- ✚ Décider de la politique de maintenance à appliquer sur certains équipements en fonction des heures et des coûts de maintenance.

**Attention toutefois :** cette méthode ne résout pas les problèmes, mais elle attire l'attention du technicien sur les groupes d'éléments à étudier en priorité.

### II.8.4. Principe de la méthode « ABC » :

Cette méthode consiste à classer les problèmes par ordre d'importance en trois catégories afin de traiter chacune d'elles d'une manière différente. Elle permet donc au gestionnaire d'identifier les cibles d'actions prioritaires. [22]

#### II.8.4.1 Description de l'analyse :

- ✚ Recensement des pannes à partir de la date de mise en place du dossier historique.
- ✚ Classement des nombres de pannes par ordre décroissant.
- ✚ Calcul du cumul de ces valeurs à partir du plus haut.
- ✚ Calcul pour chaque valeur cumulée la valeur en %.
- ✚ Le rang relatif % des différentes pannes.
- ✚ Tracer la courbe correspondante aux couples de points ci-dessus sur un graphique à deux dimensions, abscisses et ordonnées en pourcentage (%) à la même échelle.
- ✚ Interprétation de la courbe et détermination des classes d'importance. [22]

#### II.8.4.2 Tracé de la Courbe ABC :

La courbe ABC permet de classer les équipements par ordre de priorité.

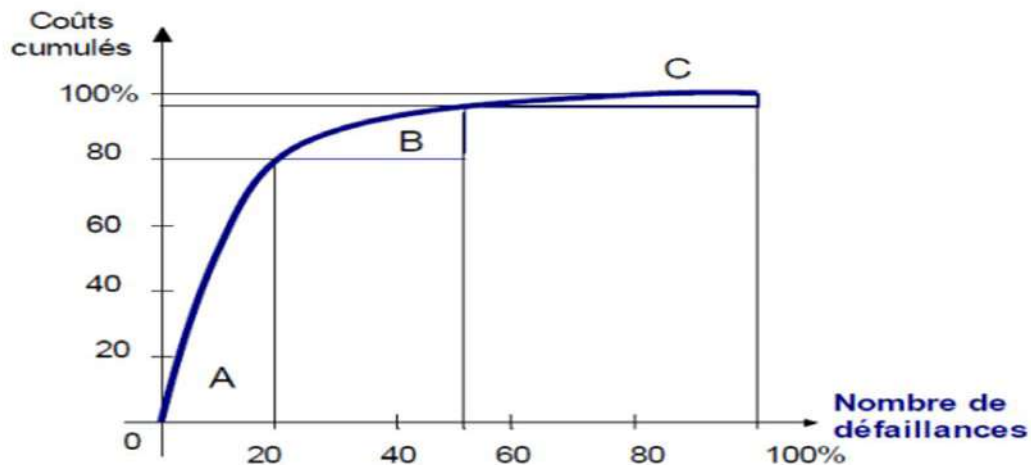


Figure II. 17 : Courbe ABC. [13]

Il est évident que la préparation des travaux de maintenance doit porter sur les pannes de la zone A.

## II.9. Diagramme Causes- Effets/ ishikawa / 5M :

### II.9.1. Définition :

Outil qui permet d'identifier les causes possibles d'un effet constaté et donc de déterminer les moyens pour y remédier. Cet outil se présente sous la forme d'arêtes de poisson classant les catégories de causes inventoriées selon la loi des 5 M (matière, main d'œuvre, matériel, Méthode, Milieu). [30]

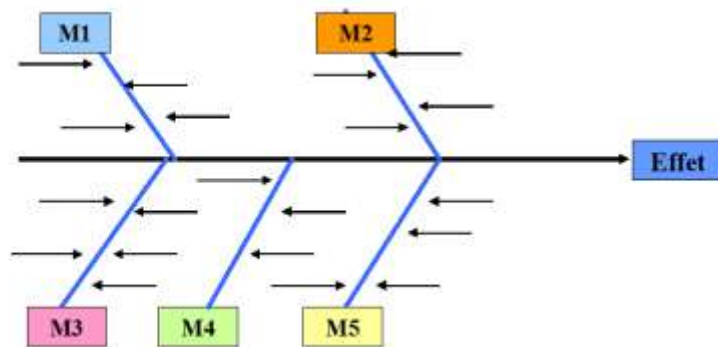


Figure II. 18 : diagramme Causes- Effets. [30]

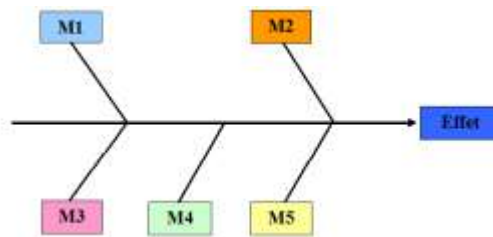
### II.9.2. Construction du diagramme :

- 1) Placer une flèche horizontalement pointée vers le problème identifié ou le but recherché. [30]



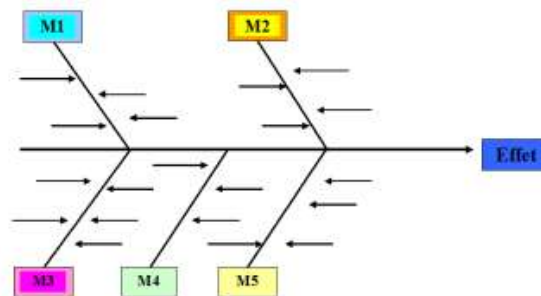
Prenons par exemple, une non vente ou l'amélioration d'un service

- 2) Regrouper les causes potentielles en familles, appelées communément les cinq M. [30]
  - + Matière : M1. Recense les causes ayant pour origine les supports techniques et les produits utilisés.
  - + Main d'œuvre : M2. Problème de compétence, d'organisation, de Management.
  - + Matériel : M3. Causes relatives aux Machines, aux équipements et Moyens concernés.
  - + Méthode : M4. Procédures ou modes opératoires utilisés.
  - + Milieu : M5. Environnement physique : lumière, bruit, poussière, localisation, signalétique etc.
- 3) Tracer les flèches secondaires correspondant au nombre de familles de causes potentielles identifiées, et les raccorder à la flèche principale. [30]



Chaque flèche secondaire identifie une des familles de causes potentielles.

- 4) Inscrire sur des mini flèches, les causes rattachées à chacune des familles. Il faut veiller à ce que toutes les causes potentielles apparaissent. [30]
- 5) Rechercher parmi les causes potentielles exposées, les causes réelles du problème identifié. Ce sera notamment la cause la plus probable qu'il restera à vérifier dans la réalité et à corriger. [30]



## II.10. Les coûts de maintenance :

Les coûts de maintenance représentent l'ensemble des dépenses engagées pour maintenir en état de fonctionnement un système complexe. Bien souvent ils sont associés à des exigences de fonctionnement en termes de sécurité, de fiabilité ou encore de disponibilité. [31]

L'analyse des coûts permet au responsable de la politique de maintenance d'effectuer ses choix principaux [31] :

- ✚ Etablissement d'un budget prévisionnel annuel.
- ✚ Suivi des dépenses et respect du budget.
- ✚ Niveau de maintenance préventive à mettre en œuvre.
- ✚ Vérification de l'efficacité des actions de maintenance.
- ✚ Renouvellement du matériel.

La décomposition des coûts de maintenance est schématisée dans la **Figure II. 19** .

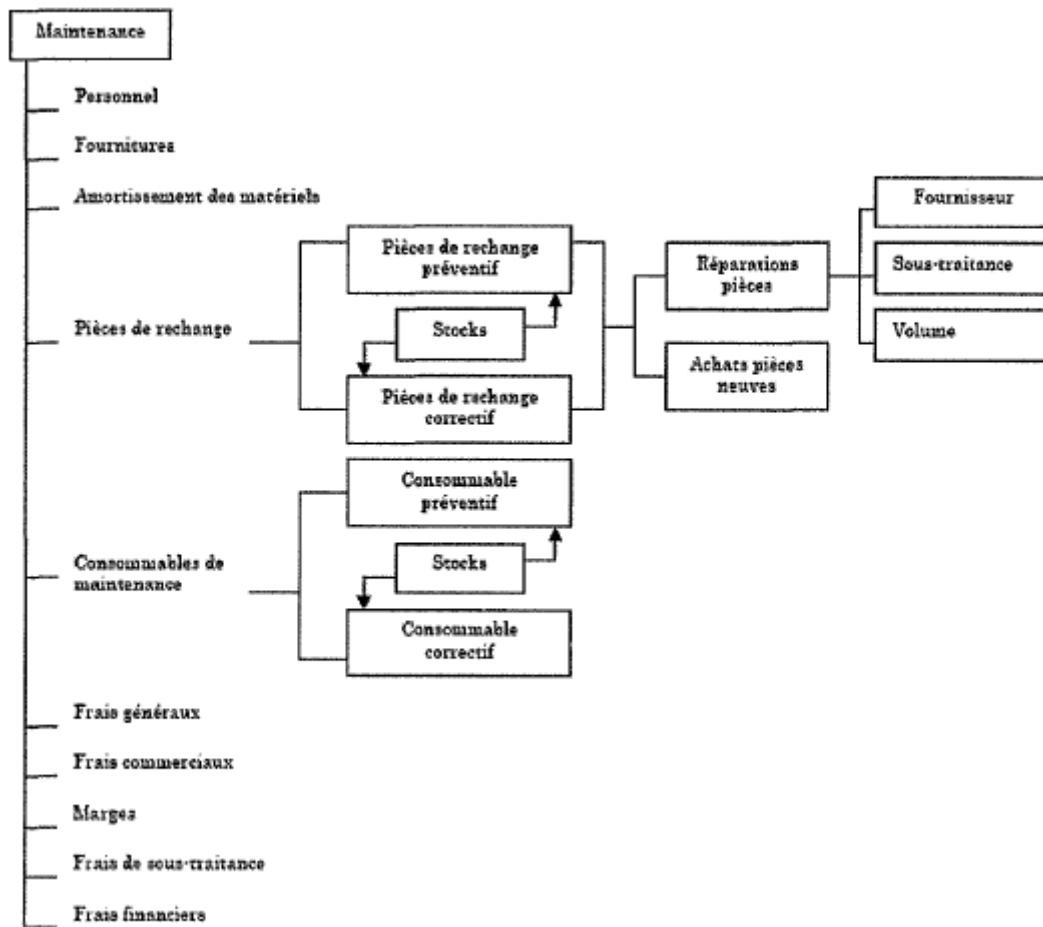


Figure II. 19 : Décomposition des coûts de maintenance. [31]

Partant de ce graphique, les dépenses relatives à la maintenance peuvent être associées à deux catégories : les coûts directs de maintenance et les coûts indirects de maintenance. [31]

### II.10.1. Les coûts directs de maintenance ( $C_m$ ) :

Ils peuvent se rapporter à une intervention corrective ( $C_{mc}$ ), préventive ( $C_{mp}$ ) ou externalisée ( $C_{me}$ ). Les coûts directs de maintenance ( $C_m$ ) sont constitués des éléments suivants [31] :

- 1) Coûts de main d'œuvre.
- 2) Frais généraux du service maintenance.
- 3) Coûts de possession des stocks, des outillages et des machines.
- 4) Consommation de matières, de fournitures, de produits utilisés.
- 5) Consommation des pièces de rechange.
- 6) Coûts des contrats de maintenance.
- 7) Coûts des travaux sous-traités.

**II.10.1.1. Coûts de main d'œuvre :**

Les couts de main d'oeuvre correspondent au produit « **temps passés × taux horaire de maintenance** ».

$$C_{mo} = MTTR \times \tau_1 \quad (\text{II. 33})$$

Les temps passés sont saisis par les techniciens de maintenance sur les bons de travail. Le taux horaire de maintenance exprimé en (la monnaie du pays concerné / heure) est fourni par la comptabilité. Ce taux est évidemment fonction de la qualification de l'intervenant, mais également de la politique sociale de l'entreprise. Ceci explique que ce taux varie pour un même technicien employé dans des structures différentes. [31]

Il est alors possible de regrouper les coûts directs de maintenance en 4 rubriques [31] :

$C_{mo}$  : dépenses de main d'œuvre.

$C_f$  : dépenses fixes du service maintenance.

$C_{PDR}$  : dépenses de pièces de rechange.

$C_e$ : dépenses externalisées.

$$C_m = C_{mo} + C_f + C_{PDR} + C_e \quad (\text{II. 34})$$

**II.10.2. Les coûts d'indisponibilité ( $C_i$ ) :**

Les coûts indirects de maintenance peuvent aussi être nommés coûts indirects de disponibilité ou coûts indirects d'arrêt de production. Ces coûts intègrent toutes les conséquences économiques induites par l'arrêt d'un équipement requis. [31]

- 1) Perte de production  $C_p$ .
- 2) Coûts de la main d'oeuvre de production.
- 3) Coûts des arrêts induits.
- 4) Coûts des rebuts, de la non-qualité et des délais non tenus.
- 5) Frais de redémarrage de production.
- 6) Coûts induits en cas d'accident corporel. [31]

**II.10.2.1. Perte de production  $C_p$  :**

Il est évident que, pendant l'arrêt d'une ligne de production, non seulement les produits non fabriqués ne peuvent être commercialisés, mais plus encore, ils sont vendus par la concurrence. Il est possible d'estimer les pertes de production par [31] : « **temps d'indisponibilité ( $T_i$ ) × taux horaire de non production ( $\tau$ )** ».

$$C_p = T_i \times \tau_2 \quad (\text{II. 35})$$

$T_i$  est le temps de l'indisponibilité relevé pendant une période où l'équipement défaillant est requis. Le taux horaire, exprimé en (la monnaie du pays concerné / heure), est déterminé pour l'équipement considéré. Il dépend majoritairement de la criticité de l'équipement à l'intérieur de l'ensemble du système de production. [31]

### II.10.3. Les coûts de défaillance ( $C_d$ ) :

Les coûts de défaillance résultent des coûts directs et indirects d'une ou d'un cumul de défaillances relatives à un équipement [31].

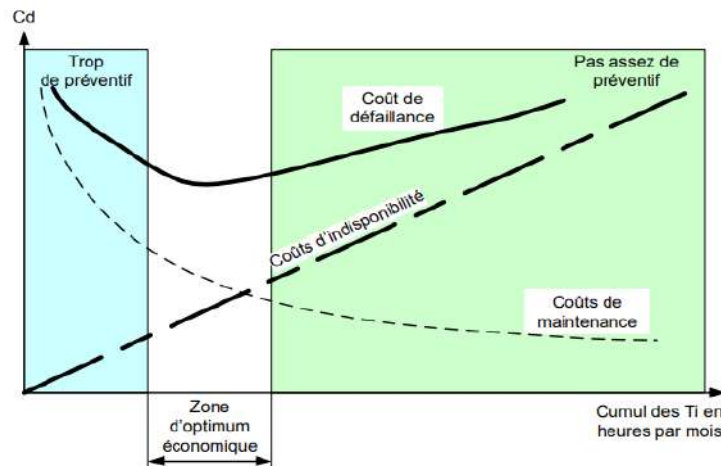
$$C_d = C_m + C_i \quad (\text{II. 36})$$

$C_d$  : Coûts de défaillance : résultant des coûts directs et indirects d'une ou un cumul de défaillances relatives à un équipement.

$C_m$  : Coûts directs de maintenance : de manière simple, ce sont les pièces de rechange et la main d'œuvre.

$C_i$  : Coûts d'indisponibilité : c'est le cumul de toutes les conséquences indirectes induites par l'indisponibilité propre d'un équipement.

La **figure II. 20** montre que les couts directs et indirects de maintenance varient dans des sens opposés, dans la mesure où la diminution des temps d'indisponibilité est le résultat d'une maintenance préventive plus importante et plus efficace. [31]



**Figure II. 20:** Evolution des coûts de défaillance. [31]

La **figure II. 20** met en évidence la linéarité des coûts d'indisponibilité. Une maintenance préventive peu développée entraîne des coûts indirects, dus aux arrêts de production, trop importants. Inversement, trop de préventif entraîne des coûts directs, dus à des investissements humains et matériels, trop importants. [31]



Cependant le graphique montre également qu'il existe un optimum au niveau des coûts de défaillance. L'objectif est donc d'optimiser le plan de maintenance préventive en cherchant un équilibre entre les coûts directs et indirects et donc, entre la disponibilité des équipements et les coûts de maintenance. [31]

### **II.11. Conclusion :**

Pour assurer la fonction maintenance, il faut savoir analyser les défaillances rencontrées, c'est-à-dire avoir un retour d'expérience complet et fidèle permettant de trouver la cause première de la défaillance. Il faut être capable de juger si la défaillance est due à la fiabilité intrinsèque d'un composant (c'est-à-dire à sa conception) ou si elle provient d'un non-respect des conditions d'utilisation de maintenance ou d'une erreur humaine.

# **CHAPITRE III**

**Etude de Fiabilité de pompe à boue de  
chantier pétrolier**

### III.1. Introduction :

On va procéder dans ce chapitre, à l'analyse des données et l'exploitation des informations recueillies du système SAP de l'entreprise nationale de forage, qui concernent l'historique des pannes d'une pompe à boue 12P160 du chantier ENAFOR47 et ceci sur une période de 3 ans (2018,2019, et 2020).

Les outils d'analyse seront comme suit :

- ✚ Un calcul de fiabilité, ainsi que ses indicateurs, et un calcul de la maintenabilité et de la disponibilité.
- ✚ Une analyse par la loi des 20-80 ou la loi de PARETO pour les composants de la pompe sera effectuée, l'analyse des données d'historique de pannes pourra déceler les organes les plus pénalisants en termes de défaillance.
- ✚ le diagramme d'Ishikawa des causes effets des organes les plus pénalisant sera présenté après l'analyse Pareto, ce diagramme qui est un outil de gestion, d'aide à la décision , permettra de Repérer les causes sur lesquels l'entreprise peut agir et l'orienter dans les actions qu'elle doit mener en priorité pour régler les problèmes et dysfonctionnements.

### III.2. Historique des pannes avec TTR et TBF et UT :

Une première étape a consisté en un traitement des données de l'historique des pannes gérées par le système SAP.

Le système SAP de l'entreprise nationale de forage regroupe des milliers de données sur les défaillances enregistrées sur l'ensemble des chantiers et ceci pour tous les organes des appareils de forage. le traitement des données a été délicat et a nécessité beaucoup de temps et une aide précieuse du personnel de l'ENAFOR pour pouvoir faire le choix de la pompe à étudier. une fois la collecte de données est faite on procède à l'exploitation comme suit.

L'utilisation des données de l'historique, qui sont les dates de début et de fin des pannes, ainsi que les durées respectives consacrées aux différentes réparations nous ont permis de dresser le tableau ci-dessous, en suivant les étapes suivantes :

- ✚ Le calcul du temps de bon fonctionnement pur en heures (UT), donné comme suit :
- ✚  $UT = ([Date\ du\ prochain\ arrêt] - [Date\ de\ la\ remise\ en\ service\ après\ l'arrêt\ précédent])$ .
- ✚ Le calcul des heures de fonctionnement entre pannes (TBF), qui peut être exprimé par la différence entre deux pannes successives. Il est donné par l'expression suivante :

$$TBF1 = ([Date\ et\ heure\ du\ prochain\ arrêt] - [Date\ et\ heure\ du\ début\ d'arrêt]) \times 24h.$$

Tableau III. 1: Historique de pannes de la pompe à boue (SAP ENAFOR).

Début panne	Heure Début Panne	Fin de la panne	Heure Fin Panne	TTR (h)	UT (h)
14-10-2018	13:00:00	14-10-2018	19:00:00	6.00	624
09-11-2018	00:00:00	09-11-2018	23:28:20	23.50	48
11-11-2018	08:15:00	11-11-2018	08:45:00	0.5	24
12-11-2018	00:00:00	12-11-2018	13:45:54	13.75	48
14-11-2018	07:30:00	14-11-2018	08:30:00	1.5	24
	17:30:00		18:00:00		
15-11-2018	07:30:00	15-11-2018	08:30:00	1	648
12-12-2018	07:00:00	12-12-2018	14:34:29	7.5	792
14-01-2019	07:00:00	14-01-2019	14:59:27	8.00	1680
25-03-2019	07:00:00	25-03-2019	15:48:33	9.00	744
25-04-2019	13:30:00	25-04-2019	21:30:00	8.00	24
26-04-2019	13:32:18	26-04-2019	00:00:00	10.50	216
05-05-2019	07:00:00	05-05-2019	13:00:00	6.00	672
02-06-2019	07:00:00	02-06-2019	17:40:40	11.00	1968
23-08-2019	07:00:00	23-08-2019	11:00:00	4.00	264
03-09-2019	01:30:00	03-09-2019	02:30:00	1.00	2088
29-11-2019	07:00:00	29-11-2019	18:17:51	11.25	72
02-12-2019	00:00:00	02-12-2019	00:30:00	0.50	96
06-12-2019	07:00:00	06-12-2019	17:33:39	10.50	168
13-12-2019	09:00:00	13-12-2019	12:00:00	3.00	96
17-12-2019	14:00:00	17-12-2019	15:00:00	1.00	24
18-12-2019	11:00:00	18-12-2019	13:30:00	3.25	48
	22:30:00		23:15:00		
20-12-2019	13:30:00	20-12-2019	14:30:00	1.00	1440
18-02-2020	10:00:00	18-02-2020	12:00:00	2.00	72
21-02-2020	12:00:00	21-02-2020	12:45:00	0.75	144
27-02-2020	08:30:00	27-02-2020	00:00:00	7.75	72
	07:42:28		00:00:00		
01-03-2020	09:34:15	01-03-2020	00:00:00	2.5	384
17-03-2020	09:05:43	17-03-2020	10:20:00	1.25	216
26-03-2020	16:48:45	26-03-2020	17:48:00	1	1536
29-05-2020	07:00:00	29-05-2020	09:00:00	2	120
03-06-2020	08:00:00	03-06-2020	10:00:00	2	1008
15-07-2020	15:00:00	15-07-2020	16:00:00	1.5	648
	20:00:00		20:30:00		
11-08-2020	08:00:00	11-08-2020	09:00:00	1	984
21-09-2020	07:00:00	21-09-2020	16:47:40	10	120
26-09-2020	07:00:00	26-09-2020	17:59:35	11	216
05-10-2020	08:00:00	05-10-2020	10:00:00	2	24
06-10-2020	06:00:00	06-10-2020	07:00:00	2.5	24
	20:30:00		22:00:00		
07-10-2020	08:00:00	07-10-2020	09:00:00	3	1536
	14:30:00		16:30:00		
10-12-2020	08:00:00	10-12-2020	11:00:00	3	432
28-12-2020	08:00:00	28-12-2020	10:00:00	2	168
04-01-2021	03:00:00	04-01-2021	04:00:00	1	24

### III.3. Calcul des indicateurs de fiabilité :

Les indicateurs de fiabilité qui seront calculés dans ce qui suit seront la MTBF, MUT, MTTR, la disponibilité et le taux de réparation.

#### III.3.1 Calcul du M.T.B.F :

$$MTBF = \frac{\Sigma TBF}{N} = \frac{19710}{40} = 492.8 \approx 493 \text{ heures}$$

#### III.3.2 Calcul du M.U.T :

$$MUT = \frac{\Sigma UT}{N} = \frac{19512}{40} = 487.8 \approx 488 \text{ heures}$$

#### III.3.3 Calcul de la disponibilité D :

$$D = \frac{\Sigma UT}{\Sigma TBF} = \frac{19512}{19710} = 0.98 \approx 98\%$$

On remarque que la pompe possède une disponibilité élevée, ce qui indique que les travaux de maintenance et de réparation sont efficaces. Ceci est dû d'un côté, aux contraintes du forage pétrolier qui exigent que le puit fonctionne 24h sur 24, et de l'autre côté l'arrêt de la pompe présente un coût d'indisponibilité qui s'ajoute au cout de maintenance ce qui augmentera le cout de défaillance.

#### III.3.4 Calcul du MTTR :

$$MTTR = \frac{\Sigma TTR}{N} = \frac{198}{40} = 4.95 \approx 5 \text{ heures}$$

On vérifie bien que le temps de réparation est relativement faible.

#### III.3.5 Calcul du taux de réparation $\mu$ :

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{5} = 0.2 \frac{1}{\text{heures}}$$

Une bonne maintenabilité a été obtenue ( $\mu(t)$ ) a été obtenue car le dispositif est maintenable et donc facile et amovible. Disponibilité des pièces détachées. Disposer des outils, des plans et de la logistique nécessaires à l'intervention ; procédures de travail (périmètre d'exploitation); Fournit des conceptions d'accès d'intervention (démontage et remontage); Fournir une main-d'œuvre technique qualifiée.

III.4. Méthode de l'actuariat :

$$r = 1 + 3.3(\log \sum_{i=1}^n (ni)) \text{ (Règle de sturgrs).}$$

$$r = 1 + 3.3(\log(41)) = 6.32$$

On bien :

$$r = \sqrt{\sum_{i=1}^n (ni)} = \sqrt{40} = 6.32$$

Donc le nombre de classe r = 6.

Calcul de l'intervalle des temps (ΔT) dans chaque classe :

$$\Delta T = \frac{UT_{max}}{r} \tag{III. 1}$$

$$\Delta T = \frac{2088}{6} = 348 \text{ heures}$$

Distribution des pannes par classe :

Nous avons calculé le nombre des pannes dans chaque intervalle ΔT pour construire l'histogramme.

Tableau III. 2 : distribution des pannes la pompe à boue par classe.

N°= de classe	Intervalle ΔT (heures)	Nombre de panne a l'intervalle
1	[0, 348[	24
2	[ 348 , 696[	6
3	[ 696, 1044[	4
4	[ 1044, 1392[	1
5	[ 1392, 1740[	3
6	[ 1740, 2088]	2

Histogramme des pannes :

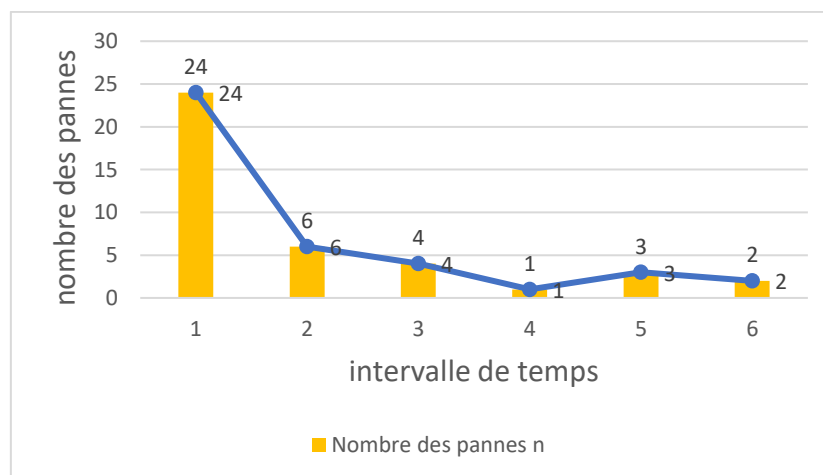


Figure III. 1 : histogramme du nombre de pannes dans l'intervalle de temps (pompe à boue).

D'après l'allure de l'histogramme des pannes, on peut énoncer que la distribution des pannes du pompe à boue suit une loi exponentielle et Weibull ce qui reste à vérifier par les tests d'équation Pour tracer les courbes, on doit chercher tout d'abord le nombre des pannes au milieu de l'intervalle.

$$n_i(moy) = \frac{n_i}{2} + \sum n_{(i-1)} \quad (III. 2)$$

La probabilité de défaillance est :

$$F(t_{moy}) = \frac{n(moy)}{N^\circ} \quad (III. 3)$$

Calcul de probabilité de bon fonctionnement :

$$R(t_{moy}) = 1 - \frac{n(moy)}{N^\circ} \quad (III. 4)$$

La densité de probabilité s'écrit comme suit :

$$f(t_{moy}) = \frac{n(\Delta t)}{N^\circ \Delta t} \quad (III. 5)$$

$N^\circ$  : nombre de pannes total.

$\Delta t$  : La valeur de l'intervalle de temps.

$N^\circ = 40$ .

$\Delta t = 348 \text{ heures}$ .

Calcul de l'intensité des pannes (taux de défaillance) :

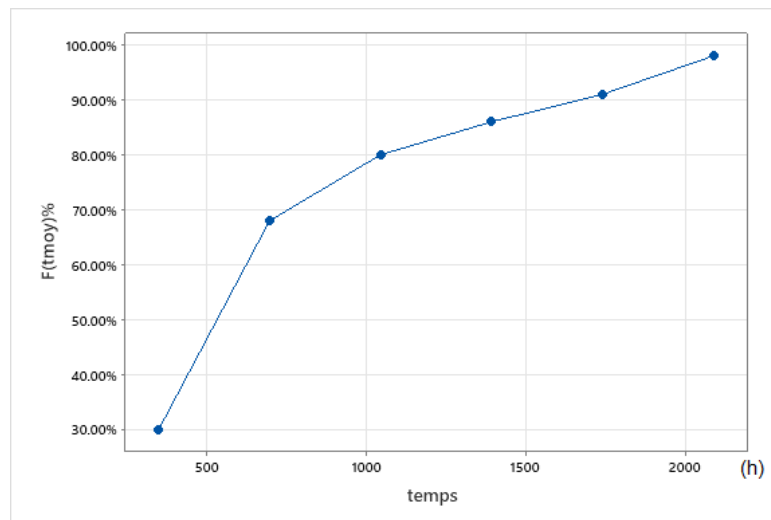
$$\lambda(t_{moy}) = \frac{f(t_{moy})}{R(t_{moy})} \quad (III. 6)$$

Donc nous avons dressé le tableau suivant :

**Tableau III. 3** : Tableau des résultats (pompe à boue).

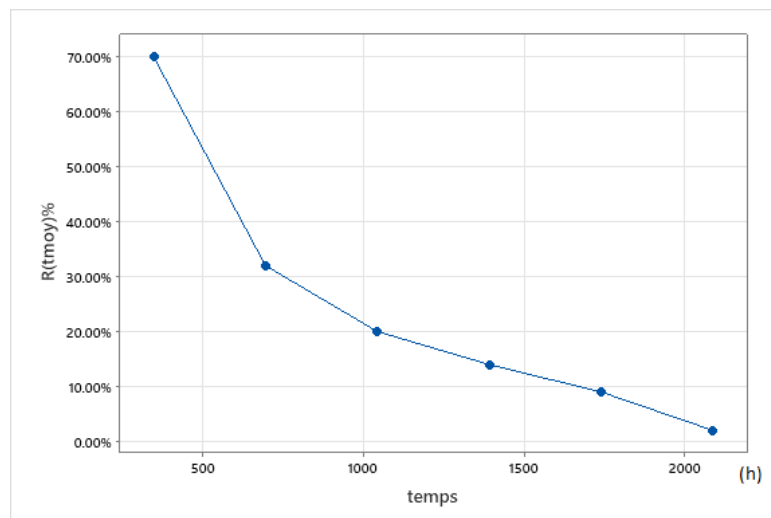
N°	Intervalle $\Delta T$ (heures)	Le milieu intervalle ( $t_{moy}$ )	Nombre des pannes ( $n_i$ )	Nombre de pannes moyen ( $n_{moy}$ )	$F(t_{moy})$	$R(t_{moy})$	$f(t_{moy})$	$\lambda(t_{moy})$
1	[ 0, 348[	174	24	12	30%	70%	1.72E-03	2.46E-03
2	[348, 696[	522	6	27	68%	32%	4.31E-04	1.35E-03
3	[ 696, 1044[	870	4	32	80%	20%	2.87E-04	1.44E-03
4	[ 1044, 1392[	1218	1	34.5	86%	14%	7.18E-05	5.13E-04
5	[ 1392, 1740[	1566	3	36.5	91%	9%	2.16E-04	2.4E-03
6	[ 1740, 2088]	1914	2	39	98%	2%	1.44E-04	7.2E-03

D'après le tableau nous avons tracé les courbes suivantes :



**Figure III. 2 :** fonction de défaillance (pompe à boue).

Courbe croissante ce qui est en accord avec l'étude théorique de la loi exponentielle et Weibull.



**Figure III. 3:** fonction de fiabilité (pompe à boue).

Courbe décroissante en accord avec l'étude théorique de la loi exponentielle et Weibull.



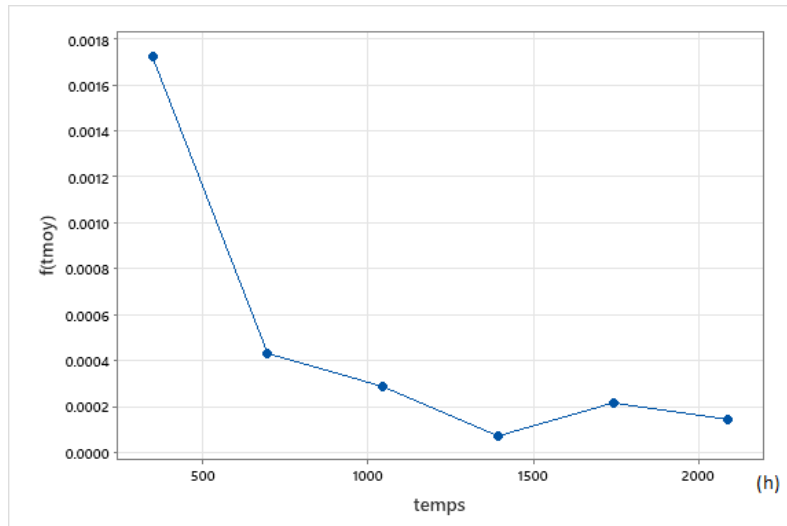


Figure III. 4 : fonction de répartition densité de probabilité (pompe à boue).

Courbe décroissante ce qui est en accord avec l'étude théorique de la loi exponentielle et Weibull.

Nous avons décidé d'appliquer la loi de Weibull pour les quatre figures.

### III.5. Utilisation la loi de Weibull :

La méthode de l'actuariat nous a orienté sur le choix de la loi à appliquer, étant donné que le taux de défaillance a présenté une allure décroissante en fonction du temps, on appliquera la loi de Weibull pour faire un calcul de fiabilité pour la pompe à boue en question, cette loi qui est bien justifiée pour les équipements mécaniques et électromécaniques.

#### III.5.1. Tracé de la droite de WEIBULL :

Le **Tableau III. 2** comporte les valeurs du temps de bon fonctionnement UT de la pompe à boue classées par ordre croissant, et les F(i) calculés par la méthode des rangs moyens

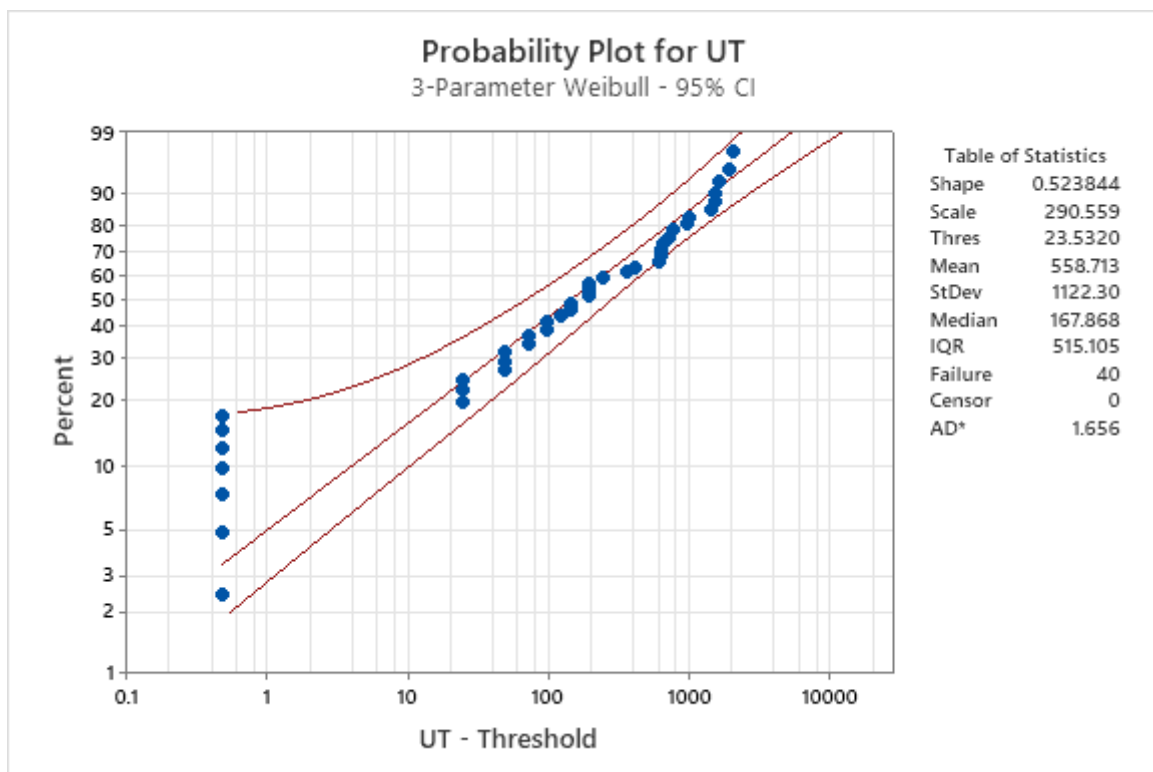
$$F(i) = \frac{\sum n_i}{N + 1} \text{ (Dans notre cas } 20 < N = 40 < 50 \text{)}$$

Ces données permettent de tracer la courbe de WEIBULL (**Figure III. 5**), et d'en déduire graphiquement les paramètres de WEIBULL ( $\beta, \eta, \gamma$ ), à partir du logiciel MINITAB.

**Tableau III. 4 :** Tableau des valeurs du temps de bon fonctionnement UT de la pompe à boue.

N°	UT (h)	N	$\sum n_i$	F(i)
1	24	7	7	0.1707
2	48	3	10	0.2439
3	72	3	13	0.3170
4	96	2	15	0.3659
5	120	2	17	0.4146
6	144	1	18	0.4390

7	168	2	20	0.4878
8	216	3	23	0.5609
9	264	1	24	0.5854
10	384	1	25	0.6098
11	432	1	26	0.6341
12	624	1	27	0.6585
13	648	2	29	0.7073
14	672	1	30	0.7317
15	744	1	31	0.7560
16	792	1	32	0.7805
17	984	1	33	0.8049
18	1008	1	34	0.8293
19	1440	1	35	0.8537
20	1536	2	37	0.9024
21	1680	1	38	0.9268
22	1968	1	39	0.9512
23	2088	1	40	0.9756



**Figure III. 5 :** Diagramme de probabilité de Weibull pour la disponibilité (pompe à boue).

D'après le graphe de Weibull les données sont presque alignées, ce qui permet de conclure que le premier paramètre est nul  $\gamma = 0$ , les autres paramètres seront d'après le graphe :

$$\beta = 0.523844, \eta = 290.559 \text{ heures et } \gamma = 23.5320$$

Les fonctions de fiabilité théoriques seront donc données par les formules suivantes :

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

$$F(t) = 1 - R(t)$$

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

### III.5.2. Test d'adéquation :

Le test d'adéquation permet de justifier le choix de la loi choisie, celle de WEIBULL pour notre cas. Admettons un risque d'erreur ( $\alpha=0.05$ ) [voir ANNEXE 01].

L'écart point par point entre les deux fonctions de répartition est donné par :

$$\Delta D_i = F(i) - F(t)$$

$F(t)$ : fonction théorique.

$F(i)$ : fonction de répartition réelle.

Selon le tableau d'ANNEXE 01 on trouve :

$$Dn.\alpha = \frac{1.36}{\sqrt{40}} = 0.2150.$$

$|F(i) - F(t)|$ , est l'erreur absolue entre la fonction réelle et fonction théorique et  $Dn.\alpha$  l'erreur de référence, dans le tableau de Kolmogorov-Smirnov.

- Dressons le tableau qui nous permet de faire la comparaison.

**Tableau III. 5 :** comparaison des erreurs entre la fonction de répartition théorique et réelle (pompe à boue).

N°	UT (h)	F(i)	R(t)	F(t)	F(i)-F(t)
1	24	0.1707	0.9661	0.0339	0.1368
2	48	0.2439	0.7607	0.2393	0.0046
3	72	0.3170	0.6761	0.3239	0.0069
4	96	0.3659	0.6168	0.3832	0.0173
5	120	0.4146	0.5705	0.4295	0.0149
6	144	0.4390	0.5323	0.4677	0.0287
7	168	0.4878	0.4998	0.5002	0.0124
8	216	0.5609	0.4467	0.5533	0.0076
9	264	0.5854	0.4043	0.5957	0.0103
10	384	0.6098	0.3264	0.6736	0.0638
11	432	0.6341	0.3026	0.6974	0.0633
12	624	0.6585	0.2316	0.7684	0.1099
13	648	0.7073	0.2247	0.7753	0.0680
14	672	0.7317	0.2181	0.7819	0.0502
15	744	0.7560	0.2001	0.7999	0.0439
16	792	0.7805	0.1893	0.8107	0.0302
17	984	0.8049	0.1540	0.8460	0.0411
18	1008	0.8293	0.1503	0.8497	0.0204

19	1440	0.8537	0.1010	0.8990	0.0453
20	1536	0.9024	0.0932	0.9068	0.0044
21	1680	0.9268	0.0846	0.9154	0.0114
22	1968	0.9512	0.0667	0.9333	0.0179
23	2088	0.9756	0.0612	0.9388	0.0368

D'après ce tableau on voit bien que  $\Delta D_{max} = 0.1368$  donc :

$$\Delta D_{max} = 0.1368 < Dn. \alpha = 0.2150$$

Par conséquent nous avons pu conclure que la loi WEIBULL est adéquate pour la distribution des pannes de la pompe à boue.

### III.5.3. Exploitation des paramètres de WEIBULL (pompe à boue) :

**III.5.3.1 Calcul du MUT :** L'expression du temps (h) de bon fonctionnement MUT est donnée par :

$$MUT = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

$$MUT = \gamma + \eta a$$

$$MUT = \gamma + \eta a = 23.5320 + (290.559)(1.7024) = 518.18 \approx 518 \text{ heures,}$$

avec  $\beta = 0.52$ ;  $A = 1.7024$ ;  $B = 3.35$  (ANNEXE 02).

**III.5.3.2 Calcul de la densité de probabilité en fonction du MUT :**

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

$$f(t = MUT) = \frac{0.523844}{290.559} \left( \frac{518 - 23.5320}{290.559} \right)^{0.523844-1} \times e^{-\left( \frac{518-23.5320}{290.559} \right)^{0.523844}} = 0.0004$$

**III.5.3.3 Calcul de la fonction de répartition en fonction de MUT :**

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

$$F(MUT) = 1 - e^{-\left( \frac{518-23.5320}{290.559} \right)^{0.523844}} = 0.7332 = 73\%$$

**III.5.3.4 Calcul de la fiabilité en fonction du MUT :**

$$R(t = MUT) = 1 - F(t = MUT)$$

$$R(t = MUT) = 1 - 73\% = 27\%$$

**III.5.3.5 Calcul du le taux de défaillance en fonction de MUT :**

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

$$\lambda(MUT) = \frac{0.523844}{290.559} \left( \frac{518 - 23.5320}{290.559} \right)^{0.523844-1} = 0.0014 \text{ panne/heures}$$

**III.5.3.6 Calcul du temps souhaitable pour une intervention systématique :**

$$R(t) = 89\% \quad t = ?$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \tag{III. 7}$$

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

$$T = 290.559 \left[ \ln\left(\frac{1}{0.89}\right) \right]^{\frac{1}{0.523844}}$$

$$t_{sys} = 5 \text{ heures}$$

Pour garder la fiabilité à 89% il faut intervenir chaque temps systématique 5 h.

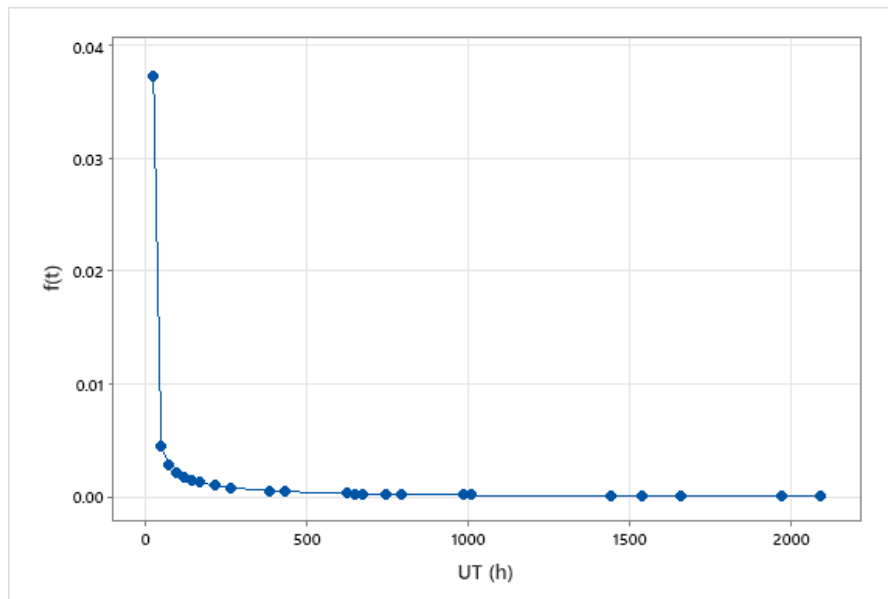
**III.5.4. Tracé des fonctions de fiabilité du modèle de WEIBULL pour la pompe à boue :**

**Tableau III. 6 :** Tableau Fonctions de fiabilité R(t), F(t), f(t) et λ (t) pour la pompe à boue.

N°	UT (h)	R(t)	F(t)	f(t)	λ(t)
1	24	0.9662	0.0338	0.03723	0.03854
2	48	0.7607	0.2393	0.00446	0.00586
3	72	0.6761	0.3239	0.00286	0.00423
4	96	0.6168	0.3832	0.00215	0.00349
5	120	0.5705	0.4295	0.00174	0.00305
6	144	0.5323	0.4677	0.00146	0.00274
7	168	0.4998	0.5002	0.00126	0.00251
8	216	0.4467	0.5533	0.00098	0.00219
9	264	0.4043	0.5957	0.00080	0.00197
10	384	0.3264	0.6736	0.00053	0.00163
11	432	0.3026	0.6974	0.00046	0.00153
12	624	0.2316	0.7684	0.00030	0.00128
13	648	0.2247	0.7753	0.00028	0.00125
14	672	0.2181	0.7819	0.00027	0.00123
15	744	0.2001	0.7999	0.00023	0.00117
16	792	0.1893	0.8107	0.00021	0.00113
17	984	0.1540	0.8460	0.00016	0.00102
18	1008	0.1503	0.8497	0.00015	0.00101
19	1440	0.1010	0.8990	0.00009	0.00085
20	1536	0.0932	0.9068	0.00008	0.00082
21	1680	0.0846	0.9154	0.00007	0.00079
22	1968	0.0667	0.9333	0.00005	0.00073
23	2088	0.0612	0.9388	0.00004	0.00071

**III.5.4.1. Courbe de la fonction de la densité de probabilité :**

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \times \exp - \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta} \text{ Ou } f(t) = \lambda(t) \cdot R(t)$$

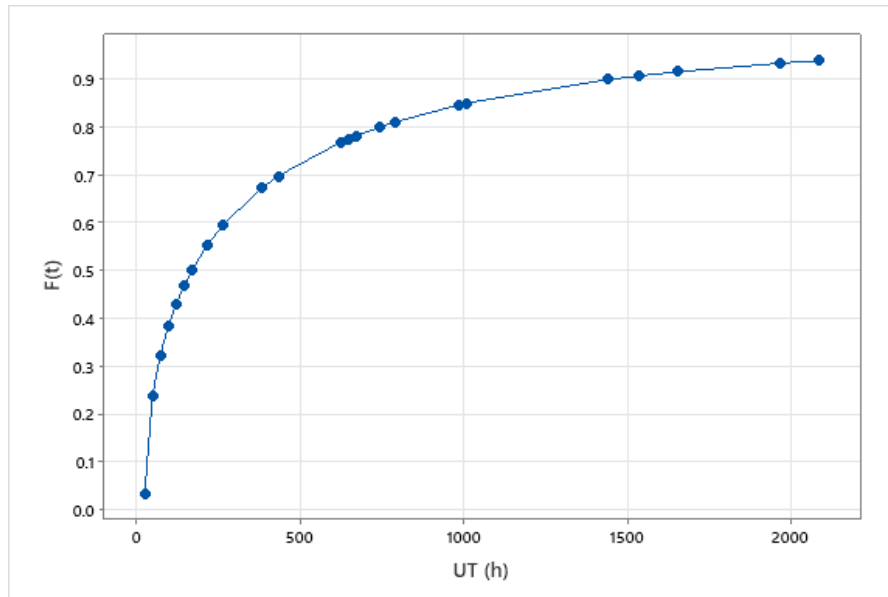


**Figure III. 6 :** La courbe de la densité de probabilité (pompe à boue).

**Interprétation :** D'après cette courbe on remarque que la fonction f(t) (densité de probabilité) diminue avec l'évaluation de UT.

**III.5.4.2. Courbe de la fonction de répartition F(t) :**

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

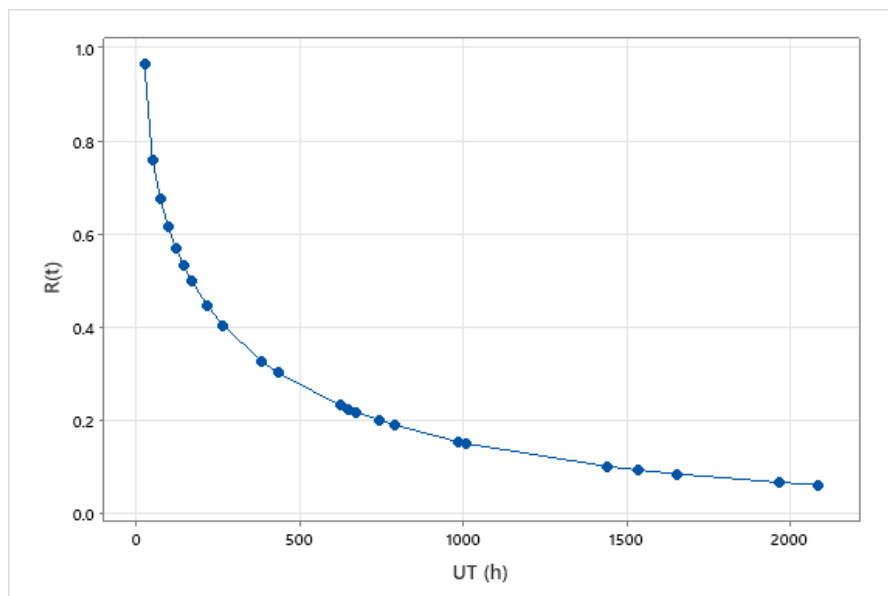


**Figure III. 7 :** La courbe de fonction répartition (pompe à boue).

**Interprétation :** La fonction de défaillance est croissante exponentiellement en fonction du temps, pour  $t = UT, F(MUT) = 0.7332 = 73\%$ .

#### III.5.4.3. Courbe de la fiabilité R(t) :

La fonction fiabilité  $R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right)$ , décroît exponentiellement en fonction du temps.  
Pour  $t = MUT, R(t = MUT) = 0.2668$ .



**Figure III. 8 :** La Courbe de fonction fiabilité (pompe à boue).

**Interprétation :** Le graphe décroissant de la fiabilité en fonction de temps se fait expliqué par le fait du phénomène de dégradation.

III.5.4.4. Courbe du taux de défaillance  $\lambda(t)$  :

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

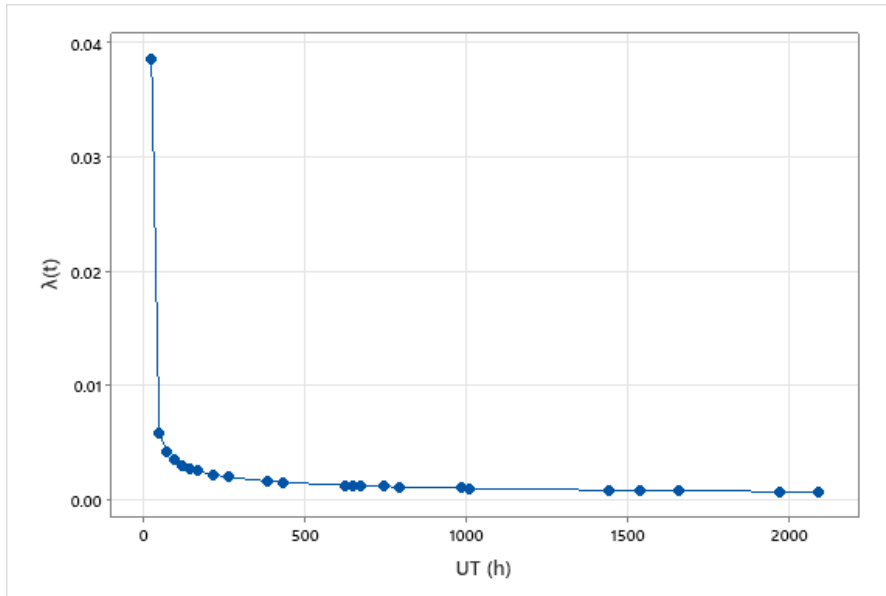


Figure III. 9 : La Courbe Du taux de défaillance (pompe à boue).

**Interprétation :** Courbe décroissante ce qui est en accord avec l'étude théorique de la loi exponentielle et Weibull.

Tableau III. 7 : Attributs de sûreté de fonctionnement pour les lois usuelles.

loi aléatoire	application fiabilité	loi exponentielle	loi normale	loi de Weibull
fonction répartition	$\bar{R}(t)$	$1 - exp^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-1/2((\frac{t-m}{\sigma})^2)}$	$1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\sigma}\right)^\beta}$
taux défaillance		$\lambda$	$U(t)/R(t)$	$\frac{\beta(t-\gamma)t^{\beta-1}}{\sigma^\beta}$
$F(t) = \bar{R}(t)$				
$\lambda(t)$				

III.6. Calcul et tracé de la courbe de Maintenabilité de la pompe à boue :

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

D'après l'historique des pannes :  $MTTR = 5$  heures

avec  $\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{5} = 0.2$  intervention/heure

Tableau III. 8 : Tableau La maintenabilité (pompe à boue).



N°	TTR	M(t)	N°	TTR	M(t)
1	0.5	0.0952	21	3	0.4512
2	0.5	0.0952	22	3	0.4512
3	0.75	0.1393	23	3	0.4512
4	1	0.1813	24	3.25	0.4780
5	1	0.1813	25	4	0.5507
6	1	0.1813	26	6	0.6988
7	1	0.1813	27	6	0.6988
8	1	0.1813	28	7.5	0.7769
9	1	0.1813	29	7.75	0.7878
10	1	0.1813	30	8	0.7981
11	1.25	0.2212	31	8	0.7981
12	1.5	0.2592	32	9	0.8347
13	1.5	0.2592	33	10	0.8647
14	2	0.3297	34	10.5	0.8775
15	2	0.3297	35	10.5	0.8775
16	2	0.3297	36	11	0.8892
17	2	0.3297	37	11	0.8892
18	2	0.3297	38	11.25	0.8946
19	2.5	0.3935	39	13.75	0.9361
20	2.5	0.3935	40	23.5	0.9909

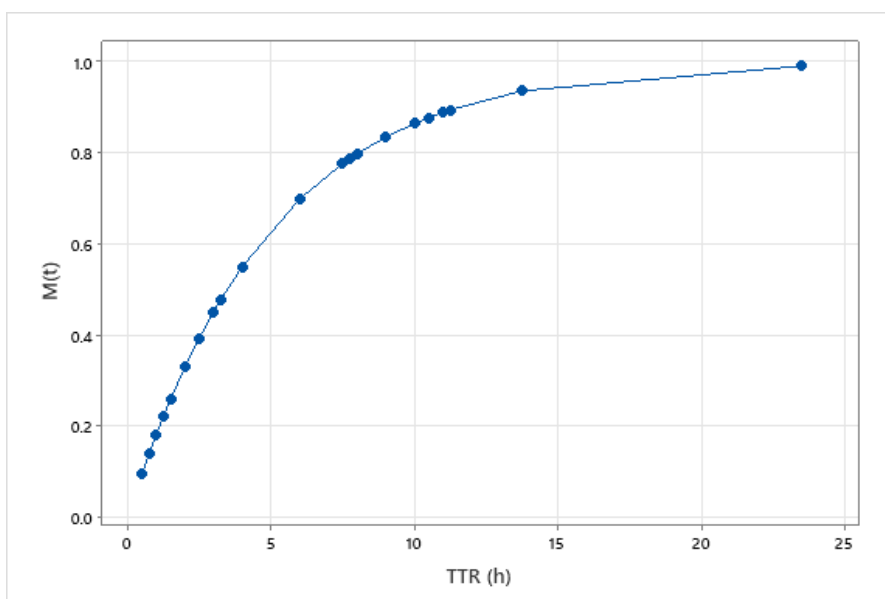


Figure III. 10 : La courbe de maintenabilité (pompe à boue).

**Interprétation :** La maintenabilité est croissante en fonction du temps, C'est-à dire que la maintenabilité exercée est bonne.

### III.7. Calcul et tracé de la courbe de la disponibilité de la pompe à boue :

#### III.7.1. Disponibilité intrinsèque ou asymptotique :

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

$$D_i = \frac{488}{5 + 488} = 0.9898$$

**III.7.2. Disponibilité instantanée :**

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

$$MUT = \frac{1}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{1}{MUT} = \frac{1}{488} = 0.00204918$$

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \rightarrow \mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{5} = 0.2$$

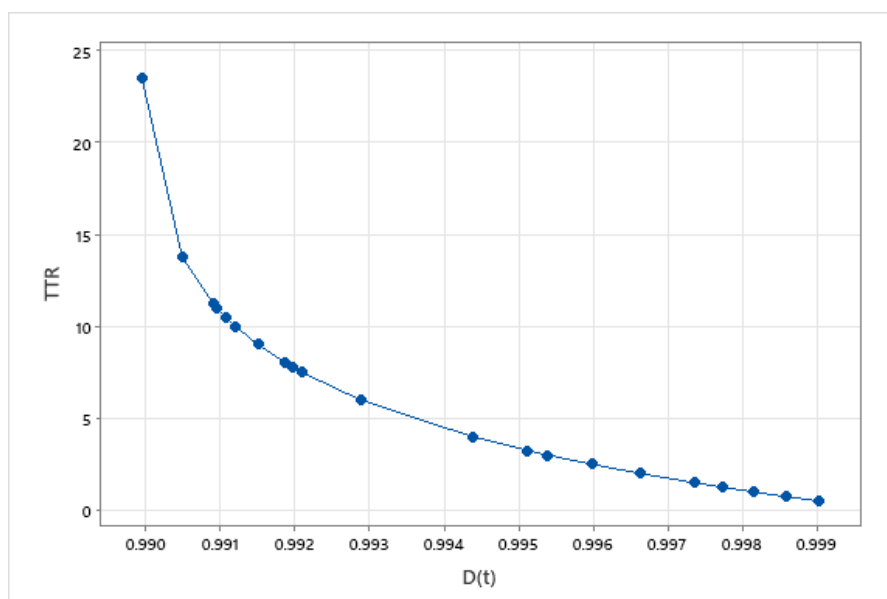
$$\mu + \lambda = 0.00204918 + 0.2 = 0.20204918$$

$$D(t) = \frac{0.2}{0.20204918} + \frac{0.00204918}{0.20204918} \times e^{-(0.20204918)t}$$

$$D(t) = 0.9898 + 0.01014 \times e^{-(0.202028397)t}$$

**Tableau III. 9 :** Tableau de disponibilité (pompe à boue).

N°	TTR	D(t)	N°	TTR	D(t)
1	0.5	0.9990	21	3	0.9954
2	0.5	0.9990	22	3	0.9954
3	0.75	0.9986	23	3	0.9954
4	1	0.9981	24	3.25	0.9951
5	1	0.9981	25	4	0.9944
6	1	0.9981	26	6	0.9929
7	1	0.9981	27	6	0.9929
8	1	0.9981	28	7.5	0.9921
9	1	0.9981	29	7.75	0.9920
10	1	0.9981	30	8	0.9919
11	1.25	0.9977	31	8	0.9919
12	1.5	0.9973	32	9	0.9915
13	1.5	0.9973	33	10	0.9912
14	2	0.9966	34	10.5	0.9911
15	2	0.9966	35	10.5	0.9911
16	2	0.9966	36	11	0.9910
17	2	0.9966	37	11	0.9910
18	2	0.9966	38	11.25	0.9909
19	2.5	0.9960	39	13.75	0.9905
20	2.5	0.9960	40	23.5	0.9899



**Figure III. 11 :** La courbe de disponibilité de la pompe à boue.

**Interprétation :** La disponibilité est décroissante en fonction de temps. L'augmentation de la disponibilité d'une pompe à boue consiste à diminuer le nombre de ses arrêts ou augmenter sa fiabilité, et réduire le temps nécessaire pour résoudre les causes de ces arrêts.

### III.8. L'analyse de Pareto :

#### III.8.1. Présentation des éléments :

Pour faire une bonne étude de fiabilité, on a intérêt à relever le nombre de panne de chaque organe à partir du dossier historique de chaque équipement (2018, 2019 et 2020) voir **ANNEXE 03** :

**Tableau III. 10 :** Tableau récapitulatif des pannes.

Elément	Nombre de panne
Hiule	3
Piston	14
Roulement	2
Chemise +piston	7
relief valve	1
mano de pression	1
Refroidissement	1
garniture tige	1
mano de temperature	1
Bielle	1
soupape	3
Joint	3

Clapet	2
--------	---

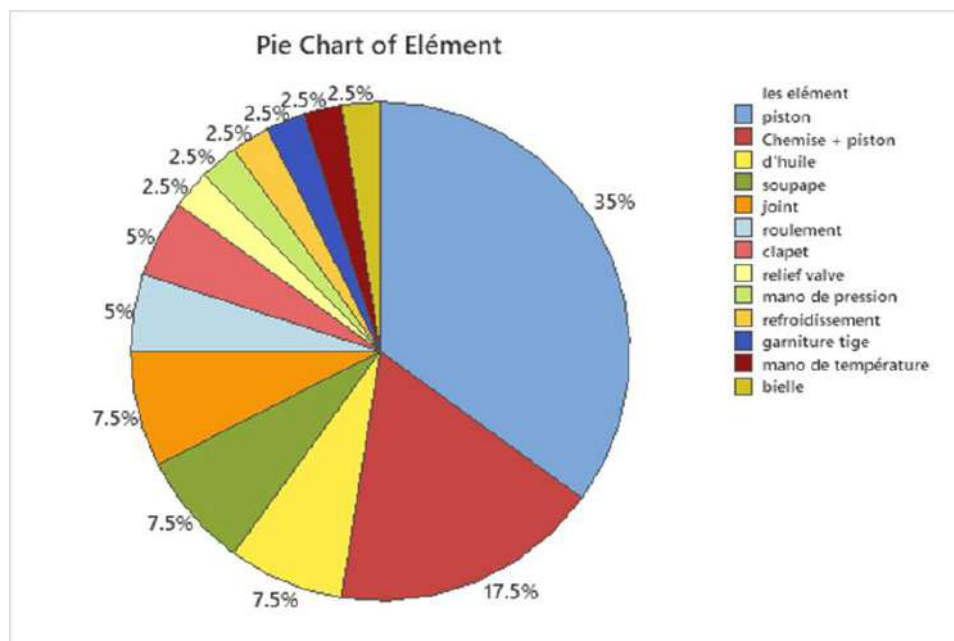


Figure III. 12 : récapitulatif des pannes.

### III.8.2. Calculs préliminaires :

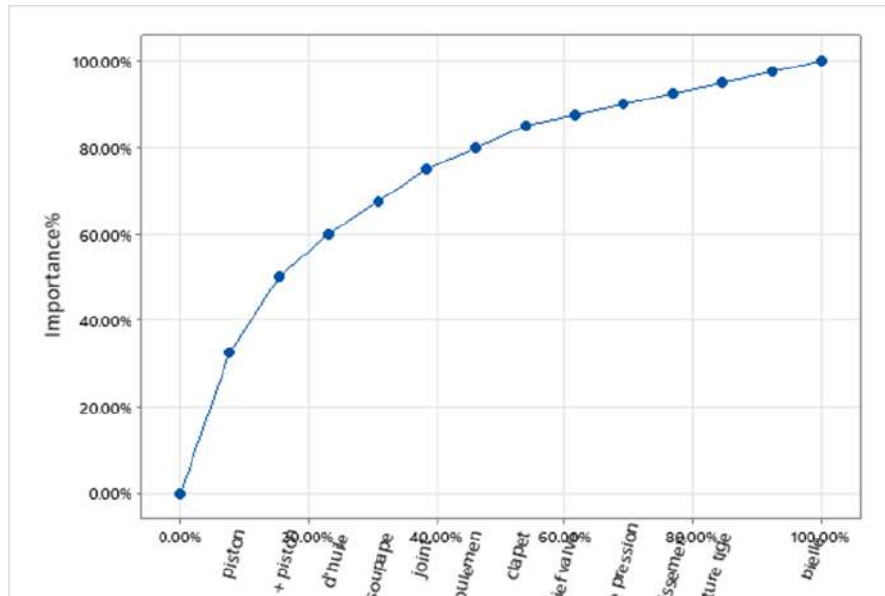
- Disposer les éléments par ordre croissant du nombre de panne.
- Calcul du cumul des valeurs du critère d'analyse ( $X_i$ ).
- Calcul, pour les n produits, de (pour  $i = n$  nous trouvons  $X_{total} = 40$ ).
- Calcul du pourcentage d'importance : Pour chaque produit, on calcule  $\frac{\sum_{i=1}^n X_i}{X_{total}}$

Tableau III. 11 : Calculs préliminaires de Pareto.

Elément	Nombre de pannes	Cumul des pannes	Importance	Nombre d'élément %
piston	14	14	35%	7.7%
Chemise + piston	7	21	52.5%	15.4%
d'huile	3	24	60%	23.1%
soupape	3	27	67.5%	30.8%
joint	3	30	75%	38.5%
roulement	2	32	80%	46.2%
clapet	2	34	85%	53.8%
relief valve	1	35	87.5%	61.5%
mano de pression	1	36	90%	69.2%
refroidissement	1	37	92.5%	76.9%
garniture tige	1	38	95%	84.6%
mano de température	1	39	97.5%	92.3%
bielle	1	40	100%	100%

### III.8.3. Traçage de la courbe :

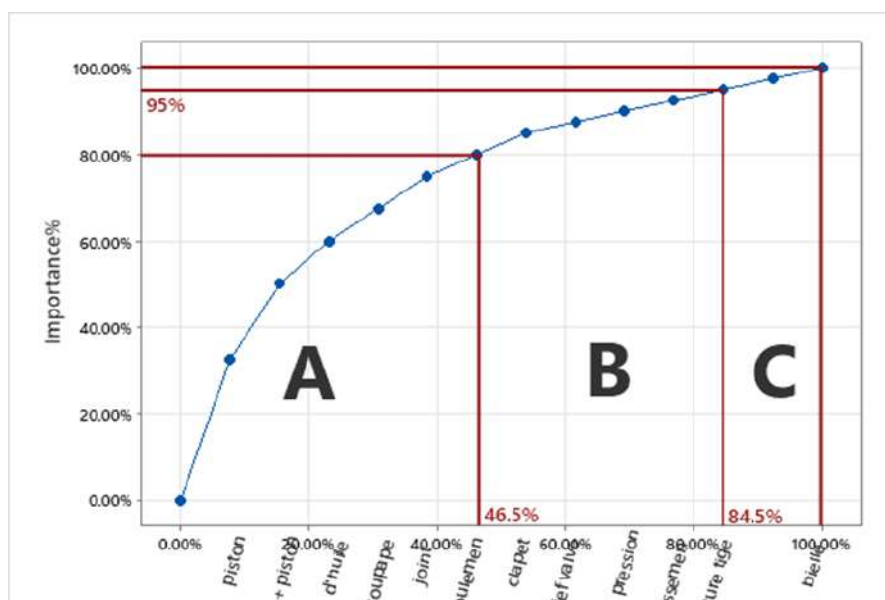
Les résultats du **Tableau III. 10** sont représentés sur la **Figure III. 13**.



**Figure III. 13 :** la courbe Cumulées de pannes-élément.

### III.8.4. Détermination des zones ABC :

Il s'agit de délimiter sur la courbe des zones à partir de l'allure de la courbe. En général la courbe possède deux cassures ce qui permet de définir 3 zones., indiquées sur la figure ci dessous.



**Figure III. 14 :** Courbe théorique de Pareto.

### **III.8.5. Interprétation de la courbe ABC :**

Classe A : 46.5 % des éléments (piston, Chemise + piston, d'huile, roulement, soupape et joint) qui causent 80 % du total des pannes.

Classe B : 38 % des éléments (clapet, relief valve, Mano de pression, refroidissement, garniture tige et Mano de température) qui causent 15 % du total des pannes.

Classe C : 15.5 % des éléments (bielle) qui causent 5 % du total des pannes.

Le la courbe ABC distingue trois catégories de causes de panne, facilitant leur traitement en termes de maintenance, chacune selon son niveau.

Nous concentrons toute notre attention sur la Classe A qui provoque plus de 80 % défauts, et pour y faire face, nous intensifions la maintenance préventive de toute nature (Maintenance systématique, Maintenance conditionnelle et Maintenance prévisionnelle) et le contrôle de fiabilité permanent pour chacun de (piston, Chemise + piston, d'huile, roulement, soupape et joint) et l'approvisionnement constant de pièces de rechange, et malgré tout cela nous utilisons également le schéma analytique d'Ishikawa dans l'élément suivant.

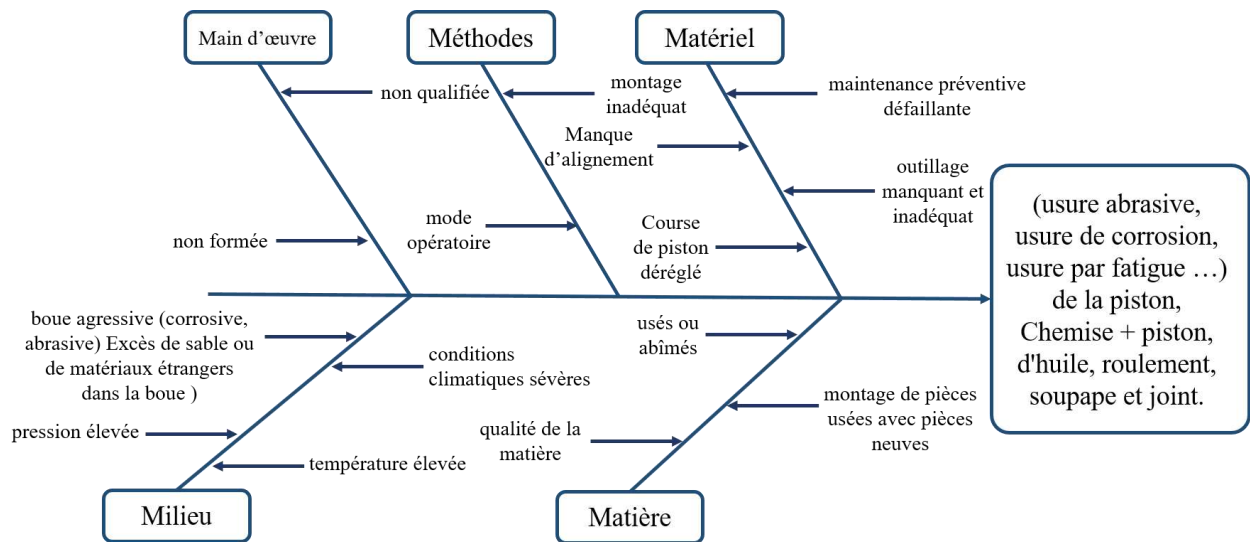
Classe B (clapet, relief valve, Mano de pression, refroidissement, garniture tige et Mano de température) Bien qu'elle ne soit pas très importante, elle l'est d'autant plus qu'elle provoque 38 % pannes, ce qui porte le taux de pannes à 95 % Nous recommandons une amélioration continue pour une maintenance préventive et continue Fiabilité revoir.

La classe C, puisqu'elle est complémentaire des deux classes précédentes (A et B) et précipitante 15.5 %, est importante malgré ses quelques besoins.

**III.9. Méthode Cause-Effets (ISHIKAWA):**

On travaille la méthode Ishikawa et utilisons les informations du diagramme ABC et nous focalisons sur les éléments de catégorie A (piston, Chemise + piston, d'huile, roulement, soupape et joint) et superficiellement et généralement sur les catégories B et C.

**III.9.1 Analyse des causes de défaillance de piston, Chemise + piston, d'huile, roulement, soupape et joint :**



**Figure III. 15 :** Diagramme cause- effet de piston, Chemise + piston, d'huile, roulement, soupape et joint.

**III.9.2 Actions d'amélioration de la maintenance de piston, Chemise + piston, d'huile, roulement, soupape et joint :**

**Tableau III. 12 :** amélioration de la maintenance de piston et de Chemise.

<b>Milieu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pollution liquide excessive.</li> <li>- Accumulation de boue dans la croix de décharge.</li> </ul>
<b>Méthodes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manque d'organisation dans le nettoyage des salles de doublure au besoin.</li> <li>- Non-respect des instructions dans le manuel d'entretien et sur les amortisseurs à côté du voyant.</li> <li>- Ne remplacez pas les disques cassés ou usés et les verrous de soupape s'ils sont desserrés ou usés.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne remplacez aucun écrou qui a été utilisé trois fois.</li> <li>- Ne pas changer l'huile régulièrement.</li> </ul>
<b>Moyens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'état des chemises et des pistons.</li> <li>- Dommages aux valves.</li> <li>- Ne pas vérifier l'état des racleurs intermédiaires, les remplacer s'ils sont usés.</li> </ul>
<b>Main d'œuvre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Défaut de vérifier le serrage des écrous à oreilles du collecteur de chemise</li> <li>- Vous ne savez pas si les buses de pulvérisation sont bouchées.</li> <li>- Ne pas s'assurer que les amortisseurs sont correctement chargés.</li> <li>- Négliger de nettoyer les côtés des cales de verrouillage et de les recouvrir d'un composé de filetage de base très résistant.</li> <li>- Ne pas vérifier l'aimant sur le bouchon de vidange lors du changement d'huile.</li> </ul>
<b>Matière</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne faites pas attention au matériau dont est fait le piston.</li> <li>- Ne pas prêter attention aux propriétés de l'huile (viscosité, chaleur ...).</li> </ul>

**Tableau III. 13** : amélioration de la maintenance d'huile, roulement, soupape et joint.

<b>Problèmes</b>	<b>Causes</b>	<b>Remède</b>
D'huile	Mauvais remplissage. Fuite du fluide. Manomètre défectueux	Changer l'huile Réparer ou remplacer la pompe à l'huile Remplacer le manomètre.
Roulement	Roulement mal ajus Roulements principaux usé	Régler le débit de refoulement. Remplacer les roulements usés.
Soupape	Soupape de sécurité mal ajustée.	Vérifier et ré calibrer la soupape de sécurité



Joint	Joints usé ou endommagé	Remplacer ce joint.
-------	-------------------------	---------------------

### III.10. Les coûts de maintenance:

Tableau III. 14 : prix des pièces détachées.

les pieces de rechange	Prix des pièces détachées (DZ)
Valve 3 “	950.000,00
Piston 6 “	11.000,00
Roulements AV-AR	1.000.000,00
Chemise	93.000,00
Bielle	1.650.000,00
Joint oring 5 “	2.000,00
Soupape	950.000,00
Bague d’étanchéité	20.000,00

#### III.10.1. Calcul des coûts directs de maintenance $C_m$ :

$$C_m = C_{mo} + C_f + C_{PDR} + C_e$$

Le service maintenance n'a pas utilisé les frais fixes du service maintenance  $C_f$ , ni les dépenses de sous-traitance  $C_e$

Donc :

$$C_m = C_{mo} + C_{PDR}$$

$$C_{mo} = MTTR \times \tau_1$$

$$\tau_1 = 6000.00 \text{ (DZ/h)}$$

Tableau III. 15 :Tableau récapitulatif du calcul détaillé des couts de maintenance.

Moi	MTTR (h)	C <sub>mo</sub> (DZ)	C <sub>PDR</sub> (DZ)	C <sub>m</sub> (DZ )	Moi	MTTR (h)	C <sub>mo</sub> (DZ)	C <sub>PDR</sub> (DZ)	C <sub>m</sub> (DZ)
18/nove	16.75	100.50000	994.00000	1094.50000	20/ mars	3.75	22.50000	115.00000	137.50000
19/ mars	9	54.00000	1,000.00000	1054.00000	20/ mai	2	12.00000	11.00000	23.00000
19/ mai	6	36.00000	11.00000	47.00000	20/ juin	2	12.00000	104.00000	116.00000
19/ juin	11	66.00000	1,000.00000	1066.00000	20/ juil.	1.5	9.00000	22.00000	31.00000
19/ août	4	24.00000	1,650.00000	1674.00000	20/ oct	7.5	45.00000	1069.00000	1114.00000
19/ déc	7.75	46.50000	2,026.00000	2072.50000	20/ Déc	3	18.00000	11.00000	29.00000
20/ févr	10.5	63.00000	314.00000	377.00000	21/ janv	1	6.00000	11.00000	17.00000

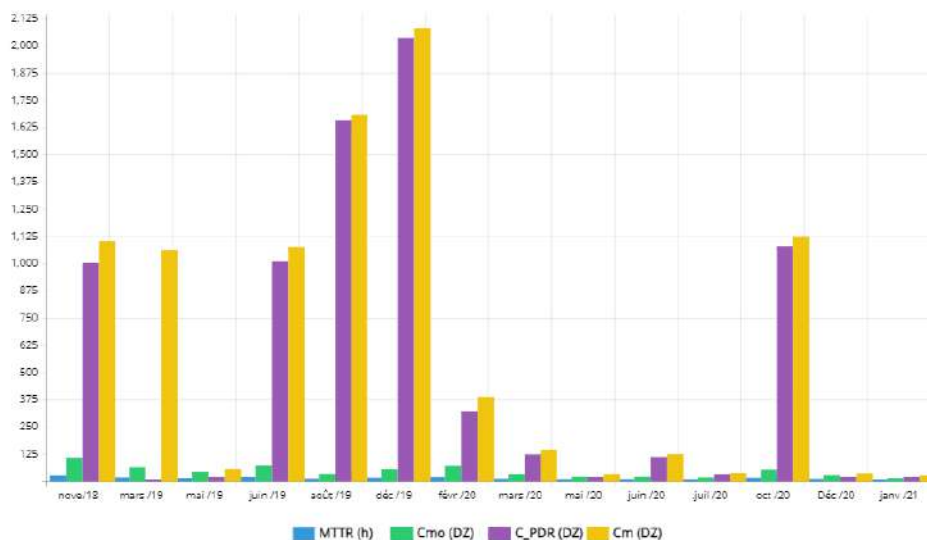


Figure III. 16 : Graphiques pour le calcul détaillé des coûts de maintenance.

On note dans le graphique la prédominance du coût des pièces de rechange  $C_{PDR}$  sur le coût du personnel de maintenance  $C_{mo}$  et sa proximité avec le coût de la maintenance  $C_m$ , ce qui indique que les pièces de rechange sont l'une des causes les plus importantes de pannes et de pertes de coûts.

### III.10.2. Calcul des coûts d'indisponibilité de maintenance $C_i$ :

Coûts d'indisponibilité Inexistant car la pompe n'est pas tombée dans les conséquences indirectes de l'indisponibilité du matériel  $C_i = 0$

### III.10.3. Les coûts de défaillance $C_d$ :

$$C_d = C_m + C_i$$

Des deux éléments précédents ci-dessus :

$$C_d = C_m = C_{mo} + C_{PDR}$$

Tableau III. 16 : Coût d'entretien mensuel.

Moi	C <sub>d</sub> (DZ)	Moi	C <sub>d</sub> (DZ)
18 novembre	1094.50000	20 mars	137.50000
19 mars	1054.00000	20 mai	23.00000
19 mai	47.00000	20 juin	116.00000
19 juin	1066.00000	20 juil.	31.00000
19 août	1674.00000	20 oct	1114.00000
19 Décembre	2072.50000	20 Déc	29.00000
20 février	377.00000	21 janvier	17.000.00

III.10.4. Représentation des coûts de maintenance :

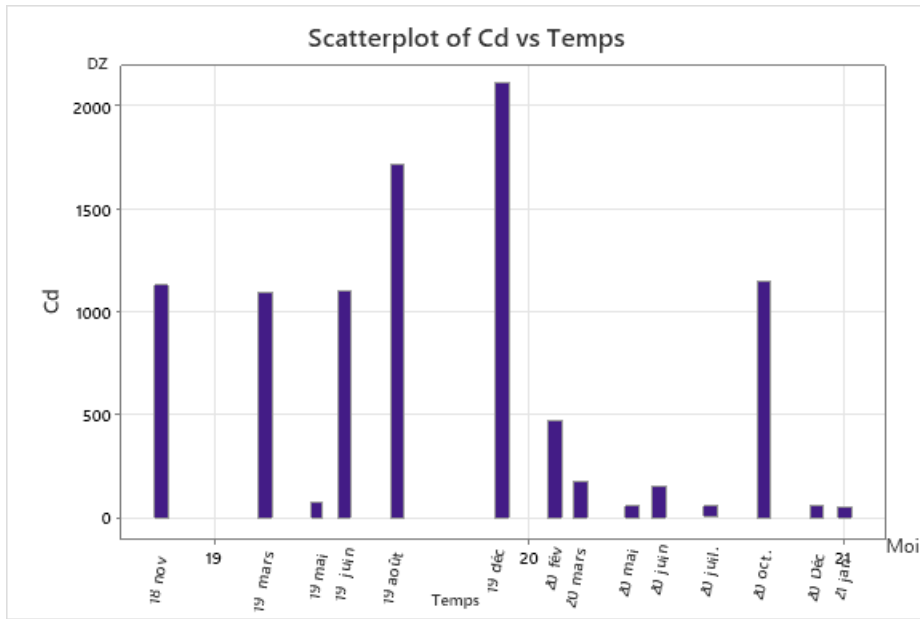


Figure III. 17 : Coût d'entretien mensuel.

Interprétation des résultats :

Le calcul des couts de maintenance a pris en considération les couts de main d'œuvre et ceux de la pièce de rechange, l'histogramme ainsi tracé ne représente donc qu'une partie des couts de défaillance, et on remarque qu'au fil des 3 ans les couts ne connaissent pas une allure croissante ou décroissante, la variation est fonction des défaillances enregistrées sur chantier.

Néanmoins, les pics de cout enregistrés peuvent donner une idée sur les causes qui y sont à l'origine et pourront aider à mieux diagnostiquer les défaillances et d'en sortir avec des actions amélioratrices des actions de la maintenance à appliquer.

III.11. Conclusion:

L'étude présentée dans ce chapitre nous permet d'approfondir nos connaissances dans les domaines des équipements de forage en général et d'une composante essentielle de ce domaine, qui est la pompe à boue.

Nous avons une idée suffisamment expliquée pour étudier le type de pompe NATIONAL-OIL-WELL 12P160.



# **Conclusion générale**

### Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude de la pompe à boue de forage pétrolier, c'est une pompe volumétrique alternative à pistons, à mécanisme bielle-manivelle de type triplex à simple effet. Ce type de pompes répond le mieux aux exigences demandées, cependant elles fonctionnent dans de conditions difficiles et défavorables, ce qui induit à des défaillances.

Nous nous sommes intéressés à faire l'étude d'une pompe à boue triplex 12P160 au niveau d'un chantier pétrolier de l'entreprise nationale de forage. L'étude a porté sur l'exploitation de l'historique de pannes des trois années successives (2018, 2019, et 2020).

Une étude des différents indicateurs de fiabilité, maintenabilité et disponibilité a été présentée en premier lieu, suivie par une analyse par la méthode des 20-80 qui a révélé que l'usure de piston, Chemise + piston, d'huile, roulement, soupape et joint était la cause principale de 46.5% de la totalité des pannes, une attention particulière est portée à ces organes en effectuant une analyse par le digramme cause-effet d'Ishikawa.

Des actions amélioratrices ont été suggérées, pour assurer le maintien du système considéré à un niveau de fonctionnement satisfaisant.

Un calcul des coûts de maintenance a été initié, pouvant être approfondi par des travaux futurs.

L'étude nous a permis d'approfondir nos connaissances sur les concepts FMD, sur les méthodes de maintenance, on en pourra tirer les conclusions suivantes :

D'un premier regard sur le profil de défaillance obtenu sur le puits pétrolier national ENAFOR47, il apparaît clairement que la maintenance corrective y est prédominante. Nous avons dû nous concentrer sur  $\lambda$  pour choisir la meilleure méthode d'étude de la fiabilité, ce qui nous a orienté vers la loi de Weibull pour obtenir la meilleure fiabilité estimée de 89 %, et nous avons calculé comment la maintenir. Il s'avère que la maintenance préventive doit être effectuée toutes les 5 heures.

Un bon entretien nécessite toujours une connaissance approfondie de la pompe à boue ainsi que de ses différents composants et de son principe de fonctionnement. On conclut que la boue de forage qui contient des particules de terrain ayant une dureté proche de celle des pièces en acier trempée de la pompe provoque une usure par abrasion des pièces frottantes. Les différents réactifs (chaux, soude caustique, acide) et le pétrole présent dans la boue attaquent fortement les pièces, et leur action augmente grâce aux températures élevées.

## **Conclusion générale**

---

Ainsi l'action d'amélioration portera sur l'entretien des boues de forage au niveau des tamis vibrants.

Choisir la meilleure fiabilité nous aide également, dans le but de réduire le coût des pertes.

Nous espérons que cette étude contribuera à la compréhension du fonctionnement des pompes, de leur maintenance et qu'elle pourra être approfondie par et améliorée par les travaux futurs.

## Références bibliographiques



### Références bibliographiques

- [1] : M. MANSOURI et GHEMAM, Etude et maintenance d'une pompe à boue (National – oil- well), université Mohammad bougera Boumerdes 2007.
- [2] : ENTP, Document sur la pompe à boue sur chantier TP160.
- [3] : Ghiti. nadjibe « Technique de pompes» Ecole Skikda IAP juillet 2009.
- [4] : NOV-12P160 Mud pump.
- [5] : M. ALICHE et MESSAOUDI, Etude de la fiabilité et maintenance des systèmes mécanique d'un appareil de forage. Cas : Treuil de forage et une pompe à boue au niveau de la station ENTP-TP127, Université mouloud mammeri, Tizi-Ouzou, (2017/2018).
- [6] : M. WADO JOUSSE Leolein, Eniet Cameroun, cours de gestion de la maintenance, 2014.
- [7] : "Manuel de maintenance", NAPHTOGAZ, HMD, (2001)
- [8] : M. BOUCHELIG et MEKHALFIA, etude sur la maintenance des systèmes mecanique d'une machine de forage, université Mohamed Boudiaf - M'SILA, (2016/2017).
- [9] : M. ABDALLAH, Optimisation de la maintenance préventive des systèmes de production incorporant la dépendance par les meta-heuristique, Thèse de Doctorat, université de Djilali Liabes SIDI BEL ABBES.
- [10] : M. MRABET, Contribution à la conception d'un outil d'aide au diagnostic des systèmes de productions, Université Aboubekr Belkaïd Tlemcen , (2016/2017).
- [11] : M. HALIMI, Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures, Thèse de Doctorat, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, (2013/2014).
- [12] : Cours de Maintenance Informatique By Dr. YENDE RAPHAEL Grevisse, PhD.
- [13] : Cours pour les Masters / Génie Industriel / Dr M. BENZOUAI.
- [14] : M. BEN DJAAFER, Réalisation d'un plan de maintenance préventive systématique pour l'amélioration de la sûreté de fonctionnement d'un système électromécanique, université Mohamed Boudiaf - M'SILA, (2012/2013).
- [15] : Mathieu.G, Modélisation des coûts de cycle de vie prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité Application à l'aéronautique, Thèse de doctorat d'Ecole centrale de Lyon ,2005.
- [16] : M. DERRADJ, Mise en œuvre d'une politique de maintenance préventive d'un système de production, université Mohamed Boudiaf - M'SILA, (2017/2018).

## Références bibliographiques

---

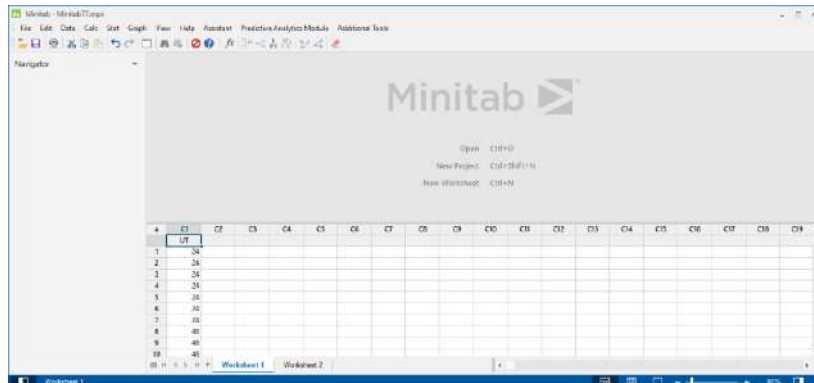
- [17] : Rabiai. A, Laichi.I, Etude de la sureté de fonctionnement par analyse FMD application (PRESSE2500T), université Mohamed Boudiaf - M'SILA, (2010).
- [18] : Patrick LYONNET, 'la maintenance mathématiques et méthodes'' troisième édition, paris, 1992.
- [19] : Pierre CHAPOUILLE "Fiabilité. Maintenabilité", Techniques de l'Ingénieur, T 4300, 2007.
- [20] : M. BENKHELIFA et MOHAMMEDI, fiabilité des équipements de D.T.M, analyse fonctionnelle et implications organisationnelles de la fonction maintenance de transport, Université kasdi merbah Ouargla, (2011).
- [21] : M. Hathat et Deblaoui, Etude Analytique FMD D'une Turbine à Gaz 990, Université kasdi merbah Ouargla, 2015.
- [22] : M. Boumeddane, Impact De La Fiabilité Sur Les Équipements Industriels (Étude De Cas Au Niveau Denitex), Mémoire de de Magister, Université de Tlemcen, (2012).
- [23] : BELLAOUAR Ahmed / BELEULMI Salima cour FMD (FIABILITE, MAINTENABILITE et DISPONIBILITE) UNIVERSITE Constantine 1 Année Académique 2013-2014.
- [24] : A. BELHOMME, Cours de STRATEGIE DE MAINTENANCE Forges les Eaux année 2010/2011.
- [25] : M. TOUMI et AKERMI, Etude Analytique De La maintenance Préventive D'une Turbine à Gaz GE10/2, Université kasdi merbah Ouargla, (2018/2019).
- [26] : W. BENZAOUI Cours Sûreté de Fonctionnement, Master Académique. Automatique – S3 Université Kasdi Merbah-Ouargla 2014/2015.
- [27] : cour de stratégie de maintenance, Université Ouargla 2017.
- [28] : M. DOUABA et BEROUBA, Analyse analytique FMD et AMDEC d'un compresseur à vis- ATLAS COPCO ZE3, université kasdi merbah Ouargla 2016/2017.
- [29] : Cours gestion de la production, Dr. KHEIREDDINE, 2020/2021.
- [30] : A. KAREK, Cours de stratégie de maintenance 2019/2020.
- [31] : M. Jérémy Llaurens, Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique, Thèse de docteur en pharmacie, Université Joseph Fourier, France, 2011.

# **ANNEXE**

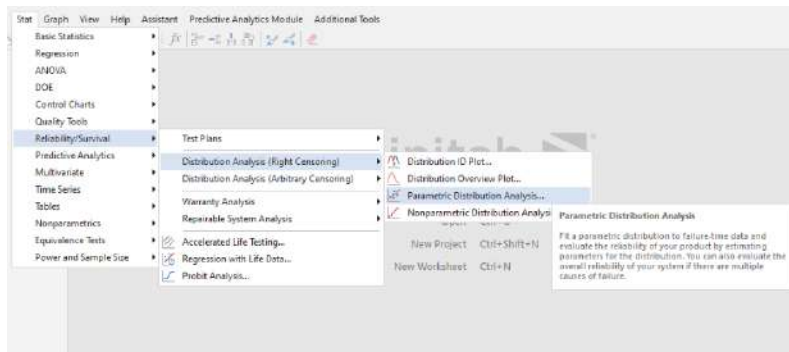
## Étapes pour dessiner un diagramme Papier de Weibull avec Minitab :

### A. Obtenez le diagramme papier Weibull :

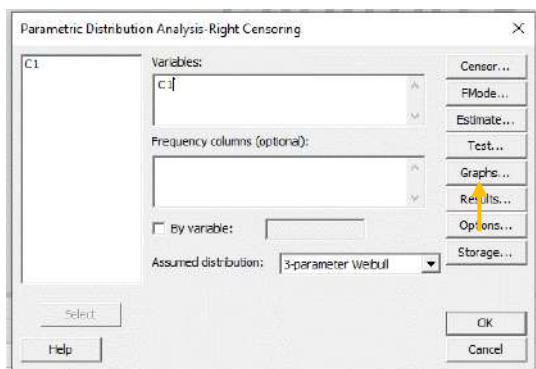
Etape 01 : consiste à récupérer les données et à les mettre dans le tableau



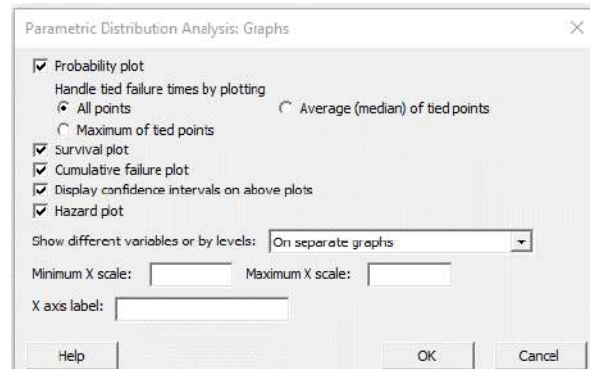
Etape 02 : Suivez ces étapes "Stat >> Reliability/Survival >> Distribution Analysis ( Right Censoring ) >> Parametric Distribution Analysis"



Etape 03 : Sélectionnez la colonne de droite dans la zone de texte "Variable", puis cliquez sur "Graphes".



Etape 04 : Cochez la case suivante : " Survival plot", "Cumulative failure plot", "Hazard plot" pour obtenir ces parcelles, puis cliquez sur "OK" et "OK" à nouveau.



## ANNEXE 01

Tableau de loi kolmogorov-smirnov

N°	Niveau significatif				
	0.2	0.15	0.1	0.05	0.01
1	0,900	0,925	0,950	0,975	0,995
2	0,684	0,726	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,642	0,708	0,828
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,733
5	0,446	0,474	0,510	0,565	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,410	0,490
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,252	0,274	0,295	0,328	0,392
17	0,250	0,266	0,286	0,318	0,381
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,371
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,363
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,356
25	0,210	0,220	0,240	0,270	0,320
30	0,190	0,200	0,220	0,240	0,290
35	0,180	0,190	0,210	0,230	0,270
>35	$1.07/\sqrt{N}$	$1.14/\sqrt{N}$	$1.22/\sqrt{N}$	$1.36/\sqrt{N}$	$1.63/\sqrt{N}$

## ANNEXE 02

**Tableau – Distribution de Weibull : valeurs des coefficients a et b en fonction du paramètre de forme  $\beta$**

$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B
0,05	2,43290E+18	9,03280E+23	1,75	0,89062	0,52523	3,45	0,89907	0,28822	5,15	0,91974	0,20505
0,1	3,62880E+06	1,55977E+09	1,8	0,88929	0,51123	3,5	0,89975	0,28473	5,2	0,92025	0,20336
0,15	2,59357E+03	1,21993E+05	1,85	0,88821	0,49811	3,55	0,90043	0,28133	5,25	0,92075	0,20170
0,2	1,20000E+02	1,90116E+03	1,9	0,88736	0,48579	3,6	0,90111	0,27802	5,3	0,92125	0,20006
0,25	2,40000E+01	1,99359E+02	1,95	0,88671	0,47419	3,65	0,90178	0,27479	5,35	0,92175	0,19846
0,3	9,26053E+00	5,00780E+01	2	0,88623	0,46325	3,7	0,90245	0,27164	5,4	0,92224	0,19688
0,35	5,02914E+00	1,99761E+01	2,05	0,88589	0,45291	3,75	0,90312	0,26857	5,45	0,92272	0,19532
0,4	3,32335E+00	1,04382E+01	2,1	0,88569	0,44310	3,8	0,90379	0,26558	5,5	0,92320	0,19379
0,45	2,47859E+00	6,46009E+00	2,15	0,88561	0,43380	3,85	0,90445	0,26266	5,55	0,92368	0,19229
0,5	2,00000E+00	4,47214E+00	2,2	0,88562	0,42495	3,9	0,90510	0,25980	5,6	0,92414	0,19081
0,55	1,70243E+00	3,34530E+00	2,25	0,88573	0,41652	3,95	0,90576	0,25701	5,65	0,92461	0,18935
0,6	1,50458E+00	2,64514E+00	2,3	0,88591	0,40848	4	0,90640	0,25429	5,7	0,92507	0,18792
0,65	1,36627E+00	2,17887E+00	2,35	0,88617	0,40080	4,05	0,90704	0,25162	5,75	0,92552	0,18651
0,7	1,26682E+00	1,85117E+00	2,4	0,88648	0,39345	4,1	0,90768	0,24902	5,8	0,92597	0,18512
0,75	1,19064	1,61077	2,45	0,88685	0,38642	4,15	0,90831	0,24647	5,85	0,92641	0,18375
0,8	1,13300	1,42816	2,5	0,88726	0,37967	4,2	0,90894	0,24398	5,9	0,92685	0,18240
0,85	1,08796	1,28542	2,55	0,88772	0,37319	4,25	0,90956	0,24154	5,95	0,92729	0,18107
0,9	1,05218	1,17111	2,6	0,88821	0,36696	4,3	0,91017	0,23915	6	0,92772	0,17977
0,95	1,02341	1,07769	2,65	0,88873	0,36097	4,35	0,91078	0,23682	6,05	0,92815	0,17848
1	1,00000	1,00000	2,7	0,88928	0,35520	4,4	0,91138	0,23453	6,1	0,92857	0,17721
1,05	0,98079	0,93440	2,75	0,88986	0,34963	4,45	0,91198	0,23229	6,15	0,92898	0,17596
1,1	0,96491	0,87828	2,8	0,89045	0,34427	4,5	0,91257	0,23009	6,2	0,92940	0,17473
1,15	0,95170	0,82971	2,85	0,89106	0,33909	4,55	0,91316	0,22793	6,25	0,92980	0,17351
1,2	0,94066	0,78724	2,9	0,89169	0,33408	4,6	0,91374	0,22582	6,3	0,93021	0,17232
1,25	0,93138	0,74977	2,95	0,89233	0,32924	4,65	0,91431	0,22375	6,35	0,93061	0,17113
1,3	0,92358	0,71644	3	0,89298	0,32455	4,7	0,91488	0,22172	6,4	0,93100	0,16997
1,35	0,91699	0,68657	3,05	0,89364	0,32001	4,75	0,91544	0,21973	6,45	0,93139	0,16882
1,4	0,91142	0,65964	3,1	0,89431	0,31561	4,8	0,91600	0,21778	6,5	0,93178	0,16769
1,45	0,90672	0,63522	3,15	0,89498	0,31135	4,85	0,91655	0,21586	6,55	0,93216	0,16657
1,5	0,90275	0,61294	3,2	0,89565	0,30721	4,9	0,91710	0,21397	6,6	0,93254	0,16547
1,55	0,89939	0,59252	3,25	0,89633	0,30319	4,95	0,91764	0,21212	6,65	0,93292	0,16439
1,6	0,89657	0,57372	3,3	0,89702	0,29929	5	0,91817	0,21031	6,7	0,93329	0,16332
1,65	0,89421	0,55635	3,35	0,89770	0,29550	5,05	0,91870	0,20853	6,75	0,93366	0,16226
1,7	0,89224	0,54024	3,4	0,89838	0,29181	5,1	0,91922	0,20677	6,8	0,93402	0,16121

## ANNEXE 03

Tableau d'historique

Description des travaux	Début panne	Heure Début Panne	Fin de la panne	Heure fin panne	Durée arrêt Panne	cause
réparation pompe	14-10-2018	13:00:00	14-10-2018	19:00:00	6.00	
réparation pompe	09-11-2018	00:00:00	09-11-2018	23:28:20	23.50	
changement piston 6"	11-11-2018	08:15:00	11-11-2018	08:45:00	0.50	
changement relief valve 3"	12-11-2018	00:00:00	12-11-2018	13:45:54	13.75	
changement piston +joint	14-11-2018	07:30:00	14-11-2018	08:30:00	1.00	piston usé
changement piston 6"	14-11-2018	17:30:00	14-11-2018	18:00:00	0.50	piston usé
changement piston 6"	15-11-2018	07:30:00	15-11-2018	08:30:00	1.00	piston usé
changement mano de température d'huile	12-12-2018	07:00:00	12-12-2018	14:34:29	7.50	
Vidange pompe	14-01-2019	07:00:00	15-01-2019	14:59:27	8.00	
Cangement roulements AV-AR du moteur	25-03-2019	07:00:00	25-03-2019	15:48:33	9.00	
réparation pompe	25-04-2019	13:30:00	25-04-2019	21:30:00	8.00	
réparation système de refroidissement	26-04-2019	13:32:18	26-04-2019	00:00:00	10.50	Plaque d'usure
changement piston	05-05-2019	07:00:00	05-05-2019	13:00:00	6.00	piston usé
changement de roulement flach pomp MP1	02-06-2019	07:00:00	02-06-2019	17:40:40	11.00	
changement chemise+piston+joint+bielle +soupape	23-08-2019	07:00:00	23-08-2019	11:00:00	4.00	piston usé
changement clapet	03-09-2019	01:30:00	03-09-2019	02:30:00	1.00	inserts usées
changement mano de pression pope	29-11-2019	07:00:00	29-11-2019	18:17:51	11.25	
changement soupape	02-12-2019	00:00:00	02-12-2019	00:30:00	0.50	soupape usée
Remplissage d'huile (mise à niveau)	06-12-2019	07:00:00	06-12-2019	17:33:39	10.50	
changement piston	13-12-2019	09:00:00	13-12-2019	12:00:00	3.00	chemises pistons usés
changement clapet, joint , bague d'etanchéité	17-12-2019	14:00:00	17-12-2019	15:00:00	1.00	clapet usé
changement chemise+piston +soupape	18-12-2019	11:00:00	18-12-2019	13:30:00	2.50	chemises pistons usés
changement piston +joint	18-12-2019	22:30:00	18-12-2019	23:15:00	0.75	chemises pistons usés
changement soupape +joint	20-12-2019	13:30:00	20-12-2019	14:30:00	1.00	soupape usée

## Annexe

changement chemise+piston +joint	18-02-2020	10:00:00	18-02-2020	12:00:00	2.00	chemises pistons usés
changement joint oring 5"	21-02-2020	12:00:00	21-02-2020	12:45:00	0.75	
changement chemise+piston +joint	27-02-2020	08:30:00	27-02-2020	00:00:00	3.50	chemises pistons usés
changement chemise+piston +joint	27-02-2020	07:42:28	27-02-2020	00:00:00	4.25	chemises pistons usés
changement chemise+piston +joint	01-03-2020	09:34:15	01-03-2020	00:00:00	2.50	chemises pistons usés
changement piston	17-03-2020	09:05:43	17-03-2020	10:20:00	1.25	chemises pistons usés
Remplissage d'huile (mise à niveau)	26-03-2020	16:48:45	26-03-2020	17:48:00	1.00	fuite d'huile
changement piston	29-05-2020	07:00:00	29-05-2020	09:00:00	2.00	chemises usées
changement chemise+piston +joint	03-06-2020	08:00:00	03-06-2020	10:00:00	2.00	chemises pistons usés
changement 01 piston pour mud pump 1	15-07-2020	15:00:00	15-07-2020	16:00:00	1.00	piston usé
changement 01 piston pour mud pump 1	15-07-2020	20:00:00	15-07-2020	20:30:00	0.50	piston usé
changement piston	11-08-2020	08:00:00	11-08-2020	09:00:00	1.00	piston usé
changement garniture tige de pompage	21-09-2020	07:00:00	21-09-2020	16:47:40	10.00	
Remplissage d'huile (mise à niveau)	26-09-2020	07:00:00	26-09-2020	17:59:35	11.00	
changement chemise+piston +joint	05-10-2020	08:00:00	05-10-2020	10:00:00	2.00	chemises pistons usés
changement joint cache	06-10-2020	06:00:00	06-10-2020	07:00:00	1.00	chemises usées
changement joint cache	06-10-2020	20:30:00	06-10-2020	22:00:00	1.50	chemises usées
changement piston	07-10-2020	08:00:00	07-10-2020	09:00:00	1.00	chemises usées
changement soupape et siege clapet	07-10-2020	14:30:00	07-10-2020	16:30:00	2.00	soupape usée
changement piston	10-12-2020	08:00:00	10-12-2020	11:00:00	3.00	piston usé
réparation pompe	28-12-2020	08:00:00	28-12-2020	10:00:00	2.00	
changement piston	04-01-2021	03:00:00	04-01-2021	04:00:00	1.00	piston usé
réparation pompe	05-01-2021	03:45:00	05-01-2021	04:45:00	1.00	



## الملخص:

في التنقيب عن النفط، تعد مضخة الوحل جزءًا أساسيًا من عملية الحفر. يؤدي استخدامها المكثف والمستمر إلى العديد من الأعطال من أجل تقليل التكاليف الإضافية وتحسين أعمال الصيانة، فقد استخدمنا تاريخ الأعطال لمدة ثلاث سنوات (2018، 2019، و2020) لمضخة الوحل من النوع الثلاثي 12P160 من موقع ENAFOR 47. لقد قمنا بفحص موثوقية وموثوقية طرق الصيانة، بالإضافة إلى التحليل بواسطة قانون PARETO، لتحديد الأخطاء الأكثر شيوعًا، فضلاً عن الأسباب الأكثر شيوعًا لها. من خلال مخطط ايشيكawa.

**الكلمات المفتاحية:** الصيانة، الموثوقية، مضخة الوحل، الحفر، الأعطال.

## Résumé :

Dans le forage pétrolier, une pompe à boue est une partie essentielle du processus de forage. Son utilisation intensive et continue entraîne de nombreuses pannes Afin de réduire les surcoûts et d'améliorer les travaux de maintenance, nous avons utilisé l'historique de panne sur trois ans (2018, 2019 et 2020) de la pompe à boue de type triplex a simple effet National-oil- well 12P160 du site ENAFOR 47. Nous avons étudié la fiabilité de la maintenance et méthodes de fiabilité, en plus de l'analyse par la loi PARETO, Pour identifier les défaillances les plus courantes, ainsi que leurs causes les plus courantes. A travers le diagramme d'Ishikawa.

**Mots clé :** maintenance , la fiabilité , la pompe à boue , forage , pannes.

## Abstract :

In oil drilling, a mud pump is an essential part of the drilling process. Its intensive and continuous use leads to many failures in order to reduce additional costs and improve maintenance work, we have used a three-year failure history (2018, 2019 and 2020) for triple type slurry pump 12P160. from the ENAFOR 47 website. We examined the reliability and reliability of maintenance methods, as well as analyzed by the PARETO law, to identify the most common failures, as well as the most common causes of them. Through the Ishikawa diagram.

**Key words:** maintenance, reliability, mud pump, drilling, breakdowns