

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie électrique



Mémoire De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique

Spécialité : *Maintenance industrielle*

Thème :

Optimisation de la maintenance préventive de la pompe centrifuge

GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

Présenté par :

- TAKA Milynda.
- CHIBANI Newfel Rayene.

Membres de jury :

Président : Mr LAGGOUNE Radouane.

Université de Bejaïa

Examinateur : Mr ZOUGAB Nabil.

Université de Bejaïa

Promoteur : Mr AIT MOKHTAR El Hassene.

Université de Bejaïa

Remerciements

*Tout d'abord, nous tenons à remercier **Allah**, le tout puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaire pour à bien ce travail.*

*Nous remercions chaleureusement **Mademoiselle Lamia May** pour son encadrement attentif et ses orientations précieuses durant toute la période de réalisation de notre mémoire. Ses conseils utiles, sa rigueur et sa disponibilité ont beaucoup aidé à améliorer la qualité de notre travail.*

Nous vous remercions du fond du cœur pour votre engagement à nos côtés. Encore une fois, merci infiniment pour tout ce que vous avez fait pour nous.

*Nous remercions notre encadreur, Monsieur **Ait Mokhtar El Hassene**, pour son accompagnement et sa présence attentive durant toutes les étapes de travail.*

*Un grand merci à tout l'équipe de l'entreprise **SONATRACH-RTC Béjaïa** pour l'accueil chaleureux et l'ambiance cordiale qui nous ont été réservés.*

*Nous adressons une reconnaissance particulière aux membres du **département exploitation**, et tout spécialement à l'ingénieur **Alia Sofiane**, pour son soutien technique, ses explications claires et ses orientations précieuses.*

*Nos remerciements vont également aux **membres du jury**, qui nous ont fait l'honneur d'évaluer ce travail.*

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, près ou de loin, ont contribué d'une manière professionnelle ou universitaire à la réalisation de ce projet.

Je dédie ce modeste travail

*Je me dédie ce travail, à **moi-même**. Pour toutes les fois où j'ai douté, mais où j'ai continué. Pour les nuits blanches, les moments de solitude, les hésitations... mais aussi pour la force que j'ai trouvée en moi pour avancer, malgré tout. À la version de moi qui a rêvé, qui a persévétré, qui n'a pas abandonné.*

Je Suis Fière De Moi.

*Je dédie ce travail à **mes parents**, les piliers de ma vie, les premières personnes à croire en moi et à m'accompagner à chaque étape de mon parcours. Votre amour, votre patience et vos sacrifices silencieux m'ont permis d'avancer avec confiance, même dans les moments les plus difficiles.*

Que Dieu Les Protège.

*Je le dédie également à **mon frère** et **mes sœurs**, qui ont toujours été là pour moi, avec leur amour, leurs encouragements et leur présence réconfortante. Votre soutien m'a donné la force d'avancer. Merci d'être ma source de courage.*

Que Dieu Les Protège.

*Enfin, je dédie ce travail à mon binôme, **Chibani Newfel Rayene**, avec qui j'ai partagé chaque étape de ce projet. Merci pour ton soutien, ta patience et ton engagement tout au long de cette aventure.*

Je Suis Fier De Lui.

Milynda

Je rends grâce à Dieu de m'avoir donné le courage, la volonté et la conscience nécessaires pour mener à bien mes études.

Je dédie ce modeste travail

À mes parents qui m'ont toujours encouragé à aller de l'avant et qui m'ont entouré d'un amour inconditionnel tout au long de mon parcours. Aucun hommage ne saurait être à la hauteur de tout ce qu'ils m'ont offert.

Que Dieu leur accorde une bonne santé et une longue vie.

À mes deux frères et ma sœur, pour leur dévouement, leur compréhension et leur immense tendresse. Plus que de simples encouragements, ils m'ont offert leur temps, leur disponibilité, leurs conseils et leur amour.

Grâce à eux, j'ai persévétré, car ils ont toujours cru en moi.

À toute ma famille et à toutes les personnes que j'aime, pour leur présence constante et leur soutien inestimable tout au long de mon cheminement. À la mémoire de ma chère grand-mère, « Chikhe Mermiem », disparue le 06/06/2020, et à l'âme de mon frère « Benaouda », qui nous a quittés le 02/05/2025.

Que Dieu les accueille dans son vaste paradis.

À mon binôme Taka Milynda, ainsi qu'à toute la famille Taka, pour leur accompagnement et leur bienveillance.

À tous mes ami(e)s, sans exception, pour leur soutien, leurs sourires et leurs mots d'encouragement, enfin, À toute la promotion de Master 2 Maintenance Industrielle (2024/2025), avec qui j'ai partagé cette belle aventure académique.

Newfel Rayen

Table des matières

Sommaire

Introduction générale..... - 1 -

Chapitre 1

Présentation de Sonatrach RTC (SP3M'sila)

I.1 Introduction.....	- 4 -
I.2 Région de Transport de Centre (RTC)	- 4 -
I.2.1 Présentation de la RTC.....	- 4 -
I.2.2 Description de l'Oléoduc Bejaia 1 (OB1).....	- 5 -
I.2.3 Station de pompage SP3 M'sila	- 5 -
I.2.3.1 Présentation de la station SP3	- 5 -
I.2.3.2 Equipements principaux.....	- 6 -
I.2.3.3 Organisation de la station SP3	- 12 -
I.2.3.4 Service de Maintenance	- 12 -
I.3 Politique de Maintenance Préventive adoptée par l'entreprise.....	- 13 -
I.4 Position du problème	- 13 -
I.5 Conclusion	- 14 -

Chapitre 2

Description de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

II.1 Introduction	- 16 -
II.2 Généralités sur les pompes centrifuges	- 16 -
II.2.1 Définition de la pompe centrifuge	- 16 -
II.2.2 Description d'une pompe centrifuge	- 16 -
II.2.3 Principe de fonctionnement.....	- 17 -
II.3 Présentation de la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E 5.....	- 18 -
II.3.1 Définition.....	- 18 -
II.3.2 Description de la pompe	- 18 -
II.3.3 Conception de la pompe	- 19 -

Table des matières

II.3.4.1 Demi corps inférieur	- 19 -
II.3.4.2 Demi corps supérieur.....	- 19 -
II.3.4.3 Equipement du corps de la pompe	- 20 -
II.3.5 Mobile de la pompe	- 21 -
II.3.6 Garnitures mécaniques	- 22 -
II.3.7 Fiche technique de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5	- 23 -
II.3.8 Principe de fonctionnement.....	- 23 -
II.4 Conclusion	- 24 -

Chapitre 3

Rappels théoriques sur les politiques de maintenance

III.1 Introduction	- 26 -
III.2 Généralités sur la maintenance.....	- 26 -
III.2.1 La définition de la maintenance	- 26 -
III.2.2 Les objectifs de la maintenance	- 27 -
III.2.3 La Typologie de la maintenance.....	- 27 -
III.2.3.1 La maintenance préventive.....	- 28 -
III.2.3.2 Maintenance corrective	- 28 -
III.3 Rappels sur la sûreté de fonctionnement.....	- 28 -
III.3.1 Concepts de la fiabilité	- 28 -
III.3.2 Principales fonctions statistiques utilisées en fiabilité	- 28 -
III.3.3 Lois de probabilité usuelles utilisées en fiabilité	- 29 -
III.3.3.1 La loi exponentielle	- 29 -
III.3.3.2 Loi de Weibull	- 30 -
III.4 Politiques de maintenance.....	- 32 -
III.4.1 Définition d'une politique de maintenance	- 32 -
III.4.2 Politiques de maintenance des systèmes élémentaires	- 32 -
III.4.2.1 Politiques de maintenance selon l'âge	- 32 -
III.4.2.2 Politique de maintenance préventive périodique	- 32 -

Table des matières

III.4.2.3 Politique de remplacement périodique et réparation minimale	- 34 -
III.4.2.4 Politique de maintenance périodique imparfaite et réparation minimale.....	- 34 -
III.5 Modélisation de l'efficacité de la maintenance	- 35 -
III.5.1 Modèles de base	- 35 -
III.5.1.1 Modèle de maintenance minimale (ABAO).....	- 35 -
III.5.1.2 Modèle de réparation parfaite (AGAN)	- 36 -
III.5.1.3 Modèle de maintenance imparfaite	- 36 -
III.7 Conclusion.....	- 41 -

Chapitre 4

Optimisation de la Maintenance de la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

IV.1 Introduction	- 43 -
IV.2 Traitement statistique des données.....	- 43 -
IV.2.1 Historique des pannes	- 43 -
IV.2.2 Prélèvements des TBF.....	- 44 -
IV.2.3 Résultats de l'estimation	- 44 -
IV.3 Le choix de la politique et le modèle de maintenance	- 45 -
IV.4 Estimation des coûts de maintenance.....	- 45 -
IV.5 Optimisation du coût total de la maintenance	- 46 -
IV.6 Résultats de l'optimisation.....	- 49 -
IV.7 Conclusion.....	- 51 -
Conclusion générale	- 52 -

Liste des figures

Chapitre 1

Présentation de Sonatrach RTC (SP3M'sila)

Figure 1.1: Les Stations de Pompage de ligne OB1.....	5
Figure 1.2 : Station de Pompage -SP3 M'SILA	6
Figure 1.3 : Gare racleur arrivée (GRA)	6
Figure 1.4 : Gare racleur départ (GRD)	7
Figure 1.5 : Emplacement des filtres A, B et C	7
Figure 1.6 : Pompes booster A, B et C	8
Figure 1.7 : Les bacs de stockage 3A1 et 3A2.....	9
Figure 1.8 : Disposition des électro- pompes principales GEPA, B, C, D et E.....	9
Figure 1.9 : Soupapes de décharges PSV 303 et 304.....	10
Figure 1.10 : Réseau des Purges Gravitaires.....	10
Figure 1.11 : Disposition des pompes au niveau du Bac anti-incendie (B-302).....	11
Figure 1.12 : La ligne électrique haute tension de 60 KV.....	11
Figure 1.13 : Circuit processus principal de SP3	11
Figure 1.14 : Organigramme de la Station SP3	12

Chapitre 2

Description de de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

Figure 2.1: pompe centrifuge monocellulaire (en porte à faux)	16
Figure 2.2 : Fonctionnement d'une pompe centrifuge.....	17
Figure 2.3 : Groupe électropompe (GEP)	18
Figure 2.4 : Différents organes de la pompe DVMX.....	18
Figure 2.5 : Demi corps inférieur de la pompe.....	19
Figure 2.6 : Demi corps supérieur de La pompe.....	20
Figure 2.7 : douille d'équilibrage.....	20
Figure 2.8 : palier central.....	20
Figure 2.9 : bague d'étanchéité de butée.....	20
Figure 2.10 : bague d'usure	21
Figure 2.11 : grain de fond.....	21
Figure 2.12 : Roulement.....	21
Figure 2.13 : coussinet rotule.....	21
Figure 2.14 : l'arbre de la pompe.....	22
Figure 2.15 : Garnitures mécaniques.....	22
Figure 2.16 : Fonctionnement de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E.....	24

Liste des figures

Chapitre 3

Rappels théoriques sur les politiques de maintenance

Figure 3.1: Les deux groupes d'actions de la maintenance	27
Figure 3.2 : Types de maintenance	28
Figure 3.3 : la courbe de baignoire.....	31
Figure 3 .4 : principe de politique en périodique	33
Figure 3.5 : Intensité dans le modèle de maintenance minimale ABAO (selon la loi de Weibull $\beta=2,5483,\eta=168,8844)$	35
Figure 3.6 : Intensité dans le modèle de maintenance parfaite AGAN (selon la loi de Weibull)	36
Figure 3.7 : : Intensité de défaillance dans le modèle Brown-Prochan (selon la loi de Weibull pour $\beta = 2.5, \eta = 200$)	37
Figure 3.8 : : Intensité de défaillance dans le modèle de réduction (selon la loi de Weibull pour $\beta = 2.5, \eta = 200, \delta_1 = 3 * 10^{-4}, \delta_2 = 6 * 10^{-4}, \delta_3 = 6 * 10^{-4}$)	38
Figure 3.9 : Intensité de défaillance dans le modèle de réduction (selon la loi de Weibull pour $\beta = 2.5, \eta = 200, \alpha=0.8$)	38
Figure 3.10 : Intensité de défaillance dans le modèle de réduction proportionnelle de l'âge virtuel (selon la loi de Weibull pour $\beta = 2.5, \eta = 200$ et $\rho= 0.2$)	40
Figure 3.11 : Intensité de défaillance dans le modèle hybride (selon la loi de Weibull pour $\beta = 2.5$ et $\eta = 200$)	41

Chapitre 4

Optimisation de la Maintenance de la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

Figure 4.1 : algorithme d'optimisation avec ga.....	48
Figure 4.2 : Intensité de défaillance dans le modèle de réduction géométrique.....	49
Figure 4.3 : La fonction de coût en fonction de deux variables en 3D.....	50

Liste des tableaux

Chapitre 2

Description de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

Tableau 2.1 : Identification de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5.....	23
Tableau 2.2 : Spécification de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5.....	23

Chapitre 3

Rappels théoriques sur les politiques de maintenance

Tableau 3.1 : Fonctions statistiques de la loi exponentielle	30
Tableau 3.2 : Fonctions statistiques de la loi de Weibull	30

Chapitre 4

Optimisation de la Maintenance de la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

Tableau 4.1 : Historique des pannes de la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E 5.....	43
Tableau 4.2 : Influence du paramètre α sur le coût minimal et la période optimale T^*	51

Liste des symboles

Acronyme

- SONATRACH** : Société National de Transport et de Commercialisation des Hydrocarbures.
- RTC** : Région de Transport de centre.
- TRC** : Transport par Canalisation.
- OB1** : L'Oléoduc Bejaia 1.
- GG1** : Gazoduc 1.
- SOPEG** : Société de pétrochimie et d'énergie.
- SPM** : station de pompage Msila
- SNREPAL** : Société nationale de recherche et d'exploitation
- HEH** : Haoud-El-Hamra.
- TMB** : Terminal Marin Bejaia.
- SBM** : station de pompage béni Mansour
- GRA** : Gare racleur arrivée.
- GRD** : Gare racleur départ.
- GEP** : Groupe électropompes.
- DVMX** : Double volute a plusieurs étages.
- AFNOR** : Association Française de normalisation
- MTTF** : temps moyen avant-première défaillance.
- MTBF** : temps moyen entre deux défaillances successives.
- MDT** : temps moyen d'indisponibilité
- MUT** : temps moyen de disponibilité.
- MTTR** : temps moyen de réparation.
- ROOCOF** : Rate Of Occurrence Of Failure.
- ABAO** : As Bad As Old.
- AGAN** : As Good As New.
- BP** : Brown-Pochan.
- GM** : Garniture mécanique.
- COA** : cote oppose accouplement
- RG** : révision générale.
- MLE** : Maximum de vraisemblance.
- TBF** : temps bon fonctionnement.

Liste des symboles

Symboles

- λ : taux de défaillance
 β : paramètre de forme
 γ : paramètre de localisation
 η : paramètre d'échelle
 C_{min} : cout d'une réparation minimal
 C_p : cout d'une révision partielle
 C_{ov} : cout d'une révision générale
 C_c : cout corrective
 T : la périodicité d'une révision partielle
 K : nombre de cycle
 ρ : facteur d'amélioration
 δ : facteur de réduction altimétrique
 α : facteur de réduction géométrique

Fonctions

- $R(t)$: fonction de fiabilité
 $F(t)$: fonction de réparation
 $f(t)$: densité de probabilité
 $\lambda(t)$: taux de défaillance / l'intensité de défaillance
 MUT : Espérance mathématique
 $C(T)$: fonction des couts
 $H(T)$: Taux cumule

Introduction générale

Introduction générale

La maintenance occupe aujourd’hui une place stratégique au sein des industries. Elle est essentielle pour la performance, la sécurité et la rentabilité des installations. Elle englobe un ensemble d’activités telles que les inspections régulières, les réparations, le remplacement de pièces, les réglages, ainsi que les interventions préventives et correctives.

Ces actions contribuent significativement à améliorer la fiabilité des équipements et à réduire les temps d’arrêt. L’objectif principal est de maîtriser les coûts à long terme, d’optimiser la gestion budgétaire de l’entreprise et de prolonger la durée de vie des équipements, tout en minimisant les dépenses liées aux réparations imprévues.

Sonatrach est une compagnie pétrolière et gazière intégrée, opérant sur l’ensemble de la chaîne de valeur des hydrocarbures. Parmi les équipements essentiels à ses opérations, les pompes centrifuges jouent un rôle central. Elles sont notamment utilisées pour l’injection d’eau dans les puits lors opérations d’extraction du pétrole, ainsi que pour le transport de ce dernier par canalisation sur plusieurs centaines de kilomètres.

En raison de leur usage intensif et de leur exposition à des conditions de fonctionnement souvent sévères, les pompes centrifuges sont sujettes à divers types de dégradation, pouvant altérer leur performance et leur fiabilité.

Les systèmes mécaniques tels que les pompes centrifuges utilisées au sein de Sonatrach nécessitent généralement deux approches principales de maintenance : la maintenance préventive et la maintenance corrective. Dans le cadre du présent travail, l’accent est mis sur la maintenance préventive, dont l’objectif est de préserver, voire d’optimiser, les performances des équipements tout en réduisant les risques de défaillance.

Cette approche consiste à planifier des interventions régulières, fondées sur l’analyse des risques de défaillance potentielle ou sur une évaluation progressive de la dégradation fonctionnelle des équipements. En anticipant les dysfonctionnements, la maintenance préventive contribue à améliorer la fiabilité et la disponibilité des systèmes, tout en maîtrisant les coûts d’exploitation.

Le principe fondamental de la maintenance préventive réside dans l’anticipation des pannes, afin d’éviter les arrêts non planifiés en cours d’exploitation. Pour appliquer efficacement cette stratégie aux équipements industriels, des chercheurs ont développé des modèles et des politiques de maintenance visant soit à remettre le système dans un état fonctionnel équivalent à celui d’origine (maintenance parfaite), soit à le maintenir dans l’état dans lequel il se trouvait juste l’intervention (maintenance minimale).

Introduction générale

Dans ce cadre, le système peut atteindre un état intermédiaire, compris entre l'état « Aussi Bon qu'Ancien » (ABAO) et l'état « Aussi Bon que Neuf » (AGAN). Cette conceptualisation a conduit au développement de plusieurs approche de maintenance imparfaite, qui visent à modéliser de manière plus réaliste l'effet des interventions sur l'état des équipements. Ces modèles permettent de mieux représenter les situations où la maintenance ne restaure pas complètement l'équipement, mais améliore néanmoins son fonctionnement par rapport à l'état dégradé initial.

L'optimisation des politiques de maintenance représente ainsi un enjeu stratégique majeur pour assurer la sûreté, la fiabilité et la performance durable des systèmes industriels. C'est dans cette optique que de nombreuses recherches ont proposé des approche mathématique et décisionnelles permettent de définie des politiques de maintenance optimales, tenant compte à la fois des coûts, de la disponibilité et du vieillissement des équipements.

Les objectifs de ce travail sont répartis comme suit à travers les quatre chapitres du mémoire :

- Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise SONATRACH-RTC Béjaïa, de ses équipements, du service de maintenance, ainsi que de la problématique.
- Chapitre 2 : Étude des pompes centrifuges en général, accompagné d'une description détaillée de l'équipement concerné.
- Chapitre 3 : Introduction aux notions fondamentales de la maintenance, à ses différents types, et au concept de fiabilité. Ce chapitre comprend également une présentation des politiques et des modèles d'efficacité de maintenance.
- Chapitre 4 : Partie finale consacrée à l'optimisation de la maintenance préventive de la pompe étudiée. Elle inclut le choix de la politique de maintenance adoptée, l'analyse des paramètres influents, ainsi que la détermination de la stratégie optimale visant à réduire les coûts en assurant un haut niveau de performance.

Chapitre 1 :

Présentation de

Sonatrach RTC

(SP3M'sila)

I.1 Introduction

SONARACH, la Société Nationale de Transport et de Commercialisation des Hydrocarbures, a été créée le 31 décembre 1963 par le décret n°63-491. Initialement, sa mission se limitait au transport et à la commercialisation des hydrocarbures. Toutefois, son mandat a été considérablement élargi à partir du 22 septembre 1966, avec le décret n°66-292, lui conférant de nouvelles prérogatives incluant l'exploration, la production et la transformation des hydrocarbures.

Au fil des décennies, SONATRACH a progressivement diversifié ses activités pour intégrer des domaines complémentaires, tels que la production d'électricité, le développement des énergies nouvelles et renouvelables, ainsi que le dessalement de l'eau de mer. Aujourd'hui, le groupe exerce ses activités non seulement sur l'ensemble du territoire algérien, mais également à l'échelle internationale, en saisissant des opportunités stratégiques sur différents marchés [1].

Notre étude se focalise plus précisément sur la Région de Transport Centre (RTC), une unité stratégique de SONATRACH, spécialisée dans le transport des hydrocarbures par canalisation. L'analyse portera en particulier sur la station de pompage SP3, localisée dans la wilaya de M'Sila, qui constitue un élément clé de l'oléoduc Béjaïa 1 (OB1). Cette station joue un rôle fondamental dans le maintien de la pression et du débit nécessaire au bon fonctionnement du système de transport des hydrocarbures sur de longues distances.

I.2 Région de Transport de Centre (RTC)

I.2.1 Présentation de la RTC

La Région de Transport Centre (RTC) est l'une des cinq régions de l'activité de transport des hydrocarbures de SONATRACH. Elle est chargée du transport par canalisation, du stockage et de l'exportation du pétrole brut, qui est acheminé vers les clients via le port de Béjaïa et le poste de chargement en mer (SPM).

La RTC est située à 2 km au sud-ouest de la ville de Béjaïa. Elle est divisée en deux parcs de stockage (Nord et Sud) et comprend également le port pétrolier, qui se trouve à environ 8 km au nord de cette dernière, avec son propre parc de stockage.

La RTC est chargée de l'exploitation de l'oléoduc Béjaïa 1 (OB1) et du gazoduc 1 (GG1) reliant Hassi R'mel au terminal d'arrivée de Bordj- Menaïel. Ce gazoduc approvisionne en gaz naturel, depuis 1981, l'ensemble des villes du centre du pays [2].

I.2.2 Description de l'Oléoduc Bejaia 1 (OB1)

L'oléoduc Béjaïa 1 (OB1) est le premier ouvrage de transport par canalisation réalisé par SOPEG en Algérie en 1957, par la compagnie de pétrole CEP et SNREPAL. Il a été mis en service en 1959 pour relier Hassi El- Hamra au terminal marin de Béjaïa [3].

L'oléoduc OB1, de diamètre 24 pouces et de longueur totale 660,72 km, est composé de deux tronçons :

- Un premier tronçon reliant le terminal HEH au col de Selatna, qui constitue le point le plus culminant de la ligne (1 033 m d'altitude), d'un diamètre de 24 pouces et d'une longueur de 533,17 km.
- Un second tronçon reliant le col de Selatna au terminal marin, dont le diamètre est 22 pouces sur une longueur de 127,551 km, où l'écoulement est gravitaire. Le diamètre a été réduit de 24 à 22 afin d'obtenir une pression finale adéquate pour acheminer le pétrole brut vers les bacs de stockage de terminal marin (TMB). Sur ce tronçon, le produit transporté peut également être transféré vers la station de pompage SBM de bénî Mansour pour alimenter la raffinerie d'Alger via l'oléoduc OG1.

Les stations de pompage sont chargées de faire circuler les produits sous haute pression (HP) à des vitesses de l'ordre de 1 à 3 m/s (3,6 à 10 km/h). Elles sont équipées de pompes montées en série ou en parallèle, destinées à fournir l'énergie de pression nécessaire pour vaincre les pertes de charge. On les observe dans la figure 1.2.

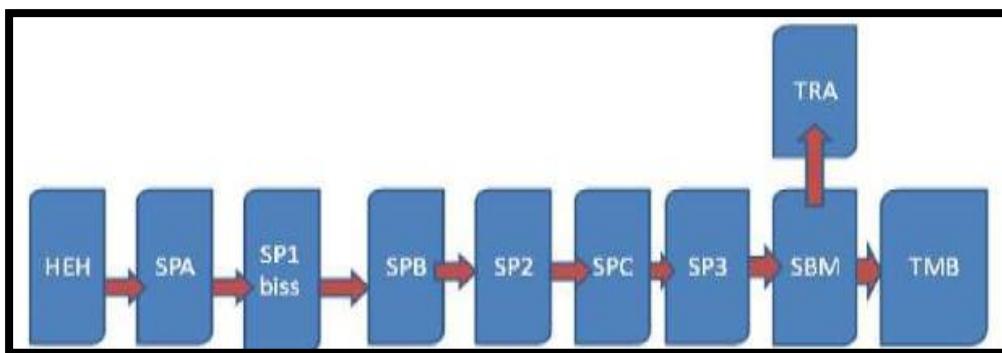


Figure 1.1: Les Stations de Pompage de ligne OB1

I.2.3 Station de pompage SP3 M'sila

I.2.3.1 Présentation de la station SP3

La station de pompage de M'Sila est l'une des plus importantes à l'échelle nationale en matière de transport par canalisation de pétrole brut. Elle est située à la sortie de la zone industrielle du chef-lieu de la wilaya de M'Sila, au PK 495, à une altitude de 465 m et à 248 km de la capitale Alger. Cette station permet le transport du brut vers Béjaïa et la raffinerie d'Alger, comme présenté sur la figure 1.2.

Les voies d'accès principales sont :

- Routes nationales n°40 et n°45.
- Aérogare d'Alger, de Béjaïa et de Constantine.



Figure 1.2 : Station de Pompage -SP3 M'SILA [4]

I.2.3.2 Equipements principaux

La station SP3 se compose en plusieurs équipements essentiels mentionnés comme suit :

a) Gares racleurs

- **Gare racleur arrivée (GRA)**

À l'arrivée de l'oléoduc 24 à la station SP3, celui-ci se termine par la gare racleur arrivée, qui sert à la réception d'un racleur envoyé depuis la station SP2. En fonctionnement normal, la gare racleur arrivée est isolée en fermant ses vannes d'entrée MOV301 et MOV302, ce qui permet l'envoi des hydrocarbures vers le bac de décantation pendant la réception.

En plus des vannes d'isolement, cette gare est équipée de deux pigs signalés qui permettent de confirmer l'entrée du racleur dans la gare, ainsi que d'une soupape de sécurité tarée à 9,8 bars, comme montre la figure 1.3.



Figure 1.3 : Gare racleur arrivée (GRA) [4]

➤ Gare racleur départ (GRD)

Au refoulement des pompes principales, e, série avec l'oléoduc d'expédition 24, se trouve la GRD, qui sert à envoyer un racleur vers le terminal de Béjaïa. En fonctionnement normal, les pompes principales refoulent directement vers la conduite d'expédition sans passer par la gare racleur. Celle-ci est isolée par sa vanne de sortie MOV327 et sa vanne de mise sous pression MOV26 (fermées), comme représenté sur la figure 1.4.

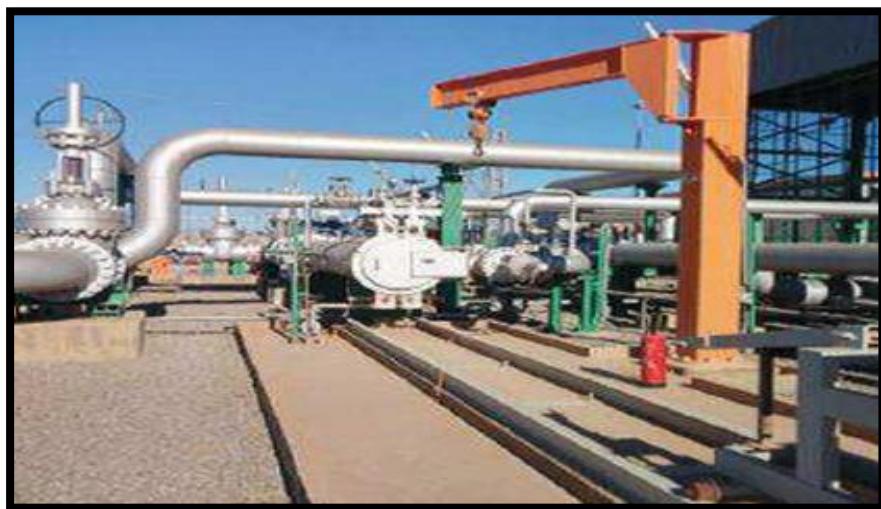


Figure 1.4 : Gare racleur départ (GRD) [4]

b) Trois (03) filtres

Le rôle d'un filtre est de filtrer le brut en tenant les éléments solides. La capacité de filtrage d'un filtre est 900 m³/h. Il y a un transmetteur de pression qui mesure la différence de pression entre l'entrée et la sortie, et s'il y a un bouchage dans un filtre, la différence entre la pression de la sortie et celle de l'entrée est inférieure ce qui va créer une alarme pour nettoyer le filtre comme montre la figure 1.5.



Figure 1.5 : Emplacement des filtres A, B et C

c) Trois (03) pompes Boosters :

Trois (03) électropompes booster sont des pompes centrifuges à deux (02) étages, immergées et entraînées par des moteurs électriques. Leur rôle est d'assurer une pression pouvant atteindre jusqu'à 8 bars avec un débit de 1155 m³/h chacune. Il est possible d'utiliser deux pompe principales GEP avec une seule pompe booster en marche. En cas de fonctionnement avec trois pompes principales GEP, il faut démarrer également une deuxième pompe booster.

Les boosters sont utilisés pour éviter la cavitation au niveau des GEP, notamment dans les conduites de refoulement des boosters et d'aspiration des GEP. La figure 1.6 représente les pompes A, B et C.



Figure 1.6 : Pompes booster A, B et C

d) Deux (02) Bacs de stockage à toit flottant (3A1 et 3A2)

Le flottant est un disque qui flotte sur le liquide, en suivant les mouvements de descente et de montée du produit. Pour permettre ces déplacements, un espace annulaire libre existe entre le toit et la robe de la cuve. Il est obturé par un système d'étanchéité déformable, qui permet au toit de coulisser sans entraves à l'intérieur de la robe.

Les réservoirs de stockage tampon 3A1 et 3A2 sont tous deux utilisés en opération. Leurs capacités sont 20 000 m³ chacun, comme on peut l'observe dans la figure 1.7.



Figure 1.7 : Les bacs de stockage 3A1 et 3A2

e) Cinq (05) Groupe électropompes (GEP) en parallèle

Cinq (05) groupes électropompes GEP, alimentés en parallèle comme présenté sur la figure 1.8, assurent le pompage. La pompe transforme l'énergie mécanique issue de son moteur électrique à vitesse variable d'entrainement en énergie hydraulique.

La pompe objet de notre étude est une pompe centrifuge multicellulaire à joint axial, de marque GUINARD, de type « DVMX6811 » à cinq (05) étages. Elle fournit au pétrole une énergie cinétique avant de la transformer en énergie de pression. Son avantage est pouvoir véhiculer de gros débits de manière régulière.

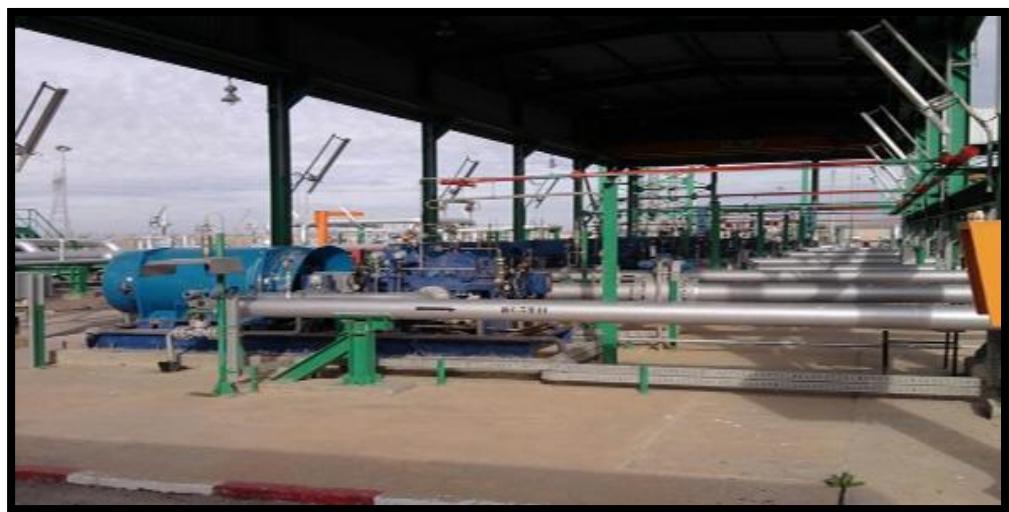


Figure 1.8 : Disposition des électro-pompes principales GEP A, B, C, D et E

f) Quatre (04) soupapes de décharges

Les soupapes de décharge sont installées à l'entrée de la station. Elles assurent la protection contre la surpression et sont tarées à 12 bars, dont deux (02) sont en service et les deux (02) autres en réserve. De même, une autre soupape est installée à la sortie de la station, tarée à 74,5 bars, comme le présente la figure 1.9.



Figure 1.9 : Soupapes de décharges PSV 303 et 304

g) Réseau des Purges Gravitaires

Les purges gravitaires de la station de pompage sont récupérées par le réservoir de purge B-301, une citerne instrumentée et installée dans une fosse. Les purges sont réinjection dans le réservoir de décantation pour être ensuite envoyées dans les réservoirs de stockage tampon (3A1 et 3A2). La figure 1.10 présente le réseau des purges gravitaires.

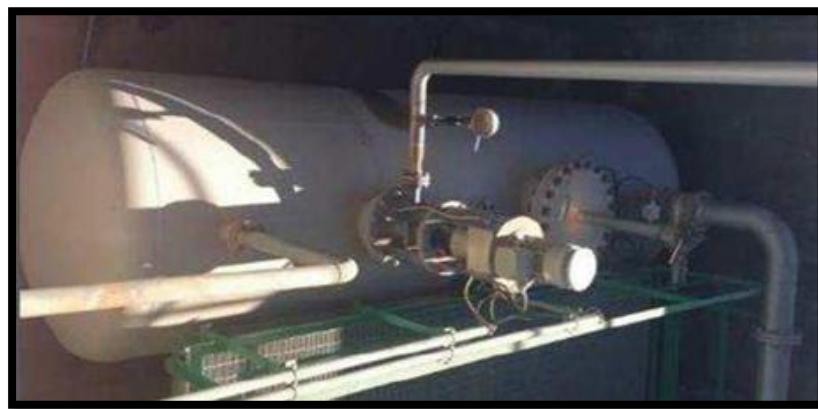


Figure 1.10 : Réseau des Purges Gravitaires

h) Centrale anti-incendie

- Deux (02) pompe jockey (25 m³/h avec une vitesse 2930 tr/min).
- Deux (02) pompes principales (150 m³/h avec une vitesse 2960 tr/min).
- Une (01) motopompe (CUMMINS) (300m³/h avec une vitesse 2100tr/min).
- Deux (02) pompes doseuses (fier dos).
- Une (01) citerne de stockage d'émulseur 10 m³.

La figure 1.11 est montre la disposition des pompes au niveau du Bac anti-incendie (B-302).

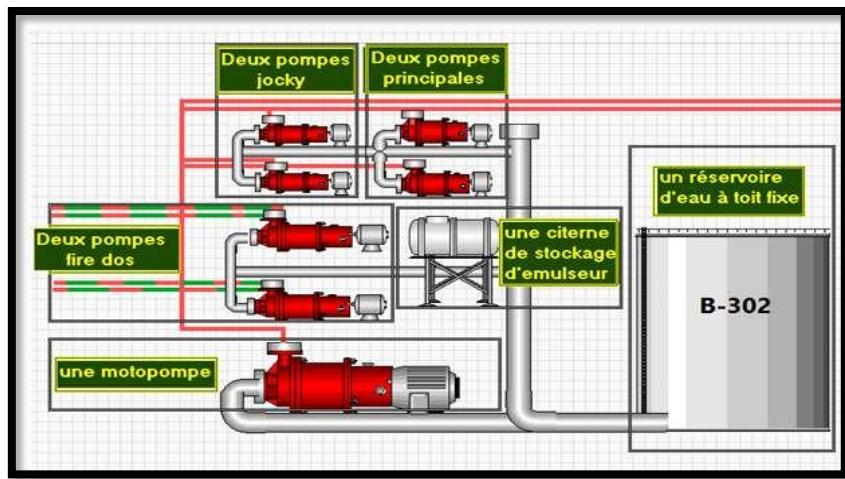


Figure 1.11 : Disposition des pompes au niveau du Bac anti-incendie (B-302)

i) Bâtiment d'énergie

Un (01) bâtiment d'énergie alimenté par une ligne électrique à haute tension (60 kV) montre sur la figure 1.12.



Figure 1.12 : La ligne électrique haute tension de 60 KV

Le circuit process principal de cet équipement est montré dans la figure 1.13.

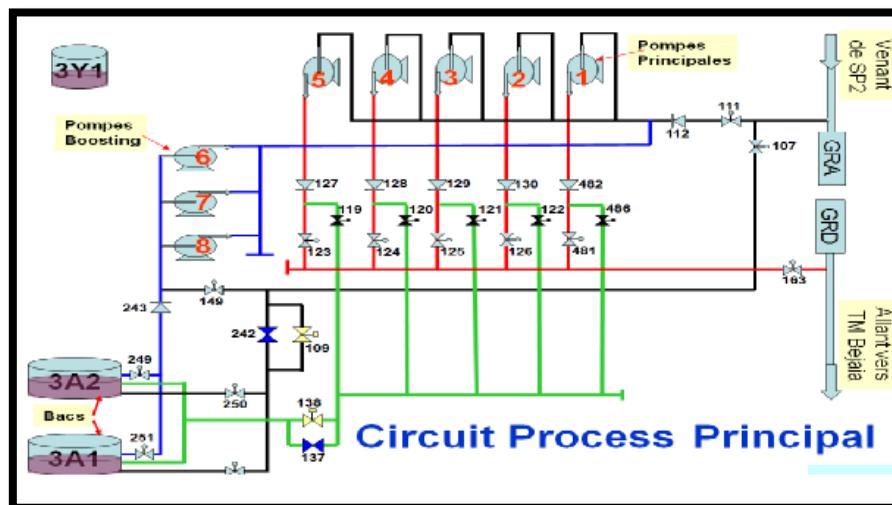


Figure 1.13 : Circuit processus principal de SP3 [2]

I.2.3.3 Organisation de la station SP3

Le plan de l'organisation de la station SP3 se montre dans la figure 1.14.

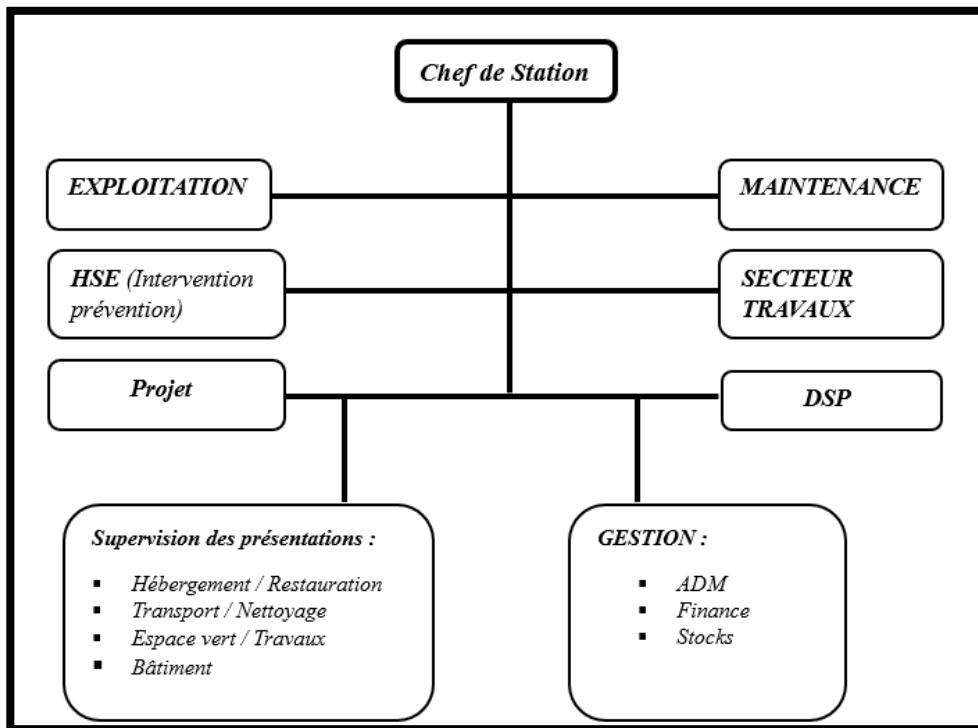


Figure 1.14 : Organigramme de la Station SP3 [5]

I.2.3.4 Service de Maintenance

Le service de maintenance à la fois la maintenance préventive et curative des équipements. Il prend en charge l'ensemble des opérations de maintenance de niveaux 1 et 2 dans les domaines de l'électricité, de la mécanique, de l'instrumentation et de la climatisation. Ce service se compose des trois sections suivantes [5] :

i. Mécanique

La section mécanique réalise les tâches suivantes :

- Visites programmées des équipements.
- Entretien général.
- Contrôle systématique des équipements et diagnostic.
- Graissage des équipements (pompes, vannes...), contrôle d'alignement des GEP.

ii. Instrumentation

Les section instrumentation réalise les tâches suivantes :

- Contrôle visuel des instruments des différentes installations.
- Vérification et nettoyage des instruments.
- Maintien du bon fonctionnement des instruments (débouchage, calibrage, étalonnage...).

- Ronde et inspection des différents paramètres (vibration, température, pression...).

iii. Électricité et Climatisation

La section électricité réalise les tâches suivantes :

- Contrôle visuel des équipements électriques (VVF, transformateur...).
- Contrôle et lecture des différents paramètres électriques.
- Visites programmées des équipements électriques.
- Intervention sur les pannes imprévues.
- Vérification et nettoyage des installation de climatisation.

I.3 Politique de Maintenance Préventive adoptée par l'entreprise

Les observations réalisées lors de notre stage au sein de Sonatrach RTC Béjaïa, ainsi que les entretiens menés avec l'ingénieur responsable de la maintenance, ont permis de constater que l'entreprise met en œuvre une politique de maintenance préventive, reposant sur deux types d'interventions principales :

- Une maintenance préventive systématique, effectuée toutes les 24 000 heures de fonctionnement, correspondant à une révision partielle des équipements.
- Une maintenance préventive générale, réalisée à intervalles plus étendus, visant une remise en état plus complète (révision générale).

Ces deux types de maintenance sont appliqués de manière complémentaire afin de garantir la fiabilité et assurer la disponibilité des équipements, notamment la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 5 étages. Cette stratégie s'inscrit dans un cadre où la sécurité, la continuité des opérations et l'optimisation des performances dans le secteur pétrolier sont enjeux majeurs.

I.4 Position du problème

Dans le secteur stratégique du transport des hydrocarbures, la fiabilité des équipements tels que les pompes centrifuges est un facteur déterminant pour assurer la continuité des opérations et prévenir les interruptions coûteuses. La pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5, utilisée au terminal marin de RTC Béjaïa, joue un rôle crucial dans le processus de pompage et de transfert du pétrole brut. Toutefois, cette pompe est soumise à une sollicitation constante, entraînant une usure progressive de ses composants, ce qui peut entraîner des pannes imprévues, des arrêts de production et une augmentation des coûts de maintenance.

Or, la planification des opérations de maintenance, notamment les révisions partielles, repose souvent sur des intervalles fixes ou empirique, qui ne tiennent pas toujours compte de l'état réel de l'équipement ni de l'optimisation des coûts.

Cela soulève une question centrale : comment déterminer une périodicité optimale des révisions partielles afin de minimiser les coûts de maintenance ?

I.5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'analyse en détail la station de pompage de M'Sila (SP3), qui occupe une place stratégique dans le dispositif de transport du pétrole brut. Cette station comprend cinq pompes principales assurant l'acheminement continu des hydrocarbures au sein du réseau de canalisation. L'étude de son architecture technique, de ces principaux composants, de ses modes de fonctionnement ainsi que de son organisation interne met en lumière la complexité du système, tout en soulignant les exigences élevées en matière de fiabilité, de sécurité et de performance opérationnelle.

Chapitre 2 :

Description de la

pompe GUINARD

DVMX 6.8.11 E 5

II.1 Introduction

Le transfert des liquides contre la gravité existait depuis des temps immémoriaux. Une pompe et un dispositif de ce type qui dépense de l'énergie pour éléver, transporter ou comprimer des liquides.

Les pompes centrifuges représentent l'une des technologies de pompage les plus répondues dans le monde industriel moderne. Ces dispositifs, qui fonctionnent sur le principe de la force centrifuge, sont essentiels dans de nombreux secteurs allant du traitement des eaux à l'industrie pétrolière.

II.2 Généralités sur les pompes centrifuges

II.2.1 Définition de la pompe centrifuge

Les pompes centrifuge sont des machines rotatives utilisées pour transporter des fluides par l'effet de la force centrifuge. Elles transforment l'énergie mécanique d'un moteur en énergie hydraulique le plus souvent et sont largement utilisées dans de nombreux secteurs industriels, notamment le traitement de l'eau et l'industrie pétrolière....

II.2.2 Description d'une pompe centrifuge

La pompe centrifuge la plus simple est la pompe monocellulaire à roue en porte-à-faux, comme représentée sur la figure 2.1.

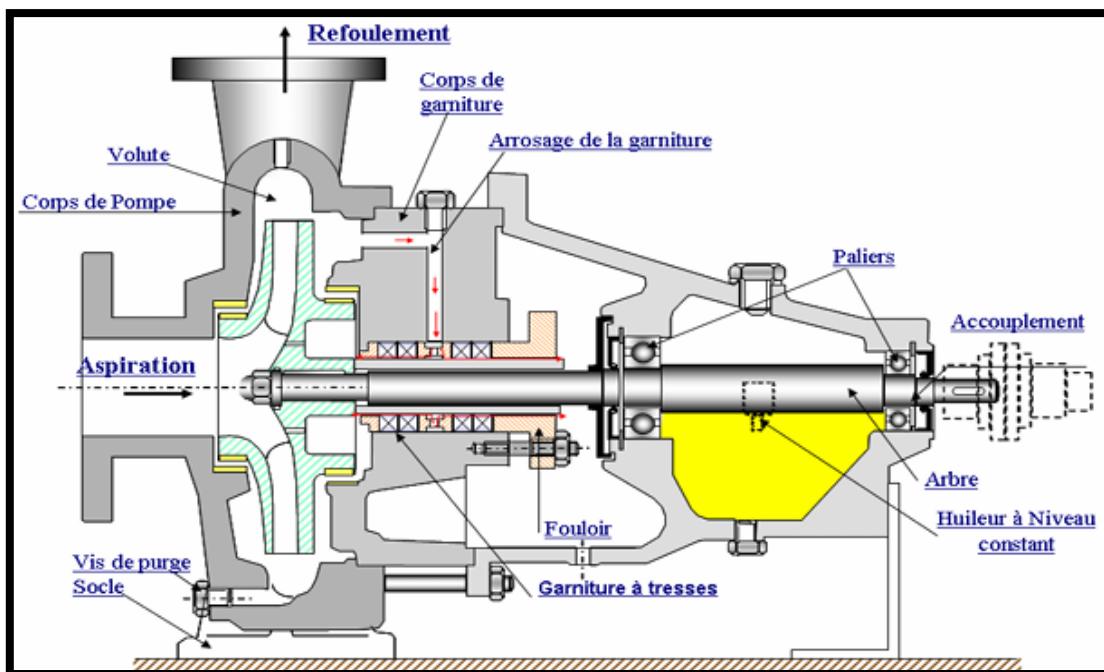


Figure 2.1 : pompe centrifuge monocellulaire (en porte à faux)

II.2.3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge repose sur la conversion de l'énergie mécanique en énergie hydraulique à travers la force centrifuge générée par un impulsor en rotation, comme montre sur la figure 2.2.

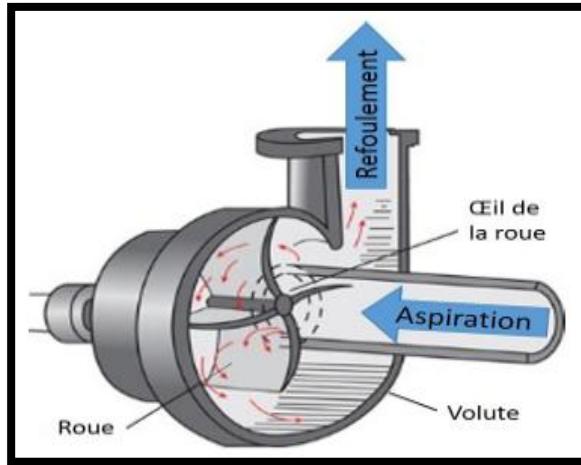


Figure 2.2 : Fonctionnement d'une pompe centrifuge [6]

a. L'aspiration

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur, dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor.

La pompe étant amorcée, c'est-à-dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et, par conséquent, la pression dans l'ouïe diminue, ce qui engendre une aspiration et maintient l'amorçage [6].

b. L'accélération

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. À la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute, dont le but est de collecter le fluide et de ramener dans la section de sortie. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression [6].

c. Le refoulement

Dans l'élargissement en sortie, qui se comporte comme un divergent, le liquide perd de la vitesse au profit de l'accélération de pression : l'énergie cinétique est convertie en énergie de pression au niveau du diffuseur [6].

II.3 Présentation de la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

II.3.1 Définition

Les pompes principales GEP (groupe électropompe) GUINARD DVMX 6.8.11 E 5 sont des pompes centrifuges multicellulaires à 5 étages, entraînées par un moteur électrique d'une puissance de 1600kW, relié par un accouplement.

Ce moteur est alimenté par un variateur de vitesse à fréquence, ce qui permet d'optimiser le fonctionnement de la pompe. On utilise cette pompe pour le transport de pétrole brut dans la station de pompage SP3 M'sila. L'emplacement de cette dernière est montré sur la figure 2.3.



Figure 2.3 : Groupe électropompe (GEP)

II.3.2 Description de la pompe

Cette pompe est équipée de plusieurs organes essentiels qui assurent son bon fonctionnement, comme représenté sur la figure 2.4.

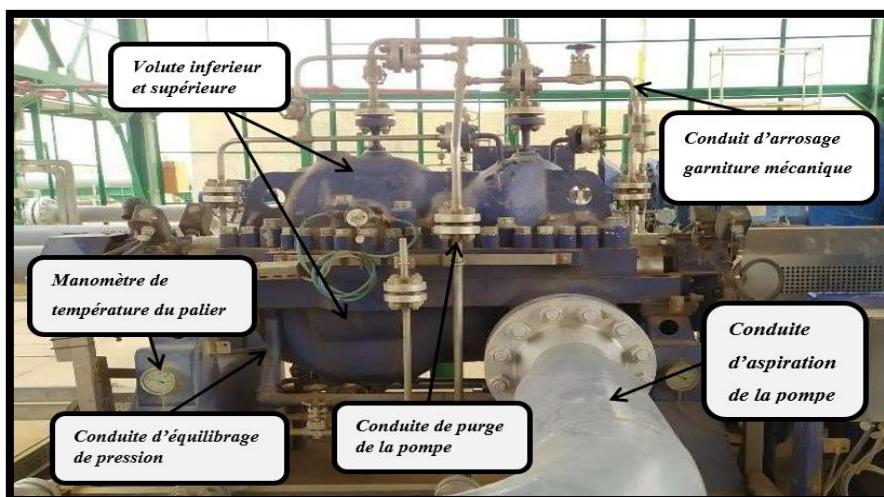


Figure 2.4 : Différents organes de la pompe DVMX

II.3.3 Conception de la pompe

C'est une pompe horizontale multi-étages à plan de joint axial (en deux parties avec le plan du joint principal parallèle à l'axe de l'arbre) et à double volute, avec cinq roues d'aspiration, la première à double entrée et les quatre autres à simples entrée. Les roues sont montées en opposition afin d'assurer l'équilibrage hydraulique et de minimiser la poussée axiale. Pour réduire les charges de la poussée radiale, le corps est équipé d'un système à doublé volute [7].

II.3.4 Corps de la pompe

Le corps de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5 est divisé en deux parties de volute (supérieur et inférieur), en acier au carbone moulé de la catégorie WCB selon la norme ASTM A216. Les deux demi corps sont assemblés horizontalement par des goujons (boulons d'assemblage).

II.3.4.1 Demi corps inférieur

La figure 2.5 montre le demi-corp inférieur, qui comporte :

- Des conduites d'aspiration d'un diamètre de 8 pouces et de refoulement d'un diamètre de 6 pouces, équipées de bossage pour instruments de mesure de pression.
- Des canaux de liaison inter-étages.
- Une purge pour la vidange de la pompe.
- Une tuyauterie de by-pass pour l'équilibrage des garnitures.



Figure 2.5 : Demi corps inférieur de la pompe

II.3.4.2 Demi corps supérieur

Demi corps supérieur est montré sur la figure 2.6 :

- Les canaux de liaison inter-étages.
- Les événements taraudés pour la purge d'air.
- Les œilletons pour le levage.
- Des œilletons pour levage.



Figure 2.6 : Demi corps supérieur de La pompe

II.3.4.3 Equipment du corps de la pompe

Le corps de la pompe est équipé des éléments suivant (photos prises au sein de l'entreprise) :

- Une douille d'équilibrage, selon la figure 2.7.
- Palier centrale, est représenté sur la figure 2.8.
- La bague d'étanchéité de la butée, montrée sur la figure 2.9.
- Une bague d'usure arrêtée en rotation par ergots, comme présenté sur la figure 2.10.
- Un grain de fond, comme le montre la figure 2.11.
- Deux roulements à contact côte butée, comme l'illustre la figure 2.12.
- Un coussinet rotule, présenté sur la figure 2.13.



Figure 2.7 : douille d'équilibrage

Figure 2.8 : palier central

Figure 2.9 : bague d'étanchéité de butée



Figure 2.10 : bague d'usure



Figure 2.11 : grain de fond



Figure 2.12 : Roulement



Figure 2.13 : coussinet rotule

II.3.5 Mobile de la pompe

La figure 2.14 représente le mobile de la pompe, qui comporte :

- Un arbre cylindrique de diamètre constant.
- Des roues placées en opposition, correspondant aux canaux d'aspiration et à la volute du corps.
- Une bague d'usure.
- Des paliers.

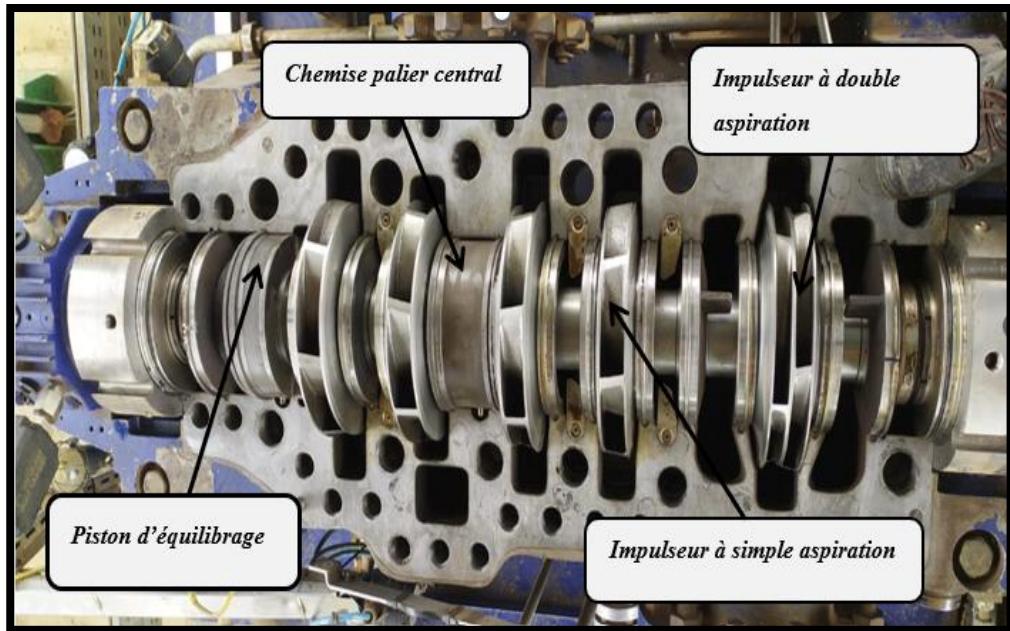


Figure 2.14 : l'arbre de la pompe

II.3.6 Garnitures mécaniques

Il s'agit de l'étanchéité entre l'intérieur de la pompe et l'extérieur. Le point critique est le jeu entre l'arbre et le corps de pompe. L'étanchéité est réalisée par un système appelé garniture mécanique, repère 433, présenté sur la figure 2.15, où l'étanchéité est assurée par contact entre une pièce fixe et une pièce mobile solidaire de l'arbre. Les deux faces en contact doivent avoir un excellent état de surface. La fuite obtenue est alors très faible. Ces garnitures tendent à remplacer de façon quasi-totale les garnitures à tresses.



Figure 2.15 : Garnitures mécaniques

II.3.7 Fiche technique de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

Le tableau 2.1 présente les identifications de la pompe :

Tableau 2.1 : Identification de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

Equipement	Pompe centrifuge multi étage
Marque	DAVID BROWN GUINARD PUMPS
Repère	P-301 « A »
N° de Série	P000296
Date de mise en service	2008
Cumul heures de marche	39323 :40(19-12-2020)
Nombre de démarrage	521 (19-12-2020)
DV	Double volute
MX	A plusieurs étages
6	Diamètre bride refoulement 6
8	Diamètre bride aspiration 8
11E	Diamètre nominal roue 11

Spécification de la pompe est montre dans le tableau 2.1 :

Tableau 2.2 : Spécification de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

Type de taille de pompe	DVMX 6.8.11 E
Nombres d'étages	5 étages
Produit pompé	Pétrole brute a densité $d=800(\text{kg/m}^3)$
Température de service (k)	293
Débit (m^3/h)	600
Hauteur différentielle HMT (m)	838
Vitesse de rotation (tr/min)	3560
Puissance absorbée (kW)	1375
Pression d'aspiration (bar)	6
Pression de refoulement (bar)	103.7
Rendement (%)	79.7
NPSH disponible (mce)	7<
NPSH requise (mce)	9.7

II.3.8 Principe de fonctionnement

Dans une pompe multicellulaire, plusieurs roues (aussi appelées impulseurs) sont montées successivement. Dans cette pompe, il y a cinq impulseurs. L'impulseur du 1ere étage (à double aspiration) va refouler dans l'impulseur du 2ème étage, le 2ème dans le 3ème, ainsi de suite jusqu'à 5ème impulseur, qui va refouler vers la conduite de refoulement, comme représenté sur la figure 2.16.

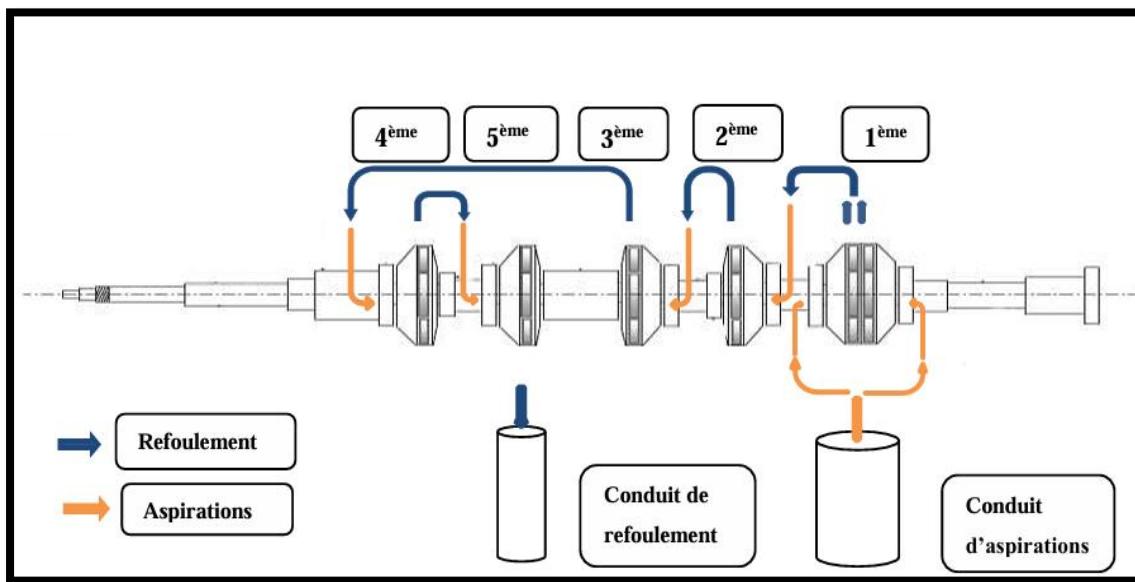


Figure 2.16 : Fonctionnement de la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

- La différence de pression entre le centre et la périphérie de l’impulseur provoque un retour du liquide à l’aspiration (donc des pertes de rendement). On limite cette circulation de fluide avec les bagues d’étanchéité.
- La différence de pression entre la chambre d’aspiration du 4^{ème} impulseur et la garniture mécanique est diminuer (de 64 bars jusqu’à 6 bars) par la douille et du piston d’équilibrage.
- L’étanchéité de la pompe est assurée par deux garnitures mécaniques.
- Le positionnement axial du rotor est assuré par une buté.
- Le positionnement radial du rotor est assuré par deux palier lisses.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les pompes centrifuges, qui occupent une place centrale dans le fonctionnement des infrastructures de transport pétrolier, notamment au sein de la compagnie Sonatrach. Ces équipements se distinguent par leur principe de fonctionnement basé sur la force centrifuge, leur permettant d’assurer un transfert efficace et continu des hydrocarbures.

L’attention a été plus particulièrement sur la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 à 5 étages, utilisée dans certaines stations de pompage pour ses caractéristiques de robustesse, de fiabilité et de performance élevée. Ce modèle est conçu pour répondre aux exigences industrielles les plus strictes en matière de pression et de débit, contribuant ainsi à l’efficacité globale du système de transport.

Chapitre 3

Rappels théoriques

sur les politiques de

maintenance

III.1 Introduction

La maintenance occupe une place primordiale dans le cycle de vie des équipements industriels, notamment au sein des installations stratégiques de Sonatrach, telles que les stations de pompage. Dans ce contexte, les pompes centrifuges, comme le modèle GUINARD DVMX 6.8.11 à 5 étages, sont soumises à des conditions de fonctionnement rigoureuses nécessitant un suivi technique rigoureux.

Ces équipements, classés parmi les systèmes réparables, font l'objet d'interventions de maintenance imparfaite (ou partielle), visant à améliorer leur disponibilité, à prolonger leur durée de vie utile et à optimiser leur état fonctionnel après chaque intervention. Une telle démarche permet de développer et d'appliquer des politiques de maintenance préventive adaptées, essentielles pour garantir la fiabilité et la performance continue des systèmes dans un environnement aussi exigeant que celui du transport des hydrocarbures.

III.2 Généralités sur la maintenance

III.2.1 La définition de la maintenance

La norme AFNOR (NF X 60-010) définit la maintenance comme étant : « ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». Comme l'indique le document d'introduction (X 60-000), cette norme néglige l'aspect économique : « bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût global optimal » [8].

La maintenance ne se limite pas à la réparation ou aux interventions techniques c'est aussi de la gestion et de l'organisation. Sans ces deux dernières, les résultats pourraient être très mauvais. En effet, si l'on dispose d'une équipe de maintenance composée d'orfèvres en matière d'intervention mais, malheureusement, pour une négligence administrative ou de gestion, les pièces de rechange requises ne sont pas disponibles donc le management et l'administration sont deux nécessités impérieuses pour la maintenance comme pour toute autre activité d'ailleurs comme présenté dans la Figure 3.1.

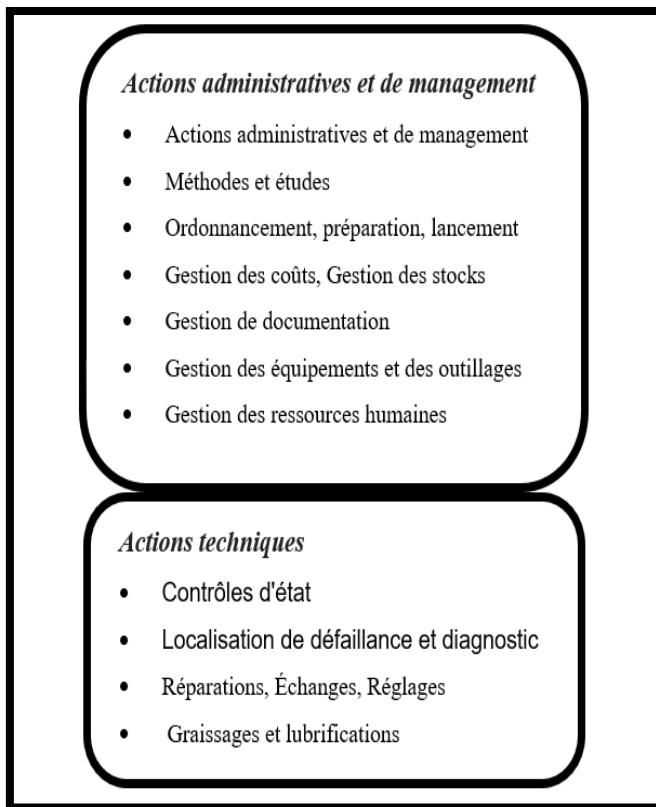


Figure 3.1 : Les deux groupes d'actions de la maintenance [9]

III.2.2 Les objectifs de la maintenance

Le rôle principal d'un service maintenance est de maintenir les capacités opérationnelles des moyens de production, ainsi que leurs valeurs patrimoniales, c'est-à-dire garantir le bon fonctionnement des équipements et selon la politique de maintenance de l'entreprise, les objectifs de la maintenance seront :

- Assurer la disponibilité et la fiabilité des équipements.
- Prolonger la durée de vie des équipements.
- Optimiser les coûts de maintenance.
- Améliorer la performance des machines ou des systèmes.
- Garantir la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais.
- Assurer la sécurité des biens et des hommes.

III.2.3 La Typologie de la maintenance

Selon la norme AFNOR, 2001 les stratégies ou les types de maintenance sont désignées par une représentation visuelle est fournie à la figure 3.2

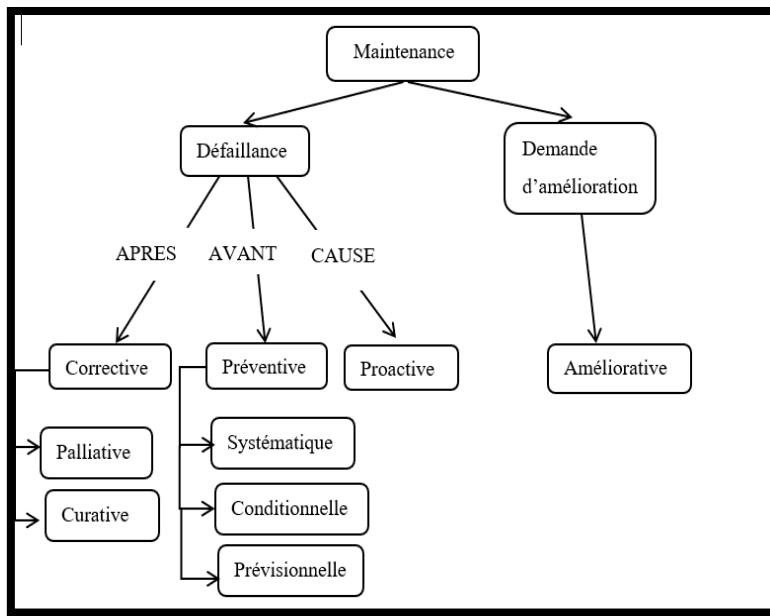


Figure 3.2 : Types de maintenance

III.2.3.1 La maintenance préventive

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 [10].

III.2.3.2 Maintenance corrective

Maintenance exécutée après détection d'une panne, et destinée à remettre un bien en état de réaliser une fonction requise [10].

III.3 Rappels sur la sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est habituellement définie par quatre paramètres essentiels qui permettent d'analyser comment un produit se comporte durant les diverses étapes de son cycle de vie. Ces paramètres fondamentaux constituent la base pour évaluer la performance et la fiabilité d'un système tout au long de son existence.

III.3.1 Concepts de la fiabilité

La fiabilité caractérise l'aptitude d'un système ou d'un matériel à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné [11].

III.3.2 Principales fonctions statistiques utilisées en fiabilité

Dans les sections suivantes, nous aborderons les fonctions statistiques essentielles utilisées en fiabilité, ainsi que plusieurs distributions (telles que Weibull, Exponentielle, ...) qui jouent un rôle prépondérant dans l'analyse de données et sont largement employées dans diverses disciplines.

➤ **Fonction de fiabilité**

La fiabilité à l'instant t correspond à la probabilité que le système n'ait pas subi de défaillance durant sa durée de vie T_1 . En d'autres termes, c'est la probabilité de fonctionnement sans défaillance pendant la période $[0, t]$. La fonction de fiabilité notée $R(t)$ peut s'exprimer comme suit [12] :

$$R(t) = P(T_1 > t) \quad (\text{III.1})$$

➤ **Fonction de répartition**

La fonction de répartition $F(t)$ représente la probabilité d'avoir au moins une défaillance pendant la période $[0, t]$, est notée par $F(t)$ peut s'exprimer comme suit [12] :

$$F(t) = P(T_1 \leq t) = 1 - R(t)$$

(III.2)

➤ **Densité de probabilité**

La fonction de densité de probabilité, notée $f(t)$, représente la probabilité de défaillance d'un dispositif à l'instant t . Elle est donnée par [12] :

$$f(t) = \left(\frac{dF(t)}{dt} \right) = - \left(\frac{dR(t)}{dt} \right) \quad (\text{III. 3})$$

➤ **Taux de défaillance**

Le taux de défaillance instantané $\lambda(t)$ représente la probabilité qu'une entité perd sa capacité à accomplir sa fonction dans l'intervalle de temps $[t, t + dt]$, sachant qu'elle a fonctionné entre $[0, t]$ est donné sous la forme suivante [12] :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{III. 4})$$

III.3.3 Lois de probabilité usuelles utilisées en fiabilité

La fiabilité d'un système réparable est caractérisée par la loi de probabilité de sa durée de bon fonctionnement. Les lois de probabilité les plus utilisées en fiabilité sont la loi exponentielle et la loi de Weibull [12].

III.3.3.1 La loi exponentielle

C'est un cas particulier de la loi de Weibull cette loi de probabilité est caractérisée par un paramètre unique et constant λ . Elle est particulièrement adaptée pour modéliser la fiabilité des équipements qui subissent des défaillances brutales tel que l'électronique le Tableau 3.1 présente l'ensemble des formulations mathématiques associées aux différentes fonctions statistiques de cette loi exponentielle.

Tableau 3.1 : Fonctions statistiques de la loi exponentielle

Fonction statistique	Lois de la fonction
Fonction de fiabilité	$R(t) = \exp(-\lambda t)$
Densité de probabilité	$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$
Taux de défaillance	$\lambda(t) = \lambda$
Durée de vie moyenne	$MUT = \frac{1}{\lambda}$

III.3.3.2 Loi de Weibull

La loi de Weibull est considérée comme la loi la plus populaire dans le domaine de la fiabilité. Cette popularité s'explique par deux raisons principales. En premier lieu, sa forme flexible, qui permet de l'adapter à différents contextes, et en second lieu, sa capacité à englober d'autres lois de probabilité, ce qui élargit son champ d'application. La définition de cette notion s'articule communément autour de deux paramètres : le paramètre de forme β et le paramètre d'échelle η . Il arrive parfois que le paramètre de localisation γ soit également pris en compte. Ce dernier permet en effet de prendre en considération un éventuel décalage du point de départ de la courbe par rapport à l'origine. Le tableau 3.2 représente les diverses fonctions statistiques de la loi de Weibull.

Tableau 3.2 : Fonctions statistiques de la loi de Weibull

Fonction statistique	Lois de la fonction
Fonction de répartition	$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right), t > \gamma$
Fonction de fiabilité	$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right)$
Densité de probabilité	$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right)$
Taux instantané de défaillance	$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$
Durée de vie moyenne	$MUT = (\eta - \lambda)\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$ Où Γ est la fonction gamma d'Euler (fonction tabulée) défini par : $\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt$

III.3.3.3 Courbe en baignoire

La courbe en baignoire représente sur la figure 3.3, donne l'évolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ en fonction de t . On y distingue trois périodes différentes selon l'âge du matériel [13]:

- Période de jeunesse (ou période de mortalité infantile ou période des défaillances précoce), pendant laquelle le taux de défaillance décroît.
- Période de vie utile qui correspond à la maturité du matériel durant laquelle les défaillances sont aléatoires et le taux de défaillance sensiblement constant.
- Période de vieillesse pendant laquelle le taux de défaillance croît.

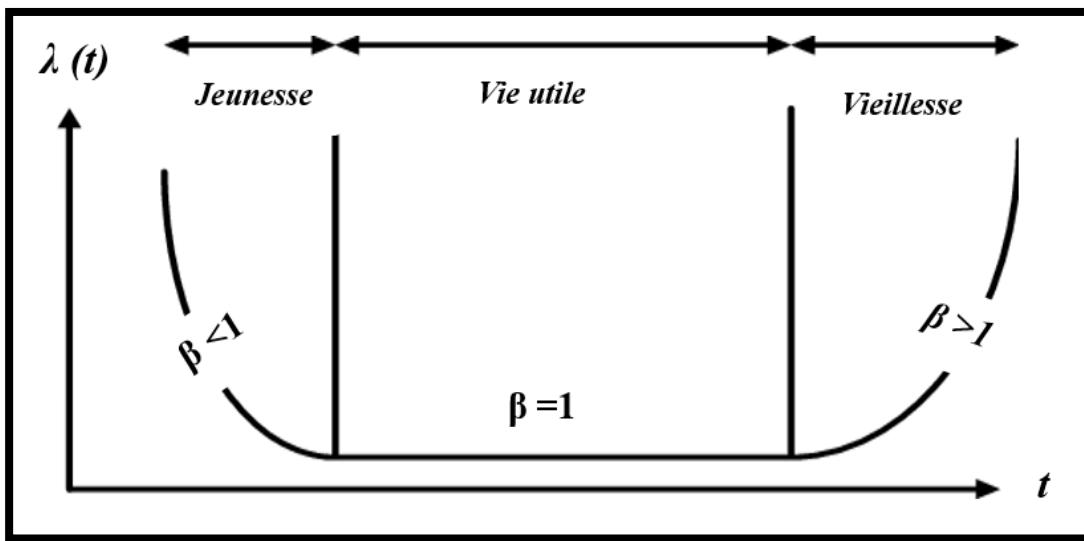


Figure 3.3 : la courbe de baignoire

➤ Signification des paramètres de la loi de Weibull :

β : Il est le plus important car il joue sur la variation du taux de défaillance et permet ainsi de modéliser alternativement les trois phases de la courbe en baignoire [13].

- Si $\beta < 1$, le taux de défaillance décroît.
- Si $\beta = 1$, le taux de défaillance est constant, on retrouve la loi exponentielle.
- Si $\beta > 1$, le taux de défaillance croît.
- Si $\beta \rightarrow 3.6$, la loi de Weibull a une allure voisine mais distincte de la normale.

η : Est un simple paramètre d'échelle de temps appelé aussi durée de vie caractéristique.

Lorsque $t = \gamma + \eta$, alors $F(t) = 63\%$ pour $t = \eta$ [13].

γ : Il est dans la même unité que le temps, très souvent on choisit $\gamma = 0$ et la loi de Weibull est ramenée à deux paramètres [13].

- Si $\gamma < 0$, on peut dire que le matériel a subi une dégradation avant sa mise en service industrielle (usure lors des essais, du rodage ou problème de montage).

- Si $\gamma > 0$, on peut dire que le matériel n'a commencé à se dégrader qu'à la date $t = \gamma$.

III.4 Politiques de maintenance

III.4.1 Définition d'une politique de maintenance

La politique de maintenance se définit selon la norme française « AFNOR » 2001 par un ensemble d'actions exécutées et ordonnées selon une certaine stratégie au niveau de l'actif, vise à ajuster le type de maintenance, ainsi que les ressources consenties en fonction de l'importance de chaque machine dans le processus et des valeurs des indicateurs FMD (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité).

Pour optimiser la maintenance d'un système réparable, il est essentiel de mettre en place une politique de maintenance appropriée. Dans cette section, nous présentons les différentes politiques de maintenance appliquées aux systèmes réparables.

III.4.2 Politiques de maintenance des systèmes élémentaires

III.4.2.1 Politiques de maintenance selon l'âge

Dans cette politique, un composant est remplacé préventivement à l'âge T ou à la défaillance si celle-ci a lieu avant T . Le coût moyen par unité de temps est donné par [14] :

$$C(T) = \frac{C_p R(T) + [1 - R(T)]C_d}{\int_0^T R(t)dt}$$

Avec :

Le numérateur représente le coût total du cycle et le dénominateur la longueur du cycle. T est l'âge du remplacement préventif.

C_p : Coût du remplacement préventif.

C_d : Coût de défaillance.

III.4.2.2 Politique de maintenance préventive périodique

Ce nom est utilisé puisque suivant cette politique, le système est renouvelé périodiquement à des intervalles fixes kT ($k = 1, 2, 3, \dots$) et indépendants de l'historique des défaillances du système, comme le montre la Figure 3.4. Trois modèles de base peuvent être trouvés dans cette politique.

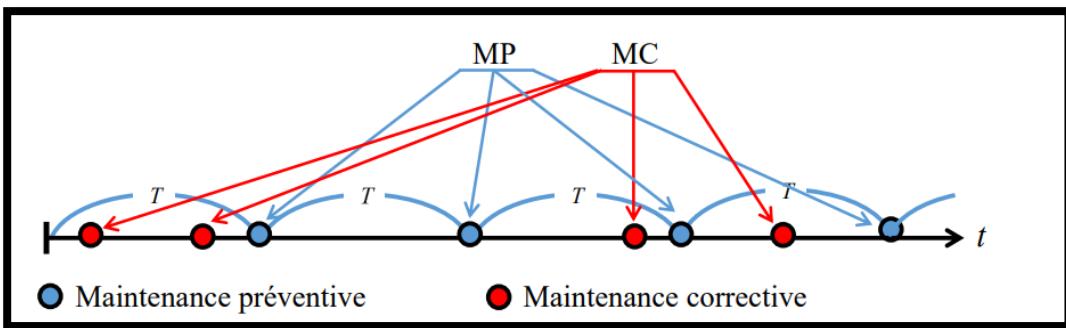


Figure 3.4 : principe de politique en périodique [12]

➤ Modèle 1

Comme nous l'avons décrit avant, le système est renouvelé périodiquement à des intervalles fixes T (sachant que T est une constante). Le système est aussi renouvelé après une défaillance, ce qui conduit à une structure de maintenance voisine de celle du modèle selon l'âge. Le paramètre à optimiser est aussi T , et l'espérance du coût de maintenance par unité de temps est calculée sur la période de renouvellement T [12] :

$$C(T) = \frac{C_c E[N_d(T)] + C_p}{T}$$

Où $E[N_d(T)]$ est l'espérance du nombre de défaillances dans l'intervalle du temps $[0, T]$.

➤ Modèle 2

Dans le modèle 1, le système est renouvelé directement après la défaillance. Ici, nous admettons que la défaillance n'est détectée que lors des instants de MP. Le système après défaillance reste donc dans son état défaillant et ne sera réparé qu'à l'instant de la MP périodique qui suit la défaillance. La fonction du coût par unité de temps dans ce modèle s'écrit [12] :

$$C(T) = \frac{C_c F(T) + C_p}{T}$$

➤ Modèle 3

Ce modèle est connu sous le nom de "politique de MP périodique avec réparation minimale à la défaillance". Les défaillances sont détectées à temps et réparées mais avec un effet nul sur le processus de dégradation du système (MC minimale). Ainsi, le processus de défaillance $N_d(t)$ n'est pas perturbé par les actions de MC. La fonction de l'espérance du coût de maintenance par unité de temps correspondant à ce modèle est formulée comme suit [12] :

$$C(T) = \frac{C_c H(T) + C_p}{T}$$

Où $H(T)$ est le taux de hasard cumulé.

III.4.2.3 Politique de remplacement périodique et réparation minimale

Cette politique est une variante de la précédente, la différence est que suite à une défaillance l'élément reçoit une réparation minimale. Par conséquent, les défaillances surviennent suivant un processus de Poisson non homogène, le nombre moyen de défaillances dans un intervalle $[0, t]$ est donné par [14] :

$$H(T) = \int_0^T \lambda(t)dt$$

Où $\lambda(t)$ représente le taux d'occurrence de défaillances (ROOCOF pour Rate Of Occurrence Of Failures), pour un composant non réparable il représente le taux de défaillance, l'expression devient alors :

$$C(T) = \frac{C_c H(T) + C_p}{T} = \frac{C_c \int_0^T \lambda(t)dt + C_p}{T}$$

III.4.2.4 Politique de maintenance périodique imparfaite et réparation minimale

Suivante cette politique, l'élément n'est pas remplacé périodiquement mais reçoit juste des maintenances imparfaites. Comme exemple, nous pouvons citer une machine industrielle qui reçoit périodiquement des révisions partielles et après un certain nombre de révisions partielles, la machine reçoit une révision générale. Ce qui voudra dire que le taux d'occurrence de défaillances va changer après chaque action de maintenance préventive, car nous rappelons que, la maintenance imparfaite permet de ramener le taux de défaillance à un niveau situé entre le taux de défaillance initial (neuf) et celui juste avant la maintenance.

Dans ce cas, il faut mesurer l'effet de chaque maintenance sur le système. Le taux de défaillance du système, après chaque maintenance sera exprimé en fonction de cet effet et du taux de défaillance précédent [14].

Le coût moyen par unité de temps est donné par :

$$C(K, T) = \frac{C_{min}H(K, T) + (k - 1)C_p + C_{ov}}{KT}$$

C_{min} : Coût d'une réparation minimale.

C_p : Coût d'une révision partielle.

C_{ov} : Coût d'une révision générale.

$H(k, T)$: taux cumulé d'occurrence des défaillances entre $t = 0$ et le renouvellement $t = KT$.

K : Nombre de révision partielle avant la révision générale.

T : Périodicité de révision partielle.

III.5 Modélisation de l'efficacité de la maintenance

Une gestion efficace de la maintenance des équipements exige une modélisation réaliste de ses impacts. Il est donc essentiel de développer des modèles d'efficacité de la maintenance pour les systèmes complexes réparables et d'élaborer des méthodes d'évaluation de leur performance.

L'efficacité de la maintenance vise à modéliser le comportement des systèmes réparables et représente un enjeu économique majeur pour l'exploitation commerciale des systèmes industriels. On distingue trois modèles principaux d'efficacité de la maintenance minimale, parfaite et imparfaite.

III.5.1 Modèles de base

III.5.1.1 Modèle de maintenance minimale (ABAO)

Le modèle ABAO pour As Bad As Old consiste à supposer les réparations minimales : après chaque panne, on remet le système en marche, dans l'état exact où il se trouvait au moment de la panne. Par exemple, cela consiste à remettre en marche le disjoncteur après une panne de courant sans rechercher les causes exactes de la défaillance. L'hypothèse ABAO implique que l'intensité de défaillance d'dépend uniquement du temps [15] :

$$\lambda_t = \lambda(t)$$

La figure 3 .4 présente l'évolution de l'intensité de défaillance d'un système soumis à des maintenances correctives ABAO. Dans cette figure, ainsi que dans toutes les suivantes, l'intensité de défaillance initiale suit une distribution de Weibull.

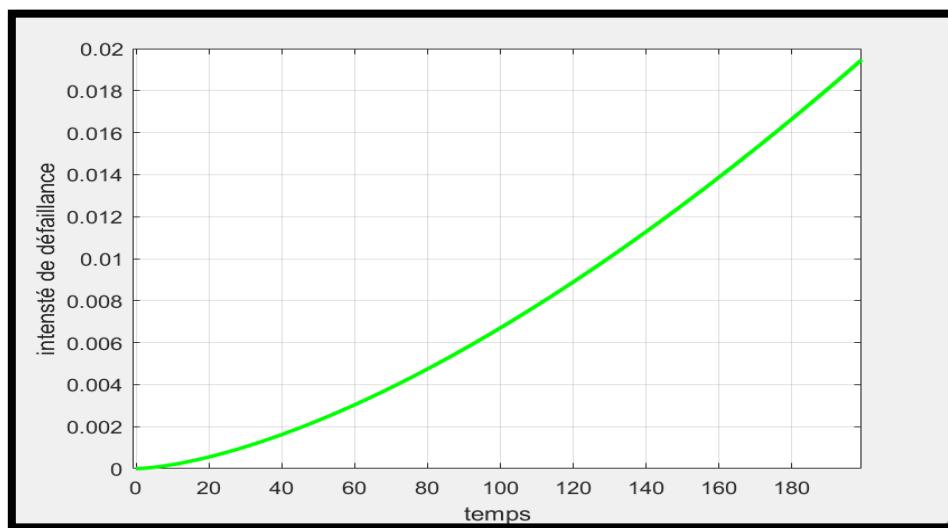


Figure 3.5 : Intensité dans le modèle de maintenance minimale ABAO (selon la loi de Weibull

$$\beta=2,5483, \eta=168,8844)$$

III.5.1.2 Modèle de réparation parfaite (AGAN)

Dans le modèle AGAN pour As Good As New, on considère que les réparations après une panne sont parfaites et remettent le système à neuf. Cela peut correspondre au remplacement d'une ampoule défectueuse par une neuve de même génération. L'hypothèse AGAN entraîne que les taux de défaillances sont indépendants et de même loi le processus des défaillances est alors un processus de renouvellement. Il en découle que l'intensité prend la forme suivante [15] :

$$\lambda_t = \lambda(t - T_{N_t})$$

L'intensité de défaillance dépend seulement du temps écoulé depuis la dernière panne la figure 3.5 montre l'intensité de défaillance d'un système soumis à des maintenances correctives AGAN.

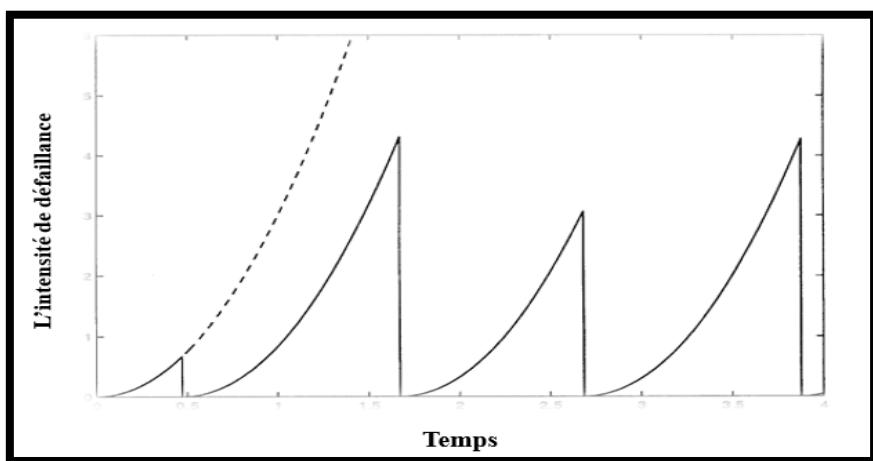


Figure 3.6 : Intensité dans le modèle de maintenance parfaite AGAN (selon la loi de Weibull) [16]

III.5.1.3 Modèle de maintenance imparfaite

En maintenance, il existe deux situations extrêmes : ABAO (maintenance minimale, peu efficace) et AGAN (maintenance parfaite). Dans la réalité, on se situe entre ces deux cas.

En pratique, la maintenance améliore généralement l'état du système par rapport à son état dégradé mais ne le remet pas complètement à neuf, surtout pour les gros équipements industriels (moins bien que neuf) cette situation intermédiaire est appelée "réparation meilleure que minimale" ou "maintenance imparfaite" dans la littérature technique

De nombreux modèles de maintenance imparfaite ont été développés dans la littérature ces modèles reposent généralement sur une hypothèse fondamentale : chaque intervention de maintenance peut réduire l'âge effectif du système de manière totale, partielle ou nulle. Cette réduction d'âge détermine l'état du système, qui peut ainsi être rajeuni ou vieilli.

III.5.1.3.1 Modèle de Brown-Prochan

Le modèle de Brown-Prochan (BP) est l'un des premiers modèles de réparations imparfaites proposé dans la littérature. Il est défini de la manière suivante : quand un système tombe en panne, la réparation est parfaite avec une probabilité p (AGAN) et le système repart à neuf. Sinon, la réparation est minimale (ABAO), avec donc une probabilité $1 - p$, et le système redémarre avec l'âge qu'il avait avant la panne. La figure 3.6 est représentée la courbe de la fonction d'intensité de défaillance dans le modèle de Brown-Prochan [15].

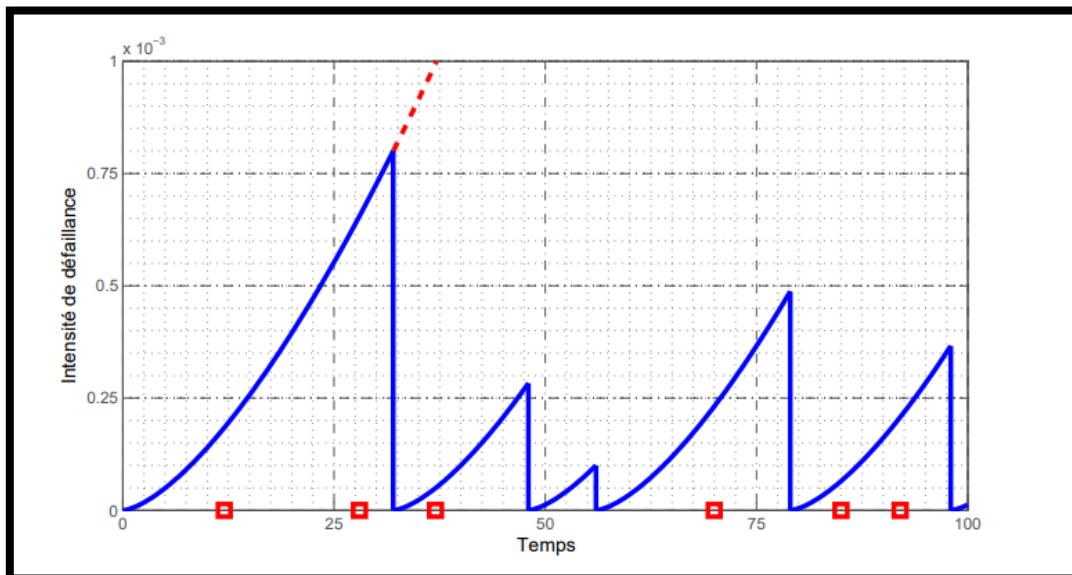


Figure 3.7 : Intensité de défaillance dans le modèle Brown-Prochan (selon la loi de Weibull pour $\beta = 2.5, \eta = 200$) [12]

La maintenance imparfaite peut être modélisée selon deux approches principales la première c'est la réduction de l'intensité de défaillance, la deuxième c'est la réduction de l'âge virtuel et une troisième approche plus générale englobe les deux précédentes c'est les modèles hybrides.

III.5.1.3.2 Le modèle de réduction d'intensité de défaillance

➤ Le modèle de réduction arithmétique d'intensité de défaillance

Après la maintenance, le système retrouve un état amélioré par rapport à celui précédent l'intervention. Cette amélioration se traduit par une réduction de l'intensité de défaillance proportionnelle à l'efficacité de la maintenance réalisée, sans pour autant modifier la forme de la courbe d'intensité de défaillance.

Son expression mathématique s'écrit :

$$\lambda_i(t) = \lambda_{i-1}(t) - \delta_i$$

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

$$\lambda_n(t) = \lambda_0(t) - \sum_{i=1}^n \delta_i$$

Tel que n est le nombre d'actions de maintenances.

La figure 3.7 est représentée la courbe de la fonction d'intensité de défaillance qui correspondant à ce modelé.

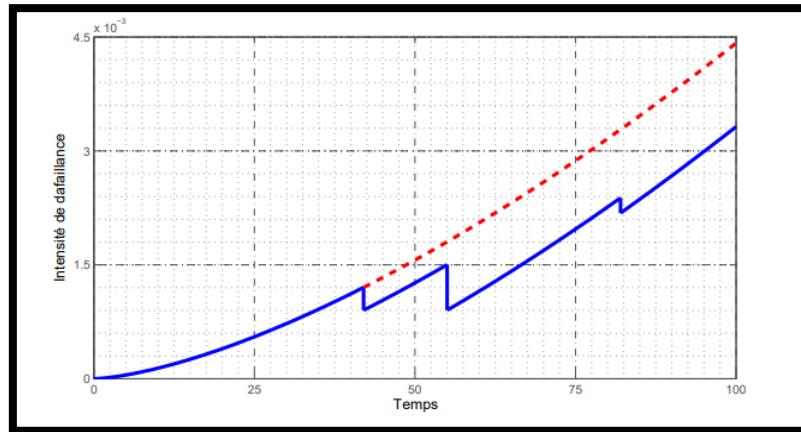


Figure 3.8 : Intensité de défaillance dans le modèle de réduction (selon la loi de Weibull pour $\beta = 2.5$, $\eta = 200$, $\delta_1 = 3 * 10^{-4}$, $\delta_2 = 6 * 10^{-4}$, $\delta_3 = 6 * 10^{-4}$) [12]

➤ Le modèle de réduction géométrique d'intensité de défaillance

Le principe ici est de supposer qu'après une action de maintenance imparfaite, la fonction d'intensité de défaillance du système est multipliée par le facteur de réduction α , sachant que $0 < \alpha < 1$. Ainsi après la première action de maintenance imparfaite, la fonction d'intensité de défaillance devient : $\lambda(t) = \alpha\lambda_0(t)$, après la seconde action de maintenance imparfaite, elle devient : $\lambda(t) = \alpha^2\lambda_0(t)$ La fonction d'intensité de défaillance correspondant à ce modèle s'écrit :

$$\lambda(t) = \alpha^{I_M} \lambda_0(t)$$

La courbe d'intensité de défaillance de ce modèle représente sur la figure 3.8

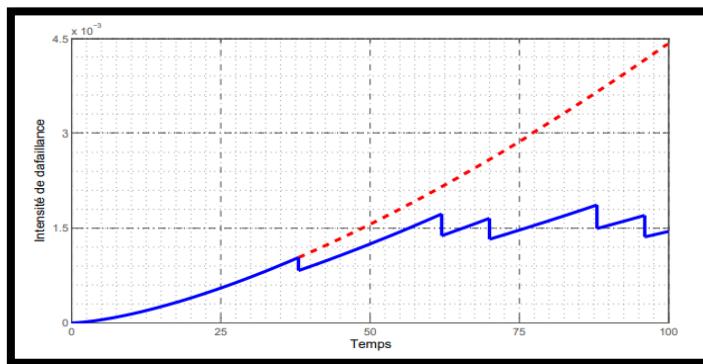


Figure 3.9 : Intensité de défaillance dans le modèle de réduction (selon la loi de Weibull pour $\beta = 2.5$, $\eta = 200$, $\alpha=0.8$) [12]

III.6.1.3.3 Modèles de réduction d'âge virtuel

Le principe des modèles d'âge virtuel, proposés par Kijima, Morimura et Suzuki, consiste à supposer qu'après la $i^{\text{ème}}$ réparation, le système fonctionne comme un système neuf qui aurait vécu un âge A_i sans avoir eu de panne. Cet âge A_i , appelé âge effectif, est le plus souvent une fonction déterministe de la passe du processus : $A_i = A_i(T_1, \dots, T_i)$, avec $A_0 = 0$. On peut alors calculer la loi des durées inter défaillances $\{X_i\}_{i \geq 1}$ conditionnellement à l'âge du système et à son passé [15].

Le concept de l'âge virtuel propose qu'après une maintenance imparfaite, l'âge d'un système soit réduit à t/Δ , où t représente l'âge initial et Δ est un facteur de réduction en supposant que le système retrouve dans un état neuf après chaque maintenance on définit un âge virtuel A_i qui représente le temps de fonctionnement cumulé sans défaillance depuis la dernière intervention. L'intensité de défaillance après la $i^{\text{ème}}$ opération de maintenance peut alors s'exprimer comme suit :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t - T_i + A_i)$$

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

L'expression mathématique révèle que l'intervention de maintenance réduit l'intensité de défaillance du système à l'instant t égal à celle à l'instant $t - (T_i + A_i)$. Autrement, la maintenance produit un effet de rajeunir le système en effet, l'âge réel du système est t , tandis que son âge virtuel est égal à $t - (T_i + A_i)$.

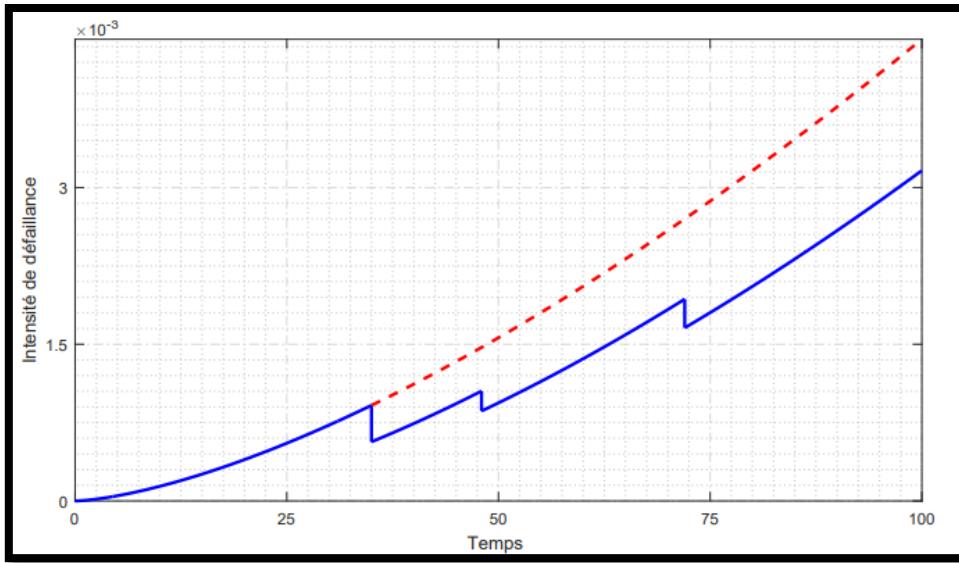
Dans ces modèles l'efficacité de l'intervention de maintenance dépend de l'âge du système, et la quantité de réduction de l'âge reflète l'effet de la maintenance selon le modèle ABAO, l'âge virtuel est égal à l'âge réel après la maintenance ($A_i = T_i$), tandis que dans le modèle AGAN ($A_i = 0$) [12].

➤ Modèle de réduction proportionnelle de l'âge virtuel

Dans ce modèle, l'efficacité de la maintenance est considérée comme un constant, le paramètre ρ désigné comme facteur d'amélioration la formule de la fonction d'intensité de défaillance pour ce modèle est :

$$\lambda(t) = \lambda_0(t - \rho T_i)$$

La figure 3.9 est présente l'allure de la fonction d'intensité de défaillance correspondant à ce modèle.



La figure 3.10 : Intensité de défaillance dans le modèle de réduction proportionnelle de l'âge virtuel
(selon la loi de Weibull pour $\beta = 2.5$, $\eta = 200$ et $\rho = 0.2$) [12]

La variation du facteur ρ permettre de nous retrouvons les modèles suivant :

- Maintenance parfaite (AGAN) : $\rho = 1$.
- Maintenance imparfaite (efficace) : $\rho \in]0,1[$.
- Maintenance minimale (ABAO) : $\rho = 0$.
- Maintenance nuisible : $\rho < 0$.

III.6.1.3.4 Modèles hybrides

Les modèles hybrides regroupent les deux classes de réduction d'intensité de défaillance, alors que leurs hypothèses sont différentes concernant la réduction d'intensité de défaillance. En effet, dans cette classe de modèles qui vient améliorer le concept de la réduction de l'âge virtuel, l'effet d'une action de maintenance imparfaite est positif sur l'âge mais il n'empêche pas l'évolution de la dégradation du système après une action de maintenance, la courbe d'intensité de défaillance n'est pas parallèle à la courbe initiale. En d'autres termes, cette classe combine le modèle de réduction de l'âge virtuel et le modèle de réduction géométrique d'intensité de défaillance, dont l'effet est négatif pour ce dernier notons que c'est juste la forme du modèle de réduction géométrique d'intensité qui est considérée. Après chaque action de maintenance imparfaite l'intensité de défaillance est calculée selon une formule suivante :

$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0(t - b T_i)$$

Où $T_i < t < T_i + 1$, $0 < b < 1$ et $\alpha > 1$.

La figure 3.10 est présente l'allure de la fonction d'intensité de défaillance correspondant à ce modèle.

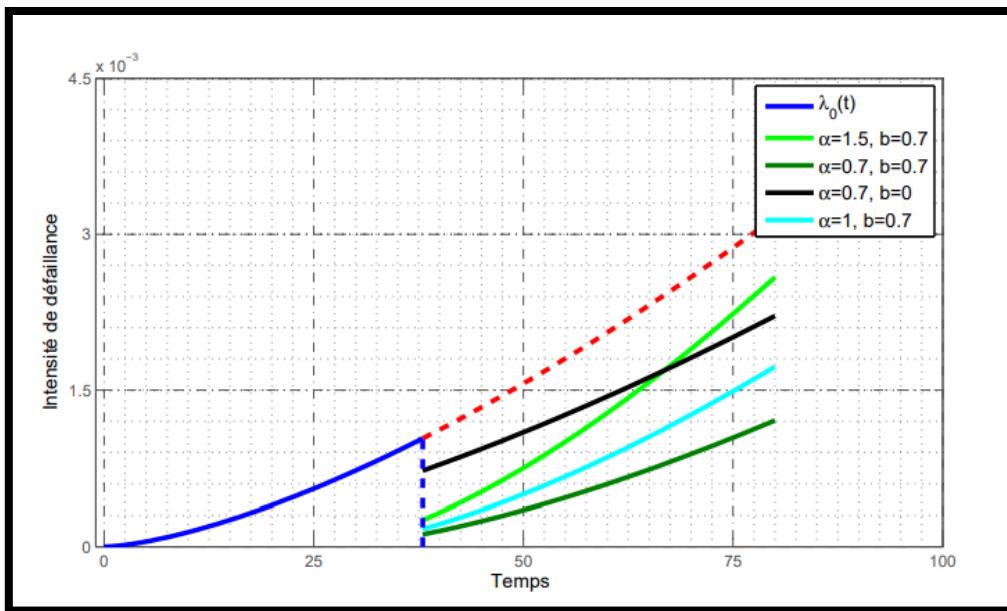


Figure 3 .11 : Intensité de défaillance dans le modèle hybride (selon la loi de Weibull pour $\beta = 2.5$ et $\eta = 200$) [12]

Suite à une maintenance préventive, le système atteint un état intermédiaire situé entre l'état ABAO et l'état AGAN. Dans le contexte de notre recherche, il est essentiel d'adopter une modélisation réaliste des effets des interventions de maintenance pour assurer une gestion optimale des systèmes. Cette approche permet d'éviter toute surévaluation ou sous-évaluation de l'impact de ces actions sur l'état de fiabilité des équipements.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini la notion de la maintenance, ses différents types, ainsi que le concept de fiabilité et les principales lois statistiques associées. Nous avons ensuite introduit les politiques et modèles d'efficacité de maintenance, essentiels pour gestion des systèmes réparables tels que les pompes centrifuges industrielles utilisées par Sonatrach, en particulier la pompe GUINARD DVMX 6.811 E5.

Trois modèles de la maintenance ont été abordées : la maintenance minimale, la maintenance parfaite et la maintenance imparfaite. Nous avons également présenté les modèles de réduction de l'intensité de défaillance, qui constituent le fondement de notre analyse.

Chapitre 4

Optimisation de la

Maintenance de pompe

centrifuge GUINARD

DVMX 6.8.11 E 5

IV.1 Introduction

La maintenance des systèmes industriels, en particulier au sein d'installations stratégiques comme celles de Sonatrach, constitue un enjeu économique de premier plan. Dans le cadre du transport des hydrocarbures, des équipements tels que la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E 5 jouent un rôle essentiel. Une stratégie de maintenance inappropriée peut non seulement compromettre la fiabilité des équipements, mais également entraîner des coûts supplémentaires dus à des pannes imprévues ou à une usure prématuée. Ainsi, l'optimisation de la maintenance préventive vise à déterminer la périodicité optimale des révisions générales, dans le but de maximiser la disponibilité opérationnelle, d'assurer un niveau de performance élevé et de réduire les coûts globaux de maintenance sur l'ensemble du cycle de vie des équipements.

IV.2 Traitement statistique des données

IV.2.1 Historique des pannes

Dans le cadre de notre étude, et à la suite des observations réalisées durant notre stage au sein de Sonatrach, nous avons procédé à une analyse approfondie des pannes survenues sur l'équipement étudié entre 2016 ET 2023. Cette analyse présentée dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Historique des pannes de la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E 5

	<i>Intervention</i>	<i>Date de débit</i>	<i>Date de fin</i>	<i>Temp d'arrêt (Heure)</i>
01	Dépose et débouchage circuité égoutture GM/COA	04/01/2016	06/01/2016	48
02	Changement ventilateur de refroidissement palier AR (fissuré)	16/03/2016	16/03/2016	2
03	Rénovation de GM	06/06/2016	07/06/2016	24
04	Changement d'huile au niveau de palier	15/11/2016	15/11/2016	2
05	Dépose et soufflage circuit arrosage GM / CA	11/02/2017	13/02/2017	48
06	Travaux de RG de la pompe	27/08/2017	28/09/2017	720
07	Changement de roulement	20/04/2018	21/04/2018	24
08	Désaccouplement moteur/pompe pour contrôle suite au blocage constaté	23/10/2018	25/10/2018	48
09	Changement d'huile au niveau de palier	25/04/2019	25/04/2019	2
10	Dépose et soufflage circuit arrosage GM / COA	19/07/2019	21/07/2019	48
11	Changement accouplement	11/08/2019	13/08/2019	48

12	Rénovation de GM	18/04/2020	19/04/2020	24
13	Grippage de la bague d'usure du troisième étage.	26/07/2020	29/07/2020	72
14	Travaux de RG de la pompe.	20/01/2021	19/02/2021	720
15	Changement de roulement et accouplement + Equilibrage de pompe + Changement arbre pompe	19/03/2021	19/03/2021	504
16	Dépose et débouchage circuit égoutture GM/CA	23/07/2021	24/07/2021	24
17	Rénovation GM	04/09/2021	05/09/2021	24
18	Changement ventilateur de refroidissement palier AR (fissuré)	08/01/2022	08/01/2022	2
19	Changement de joint torique	12/06/2022	12/06/2022	3
20	Dépose et débouchage circuit égoutture GM/COA	04/11/2022	05/11/2022	24
21	Changement de bague d'étanchéité	09/05/2023	09/05/2023	2
22	Rénovation GM	21/10/2023	21/10/2023	24

IV.2.2 Prélèvements des TBF

Par la suite, nous avons procédé au calcul du temps de bon fonctionnement (TBF) ainsi que de temps de censure à droit (TCD) pour chaque type de panne. Ces valeurs ont été déterminées à partir des intervalles de temps séparant deux défaillances successives, sur la base des données collectées durant notre stage.

Les résultats des calcules : [70, 82, 88, 285, 204, 185, 85, 106, 249, 98, 28, 126, 168, 125, 155, 145, 185, 165, 243, 182 ,175] (jour).

IV.2.3 Résultats de l'estimation

Cette étape vise à estimer les paramètres de la loi de Weibull (le paramètre de forme β et le paramètre d'échelle η) à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance (MLE), en utilisant le logiciel MATLAB. Après traitement, nous avons obtenu les résultats suivants :

- $\beta = 2,5483$
- $\eta = 168 ,8844$ (jours)
- $\gamma=0$

L'estimation de la valeur du paramètre de forme β est supérieure à l'unité pour le système étudié. Cela indique une intensité de défaillance croissante dans le temps, ce qui signifie que l'équipement entre dans sa phase de vieillesse. Une maintenance préventive optimale permettra de réduire cette dégradation et de prolonger la durée de vie de l'équipement.

IV.3 Le choix de la politique et le modèle de maintenance

L'optimisation d'un modèle de la maintenance se fait selon une politique de maintenance choisie. Dans le cadre de notre travail, nous avons opté pour une politique de maintenance préventive périodique imparfaite, avec une réparation minimale à la défaillance. Cette stratégie de la maintenance nous a conduits à adopter le modèle d'optimisation optimal, qui est celui de la réduction géométrique de l'intensité des défaillances. Selon la politique établie, le système est soumis à des interventions de maintenance préventive imparfaite à intervalles réguliers (des révisions partielles). Cependant, suite à k interventions de maintenance imparfaite, une révision générale est effectuée. Les défaillances du système suivant un processus de poisson non homogène. Cette politique, dont l'objet est l'optimisation de deux paramètres spécifiques, à savoir le nombre optimal d'intervalles de maintenance préventive k et durée optimal T de chacun de ces intervalles, trouve application dans le cadre de l'équipement.

➤ Hypothèses :

- L'équipement est renouvelé après $K-1$ cycles d'utilisation.
- Le coût de la maintenance préventive, noté C_p , est constant à chaque intervention.
- Les durées entre les maintenances préventives sont fixe et réguliers.
- Une réparation ou maintenance corrective est effectuée après chaque défaillance.

➤ Le coût moyen par unité de temps est :

$$C(T) = \frac{E[C(T)]}{E(T)}$$

Avec :

- $E[C(T)]$: L'espérance du coût total durant un cycle de renouvellement.
- $E(T)$: L'espérance du cycle de renouvellement.

IV.4 Estimation des coûts de maintenance

Afin d'estimer les coûts de maintenance, nous avons formulé un ensemble d'hypothèses, que nous avons définies avec l'ingénieur de maintenance de Sonatrach de manière à ce qu'elles soient plus près les conditions réelles.

- Coût de réparation minimale : $C_{min} = 30752970$ DA.
- Coût de la maintenance préventive imparfaite (révision partielle) : $C_p = 25015250$ DA.
- Coût de révision générale : $C_{ov} = 50000000$ DA.

IV.5 Optimisation du coût total de la maintenance

Dans le cadre de notre étude, nous supposons que la pompe GUINARD DVMX 6.8.11 E 5 fait l'objet d'un entretien régulier selon une périodicité fixe, notée KT , avec K désignant un entier naturel et N le nombre total de périodes. Dans le cadre de cette étude, l'objectif de cette partie est de déterminer la période optimale T pour procéder à une révision générale, de manière à minimiser la fonction de coût de maintenance dans le temps. La fonction objective à minimiser est ainsi définie :

$$C(K, T) = \frac{C_{min}H(K, T) + (k - 1)C_p + C_{ov}}{KT}$$

Tel que le nombre moyen de défaillances dans un intervalle $[0, T]$ est donné par :

$$H(T) = \int_0^T \lambda_0(t)dt$$

Et pour K cycles :

$$H(K, T) = \int_0^{(k+1)T} \lambda_i(t)dt = \int_0^T \lambda_0(t)dt + \int_{KT}^{(k+1)T} \lambda_k(t)dt$$

Dans cette étude, nous adoptons le modèle de réduction géométrique d'intensité de défaillance :

$$\begin{aligned} \lambda_i(t) &= \alpha \lambda_0(t) \\ \lambda_0(t) &= \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \end{aligned}$$

En remplaçant la fonction hasard :

$$H(K, T) = \int_0^T \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} dt + \int_{(K-1)T}^{KT} \alpha \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} dt$$

Avec :

$$\int_0^T \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} dt = \left(\frac{T}{\eta} \right)^\beta \text{ avec } \gamma = 0$$

$$H(K, T) = \int_0^T \left(\frac{T}{\eta} \right)^\beta dt + \int_T^{2T} \alpha \left(\frac{T}{\eta} \right)^\beta dt + \int_{2T}^{3T} \alpha^2 \left(\frac{T}{\eta} \right)^\beta dt + \dots + \int_{(K-1)T}^{KT} \alpha^K \left(\frac{T}{\eta} \right)^\beta dt$$

$$H(K, T) = \left(\frac{T}{\eta} \right)^\beta + \alpha \left[\left(\frac{2T}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{T}{\eta} \right)^\beta \right] + \alpha^2 \left[\left(\frac{3T}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{2T}{\eta} \right)^\beta \right] + \dots + \alpha^K \left[\left(\frac{KT}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{(K-1)T}{\eta} \right)^\beta \right]$$

$$H(K, T) = \left(\frac{T}{\eta} \right)^\beta [1 + \alpha(2^\beta - 1^\beta) + \alpha^2(3^\beta - 2^\beta) + \dots + \alpha^{K-1}(K^\beta - (K-1)^\beta)]$$

$$H(K, T) = \left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta} * \sum_{i=1}^K (\alpha^{(i-1)}(i^{\beta} - (i-1)^{\beta}))$$

En remplace H(K, T) dans la fonction C(K, T) on obtient :

$$C(K, T) = \frac{C_{min} [\left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta} * \sum_{i=1}^K (\alpha^{(i-1)}(i^{\beta} - (i-1)^{\beta}))] + C_p * (K - 1) + C_{ov}}{K * T}$$

Avec :

- $\beta = 2,5483$.
- $\eta = 168,8844$ (jour).
- $\gamma = 0$
- $C_{min} = 30752970$ DA.
- $C_p = 25015250$ DA.
- $C_{ov} = 50000000$ DA.
- On considère que $\alpha = 0,61$,

Dans le cadre de l'optimisation des coûts, nous avons eu besoin d'utiliser un script de calcul sous MATLAB. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur la méthodologie définie dans l'organigramme de résolution présenté à la figure 4.1.

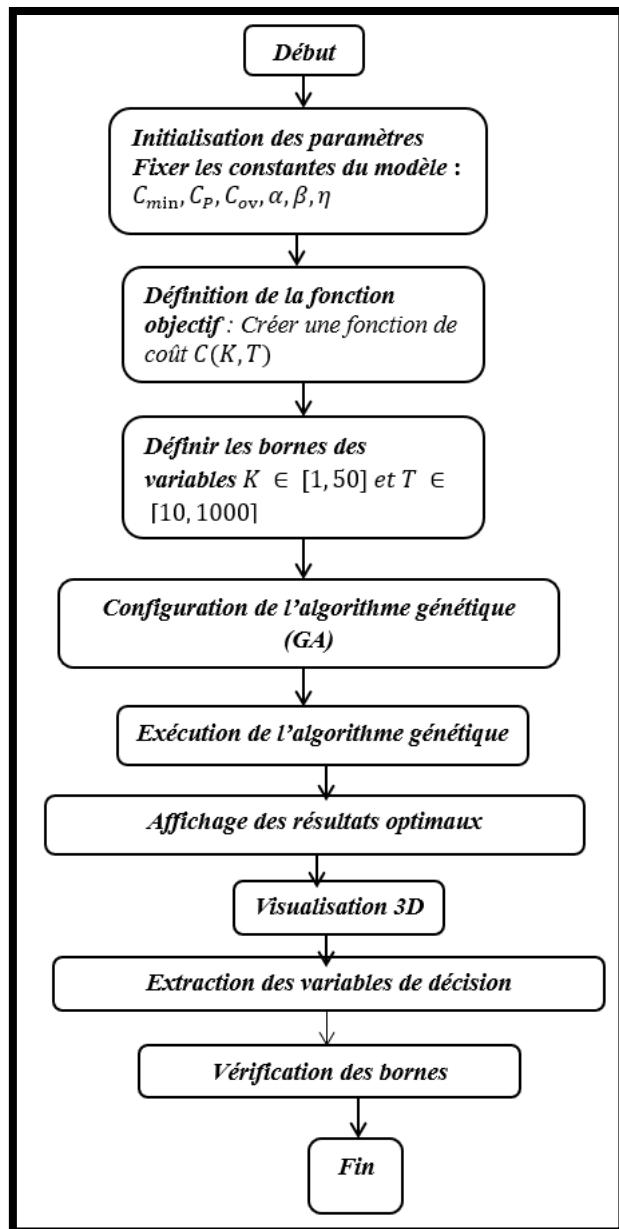


Figure 4.1 : algorithme d'optimisation avec ga

➤ Les résultats obtenus

La figure 4.2 illustre l'évolution de l'intensité de défaillance dans le cadre du modèle de réduction géométrique, en considérant un coefficient de réduction α fixé à 0,61. Ce modèle s'appuie su l'hypothèse selon laquelle chaque réparation est imparfaite et provoque une dégradation partielle du système, à hauteur de 61 % de sa condition initiale.

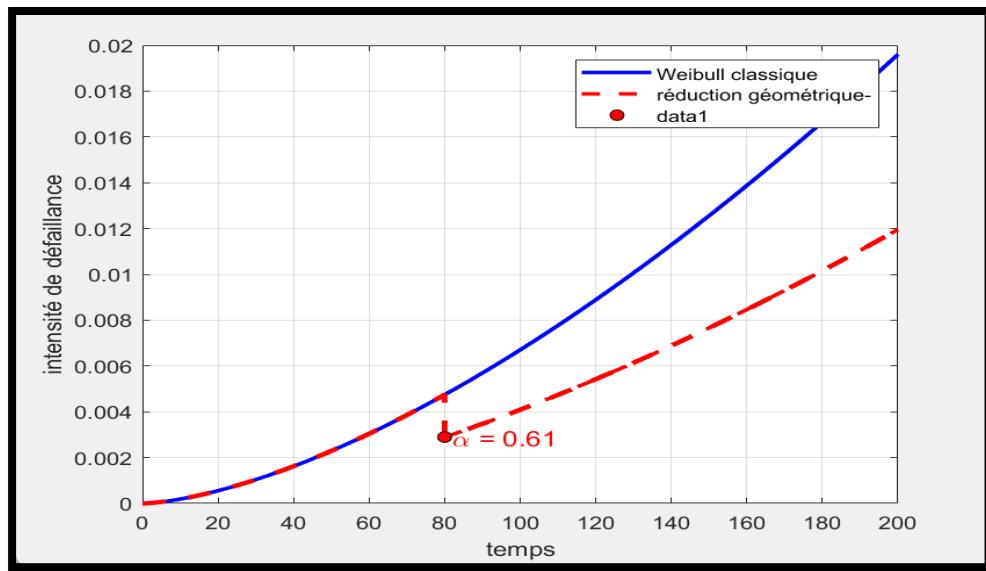


Figure 4.2 : Intensité de défaillance dans le modèle de réduction géométrique

- Commentaire

La figure 4.2 compare l'évolution de l'intensité de défaillance dans le temps selon deux modèles : le modèle de Weibull classique et le modèle à réduction géométrique avec un facteur $\alpha = 0,61$. Bien que les deux courbes montrent une augmentation de l'intensité des défaillances, celle du modèle de Weibull croît plus rapidement, car il suppose un renouvellement total après chaque panne. À l'inverse, le modèle à réduction géométrique, plus réaliste pour des maintenances imparfaites, reflète un ralentissement de cette croissance, traduisant une perte de performance progressive après chaque intervention. Ce modèle permet donc une représentation plus fidèle du comportement des systèmes soumis à des maintenances partielles.

IV.6 Résultats de l'optimisation

- Les résultats obtenus après l'optimisation est représenté sur la figure 4.3.

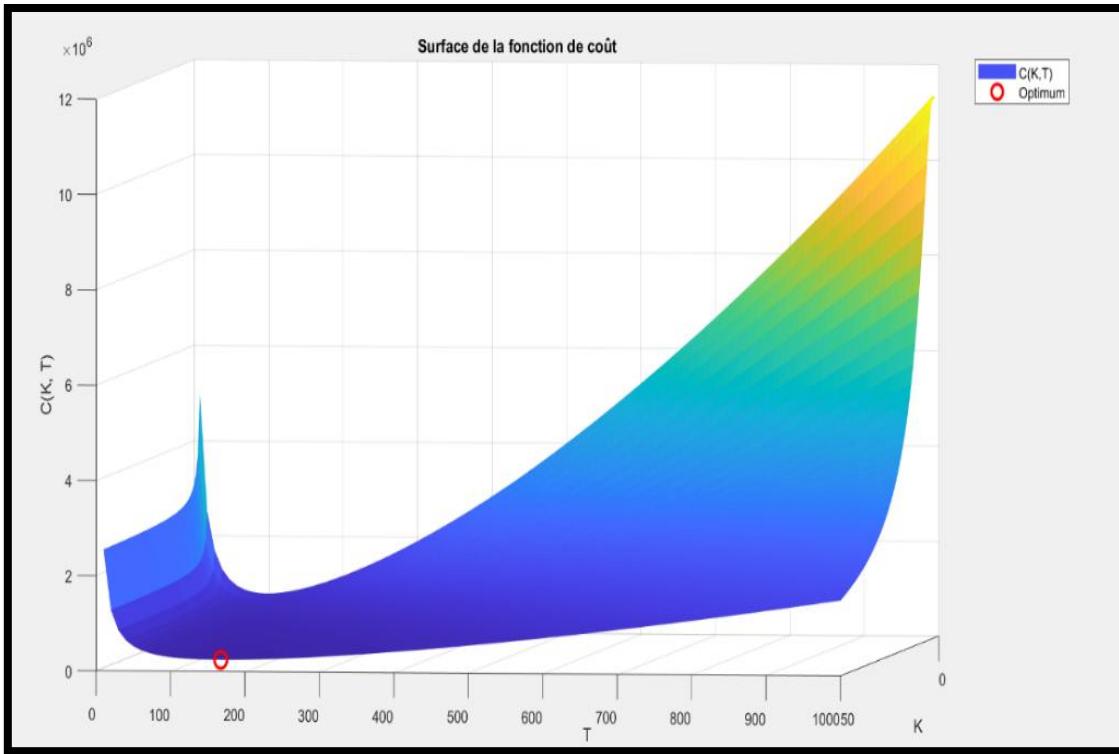


Figure 4.3 : La fonction de coût en fonction de deux variables en 3D

- **Commentaire**

La variation du coût total $C(K, T)$ en fonction du nombre d'intervalles K et de la période T , pour une valeur de $\alpha = 0,61$, présente une forme convexe, indiquant l'existence d'une configuration optimale où le coût est minimal. Cette convexité se manifeste dans le diagramme par la présence d'un point d'optimisation distinctement marqué en rouge, correspondant à un coût total minimal de 250 570,78 DA. Cette optimisation est atteinte pour un nombre d'intervalles $K=50$ et une période optimale entre deux révisions partielles de 167,59 jours.

Ainsi, il apparaît que la stratégie optimale pour effectuer les révisions partielles de manière efficace consiste à les espacer de 167,59 jours chacune. Cette approche permet de déterminer la période totale de révision générale, qui s'établit à : $50 \times 167,59 = 8\ 379,5$ jours

Soit environ 22 ans et 11 mois. Cette méthode permet donc d'optimiser les coûts tout en assurant une politique de maintenance préventive sur le long terme.

- Pour différentes valeurs de α , nous avons calculé les périodes optimales ainsi que les coûts minimaux correspondants. Les résultats sont résumés dans le tableau 4.2, qui met en évidence l'impact de α sur la stratégie de maintenance optimale.

Tableau 4.2 : Influence du paramètre α sur le coût minimal et la période optimale T^*

α	Coût minimum	T^*
0 ,1	82519.45	510.30
0 ,2	99448.60	422.27
0 ,5	186530.18	225.13
0,6	243317.82	172.59
0,8	524513.13	80.06

- Commentaire

On observe que l'augmentation de la période optimale est diminuée du coût minimum, tandis que le coût minimum connaît une augmentation significative. L'analyse de la variation du coût total en fonction de la période optimale révèle une relation inverse : plus la période optimale diminue, plus le coût minimum augmente. En d'autres termes, lorsque les révisions sont effectuées plus fréquemment, le coût total devient plus élevé. Cette situation trouve son origine dans l'accumulation des coûts associés aux interventions répétées. En revanche, il a été démontré que des périodes plus longues entre deux révisions (valeurs élevées de) permettent de réduire ces coûts. Toutefois, cette réduction est uniquement possible jusqu'à un certain seuil où la performance du système reste acceptable.

La valeur de K est restée 50 cycles de vie de l'âge le système ne s'améliore plus.

IV.7 Conclusion

Dans le cadre de cette étude, l'objectif de ce chapitre est de déterminer la combinaison optimale entre le nombre de cycles K et la période optimale T , permettant ainsi de minimiser la fonction objective. Pour ce faire, nous avons développé un modèle d'optimisation basé sur la stratégie de maintenance préventive périodique imparfaite avec une réparation minimale à la défaillance. Notre objectif principal est ainsi de minimiser le coût de notre équipement. Pour ce faire, nous élaborons un plan de maintenance préventive spécifique adapté à la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E 5.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude a été d'optimiser la stratégie de maintenance appliquée à un système réparable dans un environnement industriel critique, en l'occurrence au sein de l'entreprise Sonatrach. Plus précisément, notre analyse s'est concentrée sur la pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E à 5 étages, utilisée dans le transport des hydrocarbures un processus nécessitant une haute disponibilité et une fiabilité constante.

Dans ce contexte, nous avons adopté une politique de maintenance préventive périodique imparfaite, intégrant des réparations minimales en cas de défaillance. Cette approche reflète les pratiques réelles observées chez Sonatrach, où les équipements font l'objet de révisions partielles successives avant d'être remplacés après un certain seuil d'usure ou de perte de performance.

Afin d'évaluer la rentabilité de cette politique, nous avons appliqué le modèle d'efficacité de maintenance basé sur la réduction géométrique de l'intensité de défaillance. À travers ce modèle, nous avons simulé et programmé un organigramme d'optimisation dans l'environnement MATLAB, tel que présenté au chapitre IV. Cette méthodologie nous a permis de déterminer les paramètres optimaux : une périodicité des révisions fixée à 167,59 jours et un nombre optimal d'interventions préventives égal à 50. Ce couple de valeurs représente la configuration minimisant le coût moyen de maintenance par unité de temps tout en prolongeant la durée de vie fonctionnelle de l'équipement.

Les résultats obtenus sont en parfaite cohérence avec les principes de fiabilité et de gestion des coûts pratiqués chez Sonatrach. Conformément à la théorie, lorsque le coût des actions préventives est inférieur à celui des actions correctives, il devient rationnel d'investir davantage dans la maintenance préventive. À l'inverse, une maintenance corrective est justifiée dans les cas où les coûts préventifs deviennent disproportionnés.

L'ensemble de cette démarche confirme la pertinence du modèle géométrique dans la gestion des équipements industriels soumis à des maintenances imparfaites. Il offre une meilleure modélisation des réalités opérationnelles rencontrées chez Sonatrach, notamment dans la gestion des pompes centrifuges stratégiques au sein des stations de pompage

Références Bibliographiques

- [1] Sonatrach. *Documentation interne*.
- [2] Abdenoure, M. R. (2016). *Révision générale de la pompe principale DVMX 6.8.11E-5 étages* (Projet professionnel de fin de formation). Institut Algérien du Pétrole, École de Boumerdes.
- [3] Boulifa, M. *Optimisation de la ligne OB1 24" en tenant compte du déclassement des tronçons entre HEH et Col-Selatna*
- [4] Beintini. *Manuel opératoire SP3*.
- [5] Station SP3. (2016). *Archives internes*.
- [6] Poulain, J. (1996, 10 novembre). *Pompes roto-dynamiques*. Paris : Éditions Techniques.
- [7] Kennouche, O. (2018). *Étude et maintenance de la pompe centrifuge DVMX 6.8.11/E5 de la station de pompage SP3 – RTC Béjaïa* (Mémoire de fin d'études). Université de Béjaïa.
- [8] Laggoune, R. (2019). *Maintenance des systèmes électromécaniques* (Cours L3). Université A. Mira – Béjaïa.
- [9] Bouami, D. (2009). *Le grand livre de la maintenance : Concepts, démarches, méthodes, outils et techniques*. Éditions Dunod.
- [10] AFNOR. (2001). *Maintenance – Terminologie* (Norme NF EN 13306). Association Française de Normalisation.
- [11] Bellaouar, A., & Beleulmi, S. (2014). *Fiabilité, maintenabilité, disponibilité*. Université Constantine 1.
- [12] Ait Mokhtar, E. (2022). *Modèle de maintenance* (Cours de maintenance industrielle). Université de Béjaïa.
- [13] Laggoune, R. (2019/2020). *Fiabilité des systèmes* (Cours). Université A. Mira – Béjaïa.
- [14] Laggoune, R. (2008). *Les modèles de maintenance basés sur la distribution des durées de vie*. Université A. Mira – Béjaïa.
- [15] Dijoux, Y. (2008). *Modèles d'âge virtuel et de risques concurrents pour la maintenance imparfaite* (Thèse de doctorat). Institut Polytechnique de Grenoble.
- [16] Doyen, L., & Gaudoin, O. (2004). Classes of imperfect repair models based on reduction of failure intensity or virtual age. *Reliability Engineering & System Safety*, 84, 45–56.

Résumé :

Ce projet de fin d'études porte sur l'analyse et l'optimisation de la maintenance d'une pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E à 5 étages, utilisée chez Sonatrach pour le transport des hydrocarbures. L'étude souligne le rôle stratégique de la maintenance dans un environnement industriel, en particulier l'intérêt d'une politique de maintenance préventive périodique imparfaite, avec une réparation minimale à la défaillance. Après analyse des défaillances, une stratégie d'interventions périodiques a été retenue, permettant de déterminer la périodicité optimale, le nombre d'interventions préventives et le coût moyen minimal.

Enfin, l'étude a permis d'estimer l'âge limite de la pompe, au-delà duquel son remplacement devient économiquement optimal, garantissant ainsi la continuité du service et la maîtrise des coûts.

Mots clés : maintenance imparfaite, réduction géométrique d'intensité, optimisation du la maintenance, pompe centrifuge GUINARD DVMX 6.8.11 E 5.

Abstract :

This final-year project focuses on the analysis and optimization of the maintenance of a GUINARD DVMX 6.8.11 E five-stage centrifugal pump, used by Sonatrach for hydrocarbon transportation. The study highlights the strategic importance of maintenance in an industrial environment, particularly the relevance of a periodic imperfect preventive maintenance policy, including minimal repair upon failure. Following a detailed failure analysis, a periodic intervention strategy was adopted, allowing for the determination of the optimal revision interval, the optimal number of preventive interventions, and the minimum average maintenance cost.

Finally, the study enabled the estimation of the pump's limit age, beyond which its replacement becomes economically optimal, thus ensuring service continuity and cost control.

Keywords : imperfect maintenance, geometric intensity reduction, maintenance optimization, GUINARD DVMX 6.8.11 E 5 centrifugal pump.