

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA DE BÉJAÏA



FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES
DÉPARTEMENT RECHERCHE OPÉRATIONNELLE
MÉMOIRE DE MASTER EN MATHÉMATIQUE APPLIQUÉE
SPÉCIALITÉ : MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ET ÉVALUATION DES
PERFORMANCES DES RÉSEAUX

Thème

Optimisation de la disponibilité des
engins au sein de l'entreprise
portuaire de Skikda



المؤسسة المينائية لسكيكدة
Entreprise Portuaire de Skikda



Présenté par :

HAMIDCHA MOSAAB

Soutenu devant le jury composé de :

Président Dr EL HASSENE AIT MOKHTAR
Rapporteur Pr DJAMIL AISSANI
Co-Rapporteur Dr BACHIR CHERFAOUI
Examinatrice Dr NASSIMA BERNINE

U. A/MIRA BÉJAÏA
U. A/MIRA BÉJAÏA
U. A/MIRA BÉJAÏA
U. A/MIRA BÉJAÏA

Promotion 2022 – 2023

Remerciements

Je remercie, en premier lieu, Dieu le tout puissant pour m'avoir donné la force et le courage afin d'accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Djamil AÏSSANI, Professeur à l'Université de Béjaïa, et à Monsieur Bachir Cherfaoui, Docteur à l'Université de Béjaïa, qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de mon manuscrit de Master. Je les remercie pour leurs grandes qualités humaines, leur précieuse attention et particulièrement pour leurs conseils et leurs orientations qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Mes sincères remerciements et ma gratitude vont également à Monsieur Ait Mokhare El Hassene et Madame Bernine Nassima, docteurs à l'Université de Béjaïa, pour avoir accepté de juger ce travail. Soyez assurés de ma reconnaissance totale.

Je tiens à remercier monsieur Abada el kawtar, correspondant de qualité au sien de la dérection de matériel de l'EPS, de m'avoir d'abord accueilli, mais surtout accompagné durant toute la durée du stage. Son soutien, ses conseils et sa disponibilité auront été précieux pour mener à bien mon travail.

Un grand merci à toute l'équipe de département de maintenance des engins, ingénieurs, techniciens et administratifs, pour l'accueil chaleureux et cordial qui m'a été réservé.

Merci aussi à tous mes amis, mes collègues et toutes les personnes que j'ai pu côtoyer pendant ces cinq ans à l'université. Je leur exprime ma profonde sympathie et leur souhaite beaucoup de bien.

Je tiens en dernier lieu à exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

À mes chers parents, dont l'amour et le soutien inconditionnels ont été ma plus grande force tout au long de ce parcours.

À mes merveilleuses sœurs, qui ont toujours été là pour moi, me soutenant avec leur amour, leurs conseils précieux et leur présence réconfortante.

À mon petit frère, qui est une source d'inspiration et de joie dans ma vie.

À toute ma famille, qui a toujours été présente pour moi, me soutenant de près ou de loin.

Enfin, à mes précieux amis, qui ont partagé mes rires, mes peines et mes succès. Votre présence dans ma vie est inestimable, et je vous remercie pour votre soutien constant et vos encouragements sincères. Je dédie ce travail à notre amitié et à toutes les belles aventures que nous avons vécues ensemble.

Table des Matières

Table des Matières	ii
Table des Figures	v
Liste des Tableaux	v
Introduction générale	2
1 Présentation de l'Entreprise Portuaire de Skikda	4
1.1 L'historique et la création de l'entreprise	4
1.2 Identité de L'Entreprise Portuaire de Skikda	5
1.2.1 Dénomination	5
1.2.2 Organisation	5
1.2.3 Compétence territoriale	6
1.2.4 Capacités portuaires de transit	6
1.2.5 Les parcs engins de servitude et de manutention - transfert	7
1.3 Organigramme de l'Entreprise Portuaire de Skikda	8
1.4 La procédure de maintenance adopté par l'entreprise	9
1.5 Position du problème	12
2 Généralités sur la maintenance	13
2.1 Introduction	13
2.2 Définition de la maintenance	13
2.3 Objectifs de maintenance	13
2.3.1 Objectifs opérationnels	13
2.3.2 Objectifs économiques	14
2.4 Types de maintenance	14
2.4.1 Maintenance corrective	14
2.4.2 Maintenance préventive	14
2.5 Moyens de maintenance	15
2.5.1 Les méthodes d'interventions dans la maintenance	16
2.5.2 La documentation de maintenance	16
2.5.3 La co-traitance en maintenance	16
2.5.4 L'outil informatique adopté à la fonction maintenance	16
2.5.5 Le personnel qualifié de maintenance	17
2.5.6 Les qualifications et la formations	17
2.5.7 Organisations technique de la logistique	17
2.5.8 Le stock de maintenance	17

2.6	La sûreté de fonctionnement	17
2.7	Concept (FMDS)	18
	2.7.1 Fiabilité	18
	2.7.2 Maintenabilité	18
	2.7.3 Disponibilité	19
	2.7.4 Sécurité	20
2.8	Conclusion	20
3	Les modèles de maintenance et l'optimisation de la disponibilité	21
3.1	Introduction	21
3.2	Lois usuelles de fiabilité	21
	3.2.1 Loi exponentielle	21
	3.2.2 Loi de Weibull	22
	3.2.3 Loi normale	22
	3.2.4 Loi log normale	23
	3.2.5 Loi Gamma	23
	3.2.6 Loi Bêta	23
	3.2.7 Loi uniforme	24
3.3	Test de validation d'hypothèse	24
	3.3.1 Test de Kolmogorov-Smirnov	24
3.4	Les modèles de maintenance	24
	3.4.1 Modèle de maintenance minimale	25
	3.4.2 Modèle de maintenance parfaite	26
	3.4.3 Modèle de maintenance imparfaite	27
3.5	Approches de modélisation de stratégies de maintenance avec actions imparfaites	28
	3.5.1 Approche $p(t), q(t)$	28
	3.5.2 Approche des facteurs (α, β)	28
	3.5.3 Approche de $(p-q)$	29
	3.5.4 Approche utilisant l'âge virtuel	30
3.6	Optimisation de la maintenance en utilisant les deux critères : la disponibilité et le coût	31
	3.6.1 Modèles de remplacement optimal de coût et de disponibilité pour les systèmes multi-composants	31
	3.6.2 Stratégie de maintenance imparfaite utilisant le remplacement périodique de type bloc	32
	3.6.3 Stratégie de maintenance imparfaite utilisant le processus de quasi renouvellement	34
3.7	Conclusion	35
4	Application de la stratégie de maintenance imparfaite utilisant le processus de quasi renouvellement	36
4.1	Introduction	36
4.2	Description du modèle utilisé	36
	4.2.1 Pourquoi ce modèle?	36
	4.2.2 Notations	37
	4.2.3 Le modèle	37
	4.2.4 Les données	41

4.3	Calcul de quelques indicateurs de performance	43
4.4	Résultats et discussion	44
4.4.1	Détèrmination des paramètres du modèle	44
4.4.2	Validation des paramètre de la loi de weibull	44
4.4.3	Variation de la disponibilité	45
4.4.4	Discussion des résultats	48
4.5	Étude de sensibilité	49
4.6	Conclusion	53
	Conclusion générale	54

Table des figures

1.1	Organigramme de l'entreprise portuaire de Skikda	9
1.2	La procédure en cas de maintenance curative	10
1.3	La procédure en cas de maintenance préventive	11
2.1	Les différents types de maintenance	15
2.2	Les moyens de la maintenance	16
2.3	Présentation schématique du concept "Fiabilité-Maintenabilité-Disponibilité" .	20
3.1	Classification des modèles de maintenance	25
3.2	L'intensité de défaillance dans le cas de maintenance minimale	26
3.3	L'intensité de défaillance dans le cas de maintenance parfaite	27
3.4	L'intensité de la défaillance dans le cas de maintenance imparfaite	28
3.5	Profil de l'âge virtuel en fonction du temps d'opération	31
3.6	Stratégie de maintenance imparfaite utilisant le remplacement périodique de type bloc	33
4.1	Schéma du modèle quasi-renouvellement	38
4.2	La disponibilité pour l'engin CE222	46
4.3	La disponibilité pour l'engin CE223	47
4.4	La disponibilité pour l'engin CE232	48

Liste des tableaux

4.1	Les données des pannes de l'engin CE222	41
4.2	Les données des pannes de l'engin CE223	42
4.3	Les données des pannes de l'engin CE232	43
4.4	Les indicateurs de performance des engins	44
4.5	Les valeurs des paramètres des engins	44
4.6	Les résultats du test de Kolmogorov Smirnov	45
4.7	La variation de la disponibilité et de T en fonction de α , β et k pour l'engin CE222.	50
4.8	La variation de la disponibilité et de T en fonction de α , β et k pour l'engin CE223.	50
4.9	La variation de la disponibilité et de T en fonction de α , β et k pour l'engin CE232.	51

Introduction générale

Les entreprises portuaires sont souvent susceptibles de rencontrer une série de problèmes majeurs. Il est fort probable que le vieillissement des équipements exige une maintenance adéquate pour éviter des pannes coûteuses et des interruptions d'activité. De plus, la gestion des activités de maintenance devient de plus en plus complexe en raison de la rareté des ressources, telles que la main-d'œuvre qualifiée et les pièces de rechange.

Alors la question du choix des modèles de maintenance efficaces revêt une importance capitale au sein des entreprises portuaires, qui doivent s'assurer une disponibilité optimale de ces équipements fondamentaux pour leurs activités .

Diverses études ont été réalisées pour optimiser la disponibilité dans le domaine de la maintenance, dans plusieurs secteurs. Par exemple, une étude menée par Boutinzar M et Azegagh M [1] a étudié la disponibilité du réseau anti-incendie du parc de SONATRACH à Béjaïa, en se basant sur le calcul de la fiabilité et de la maintenabilité du réseau. Une autre étude a été réalisée au sein de l'entreprise MAC-SOUMAM par Chahboune S et Hammou R [2], l'objectif de cette étude était d'analyser la disponibilité des équipements de la chaîne de montage B de l'entreprise MAC-SOUMAM, en se basant sur le calcul de la fiabilité et de la maintenabilité de ces derniers, enfin, Bouhamou F et Oukaour N [3] ont mené une étude d'analyse du retour d'expérience pour la planification de la maintenance du parc des chariots élévateurs au Port de Béjaïa.

Contrairement aux autres études qui ont été faites, dans notre étude, nous allons nous intéresser à l'application de nouveaux modèles pour optimiser la disponibilité, en prenant en considération deux facteurs essentiels , le facteur de la réduction de la durée moyenne de vie du système et le facteur l'augmentation de la durée de réparation du système.

Dans le cadre de notre mémoire, nous nous concentrons sur l'optimisation de la disponibilité des engins au sein de l'Entreprise Portuaire de Skikda. Notre étude se base sur l'application d'un modèle de quasi-renouvellement de maintenance imparfaite.

Ce modèle vise à optimiser l'utilisation des ressources et à planifier la maintenance de manière prévisionnelle afin de garantir une disponibilité optimale des équipements essentiels.

En prenant en compte les spécificités de l'environnement et des opérations de l'entreprise portuaire de Skikda, cette recherche vise à formuler des recommandations et des solutions concrètes pour optimiser la disponibilité des engins.

Ce travail est décomposé comme suit :

La première partie de ce mémoire est dédiée à la présentation détaillée de l'Entreprise Portuaire de Skikda, dans le but d'éclairer son historique, sa structure organisationnelle ainsi que ses capacités portuaires de transit.

La deuxième partie aborde les concepts généraux liés à la maintenance. Nous commençons par définir la maintenance, puis nous examinons ses objectifs, les différents types de maintenance et les moyens associés. Enfin, nous abordons les concepts de la sûreté de fonctionnement (FMDS).

la troisième partie se concentre tout d'abord sur l'aspect statistique de la maintenance à travers l'utilisation des lois de fiabilité. Ensuite, nous examinons les modèles de maintenance dans le but d'améliorer la disponibilité des systèmes.

Dans la quatrième partie, nous nous concentrons sur l'application de la stratégie de maintenance imparfaite en utilisant le processus de quasi-renouvellement pour atteindre les objectifs fixés pour cette étude.

Enfin, nous concluons par une synthèse générale qui récapitule les éléments essentiels de ce travail ainsi que les résultats de cette étude. Nous abordons également les perspectives futures

1

Présentation de l'Entreprise Portuaire de Skikda

1.1 L'historique et la création de l'entreprise

Avant la création de l'Entreprise Portuaire de Skikda, le secteur portuaire est passé par plusieurs phases d'organisation et de régimes administratifs :

- 1962-1971 : Le port de Skikda était géré par la chambre de commerce et d'industrie.
- 1971- 1982 : Création de l'Office National des Ports (13 mai 1971) chargé de la gestion, de l'exploitation et en ce qui la concerne du développement des ports.

Les ports sont organisés en unités portuaires et exercent le monopole des opérations de pilotage de lamanage et les prérogatives de police et de sécurité portuaire .

- 1982- 1988 : Création de l'Entreprise portuaire de Skikda (Décret N° 82-284 du 14 août 1982) issue du regroupement de l'Office National des Ports, de la Société Nationale de Manutention et du service remorquage détenu anciennement par la Compagnie Nationale Algérienne de Navigation.

Entreprise socialiste à caractère économique, elle assure le monopole des dites activités ainsi que les prérogatives de puissance publique de police et de sécurité portuaire. Cette gestion sous tutelle du Ministère des transports s'achèvera avec l'avènement de la loi sur l'autonomie des entreprises N°88/01 du 12 janvier 1988.

- 1988/89 –2003 : Création de l'Entreprise Publique Economique (EPE), Société par Actions (SPA) le 21 mars 1989 (date de passage à l'autonomie), au capital de 135 millions de DA. L'Entreprise conserve les mêmes prérogatives du régime antérieur.

Son portefeuille d'actions est détenu par la Société de Gestion des participations des Ports (SOGEPORTS).

- Année 1998 : Réorganisation du secteur portuaire (Transition en cours) avec la promulgation de la loi N° 98/05 portant code maritime consacrant la séparation des missions de puissance publique des activités commerciales et du décret exécutif N° 99-200 du 18 août 1999 portant désignation de l'autorité portuaire de l'Est à Skikda .

1.2 Identité de L'Entreprise Portuaire de Skikda

1.2.1 Dénomination

- Dénomination : Entreprise Portuaire de Skikda, par abréviation EP-Skikda
- Forme juridique : Entreprise Publique Economique, Société par actions régie par les lois et règlements relatifs à l'autonomie des Entreprises.
- Date de création : Décret N° 82-284 du 14 Août 1982 et modification des statuts en société par actions en date du 21 Mars 1989.
- Siège social : Petit zone Industrielle près embouchure Oued Saf Saf (ex. Domaine des lions) BP. 65. Skikda 21 000. Algérie.
- Capital social : 9.000.000.000 DA détenu par un actionnaire unique, le Groupe services portuaires "SERPORT Spa"

1.2.2 Organisation

L'Entreprise Portuaire de Skikda est administrée par un conseil d'administration composé de sept (07) membres; cinq (06) membres représentant le Groupe services portuaires par abréviation "SERPORT Spa" dont le Directeur Général de l'Entreprise Portuaire de Skikda en sa qualité de membre et deux (02) membres de droit représentant les travailleurs. Société organisée en Direction Générale mono unité.

Activités et missions

L'entreprise portuaire de Skikda a pour objet sociale la gestion du domaine public portuaire et son corollaire : l'exercice des opérations de police et de sécurité relatives au mouvement de la navigation et à la préservation et sauvegarde du dit domaine public portuaire. Le domaine Public Portuaire est constitué de :

- Plants d'eau.

- Terre-pleins, hangars, magasins.
- Divers locaux à usage administratif et commercial.

La gestion du Domaine public portuaire s'effectue de manière directe pour les plants d'eau, l'affectation des postes à quai aux navires et l'utilisation des terre-pleins et hangars.

Autre la gestion du domaine public l'entreprise exerce des activités de services se rapportant à :

- La gestion et l'exploitation de l'outillage et des installations portuaires.
- L'exercice des opérations de remorquage, de pilotage et de lamanage.
- L'exercice des opérations d'acconage et de manutention.
- L'exercice des missions de Police et de sécurité portuaire.
- L'exécution des travaux d'entretien, d'aménagement et de renouvellement de la Superstructure portuaire.
- L'élaboration, en relation avec les autres autorités concernées, de programmes de travaux
- D'entretien, d'aménagement et de création d'infrastructures portuaires.

1.2.3 Compétence territoriale

La compétence territoriale de l'entreprise portuaire de Skikda s'étend aux ports suivants :

- Deux ports de commerce : le Port Mixte de Skikda et le Port Skikda El-Djédid, spécialisé hydrocarbures.
- Deux postes de chargement en mer.

1.2.4 Capacités portuaires de transit

- Transit Marchandises générales : 2.500.000 tonnes/an ; 14 postes à quai avec un total de 2.418 Ml de quai.
- Transit Hydrocarbures : 30.000.000 tonnes /an ; 10 appontements pour des navires de 25 à 130.000 tonnes DWT, deux bouées offshore de 30.000.000 Tonnes DWT.
- Surfaces commerciales :
 - Superficies commerciales couvertes (magasins, hangars modulaires, abris sous auvents) : 17.656 m²

— Superficies commerciales terre-pleins : 180 975 m².

— Superficies en zone extra portuaire : 390.000 m².

1.2.5 Les parcs engins de servitude et de manutention - transfert

Parc naval et flottant

— Parc remorqueurs : 09 remorqueurs de 1700 à 6000 CV.

— Parc vedettes de pilotage : 06 pilotins de 360 à 1.110 CV

— Parc canots d'amarrage : 11 canots, 73 à 156 CV

— Pousseurs : 04 canots : 210 à 262

— Barge de récupération anti-pollution : 02 barges (10 m³ et 25 m³)

Parc grues

— Grues portuaires sur pneus à treilles : 12 de 40 à 202 tonnes

— Grues automobiles sur pneus : 08 de 50 à 500 tonnes

Parc chariots élévateurs

— Chariots élévateurs petit et moyen tonnage : 44 chariots de 1.6 à 10 tonnes

— Chariots élévateurs gros tonnages (hors engins manutention conteneurs) : 15 de 16 à 42 tonnes

— REACH- STACKERS : 17 de 42 à 45 tonnes.

— Chargeurs : 15

Matériel de transfert

— Tracteurs portuaires : 15 de 30 à 32 tonnes .

— Remorques portuaires : 14 de 25 à 120 tonnes.

Les installations Spécialisées

- Une gare maritime à passagers : 1.200 voyageurs par escale.
- Une gare auto-passager : 3 voies à 2 couloirs avec traitement simultané de 18 véhicules
- Une station de déballastage composée de 3 bacs de stockage d'une capacité totale de 15 000 M3 [3 x 5.000 m3]
- Un silo à céréales (O.A.I.C) de 20.000 tonnes
- Un hangar a silo (EPS) de 35000 tonnes
- Quatre poids – publics au niveau de l'ancien port et trois (03) en extra portuaires
- Une cale de halage : 3 sleep-ways dont deux (02) à sleep-way pour chalutiers
- Un réseau voie ferrée en pleine propriété de 5.930 Ml développant 13 voies

1.3 Organigramme de l'Entreprise Portuaire de Skikda

Outre les prérogatives dévolues par le Code de Commerce et les statuts, l'Entreprise Portuaire de Skikda est administrée par un conseil d'administration.

Elle est gérée par un Directeur Général assisté dans ses tâches par deux Directeur Généraux Adjointes, des directeurs et un corps d'Assistants.

L'Entreprise portuaire de Skikda est organisée et structurée en une Direction Générale et treize (13) directions centrales et deux (02) cellules comme il est indiqué dans la figure 1.1

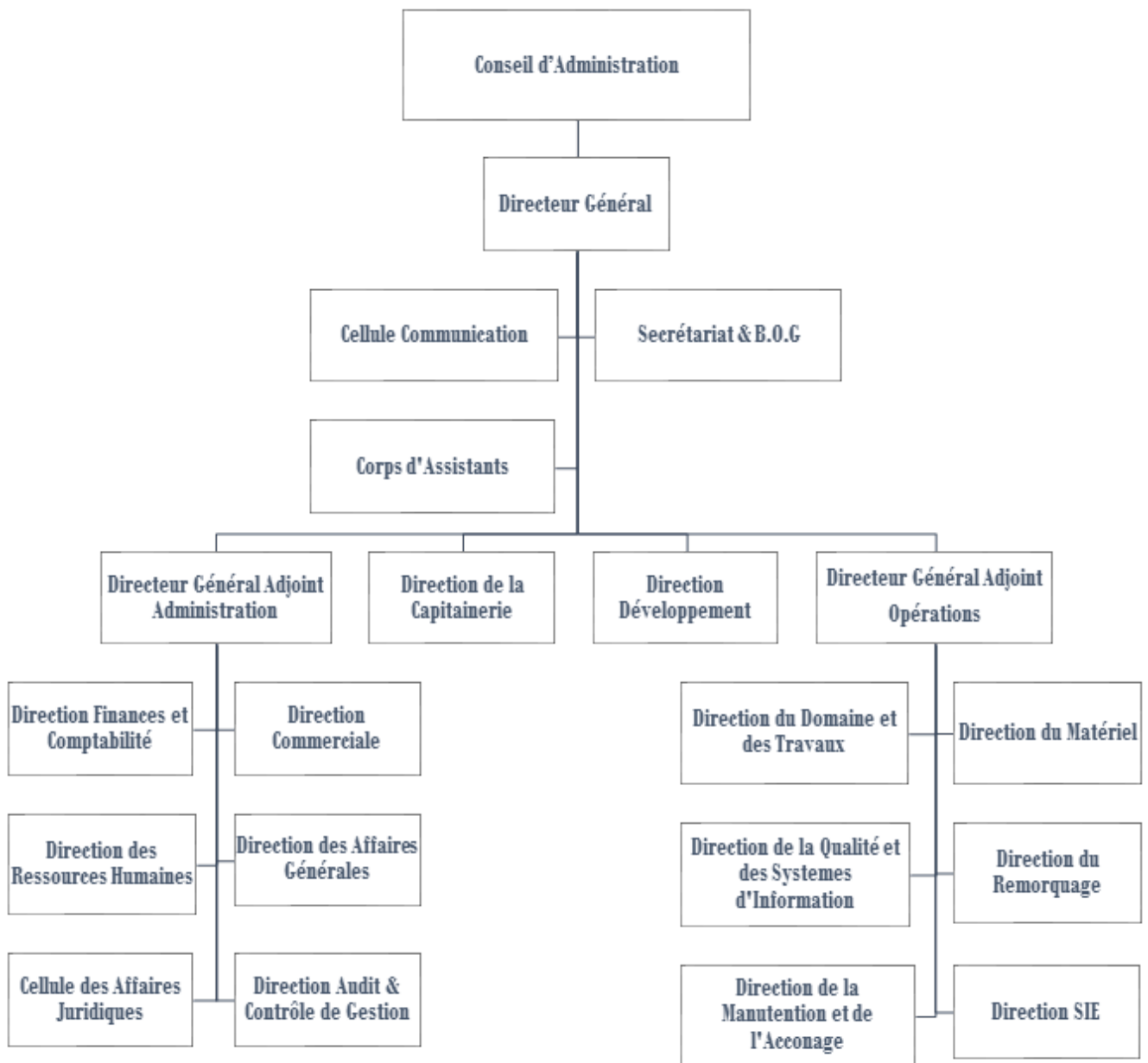



FIGURE 1.1 – Organigramme de l'entreprise portuaire de Skikda

1.4 La procédure de maintenance adopté par l'entreprise

Dans ce qui suit les figures 1.2et 1.3, nous allons présenter la procédure générale d'intervention en cas d'une maintenance corrective ou préventive.

 EPSKIKDA	Procédure de maintenance préventive et curative des engins terrestres et autres équipements		
	Référence : PROC- ST 08-01	N° version C	Page 8/9

MAINTENANCE CURATIVE

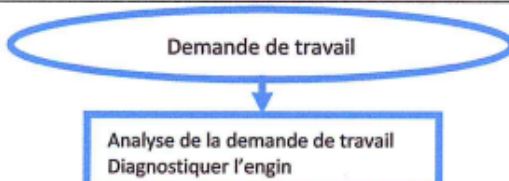
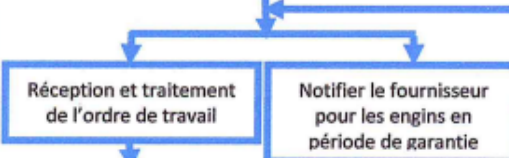
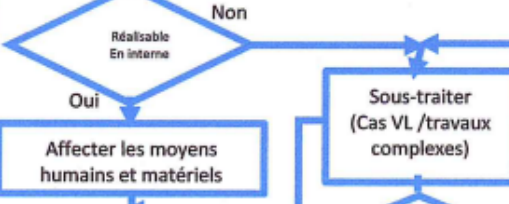
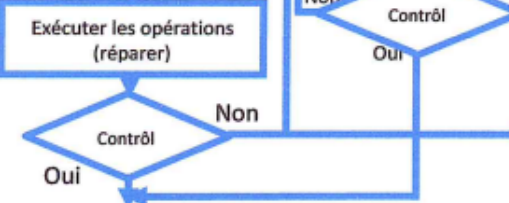
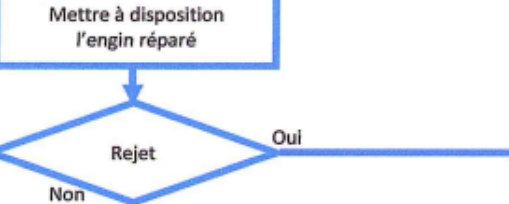
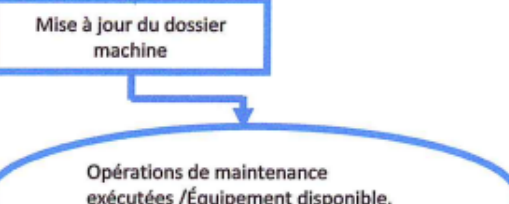
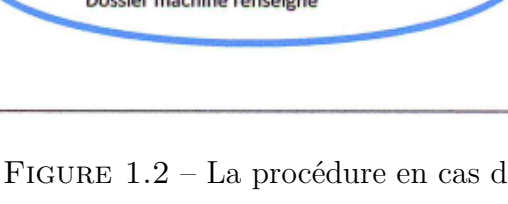



Éléments d'entrée	Logigramme	Documents de sortie	Responsable	Documents opératoires
Demande de travail		Ordre de travail	Chef Sce méthodes	
Ordre de travail		Fiche d'intervention Notification au fournisseur	Chef Sce maintenance/chef Sce méthodes	Gamme opératoire pour les opérations de maintenance
Fiche d'intervention Demande de prestation de service		Demande de prestation de service	Chef Dpt Maintenance Chef Sce Maintenance	Proc ST-09-01 Acheter et s'assurer de la conformité
DPR + BS Attachement signé		BC	Chef Dpt Maintenance Chef Sce Maintenance	
Fiche d'intervention renseigné OT renseigné		DPR + BS		
Notification de mise à disposition		Fiche d'intervention Renseigné OT renseigné	Chef Sce Maintenance	
Notification de mise à disposition validée		Notification de mise à disposition Validée	Chef Dpt Relevage, chefs de Sce des engins terrestres	
Dossier machine renseigné OT renseigné		Dossier machine renseigné	Chef de service méthodes	
		Logiciel actualisé	Chef de service méthodes	

FIGURE 1.2 – La procédure en cas de maintenance curative

 EPSKIKDA	Procédure de maintenance préventive et curative des engins terrestres et autres équipements		
	Référence : PROC- ST 08-01	N° version C	Page 7/9

7. LOGIGRAMME

MAINTENANCE PREVENTIVE


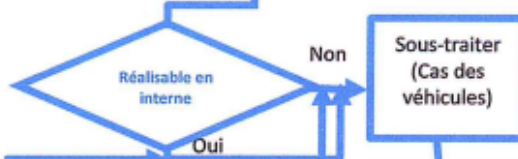
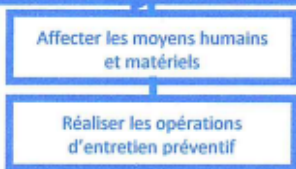

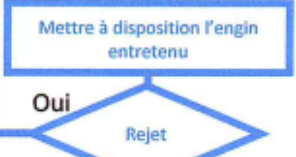



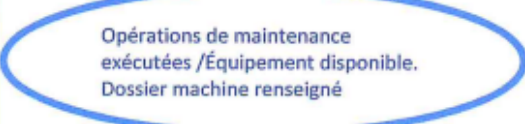
Éléments d'entrée	Logigramme	Documents de sortie	Responsable	Documents opératoires
Dossier machine		Programme d'entretien préventif Ordre de travail	Chef Sce méthodes	Manuel d'entretien, ou Gamme opératoire d'entretien préventif
PEP OT		Demande de prestation de service Fiche d'intervention	Chef Dpt Maintenance engins terrestres, chefs de Sce maintenance des engins terrestres (Grues terrestres ou engins terrestres roulants)	Rapport de contrôle réglementaire périodique
Fiche d'intervention Demande de prestation de service		DPR + B.S BC		
DPR + BS		Fiche d'intervention renseigné Attachement signé	Chef de Sce maintenance	
Fiche d'intervention renseigné Attachement signé		OT renseigné Notification de mise à disposition	Chef de Sce maintenance/Chef de Sce méthodes	
Notification de mise à disposition		Notification de mise à disposition validée	Chef Dpt Relevage, chefs de Sce des engins terrestres (Grues terrestres ou engins terrestres roulants)	
Notification de mise à disposition validée		Dossier machine renseigné OT renseigné	Sce methodes/ de Sce maintenance	
Notification de mise à disposition validée				
Dossier machine renseigné		Logiciel actualisé	Chef de service méthodes	

FIGURE 1.3 – La procédure en cas de maintenance préventive

1.5 Position du problème

Les équipements tels que les grues, les chariots élévateurs ont un impact significatif sur la productivité et l'efficacité des opérations portuaires dans un environnement portuaire. Cependant, des pannes et des défaillances imprévisibles peuvent entraver leur disponibilité, retardant les opérations de chargement et de déchargement des marchandises et perturbant la chaîne logistique globale.

L'objectif principal de cette étude est d'appliquer une stratégie de maintenance efficace pour maximiser la disponibilité des équipements au sein de l'entreprise portuaire de Skikda. Une approche prometteuse pour la gestion prévisionnelle des pannes et des défaillances des engins est offerte par la stratégie de maintenance imparfaite, qui repose sur le processus de quasi-renouvellement. Cette méthode combine des mesures de maintenance correctives et préventives

En appliquant cette méthode, notre ambition est d'améliorer considérablement la disponibilité des engins au sein de l'entreprise portuaire de Skikda.

2

Généralités sur la maintenance

2.1 Introduction

L'efficacité et la fiabilité des systèmes sont des enjeux majeurs dans de nombreux secteurs d'activité, car minimiser les pannes signifie assurer une continuité dans la production et réduire les temps d'arrêt liés aux maintenances. Ce chapitre vise à explorer les concepts de base de la maintenance, ainsi que ceux de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement. Nous aborderons différentes stratégies de maintenance, telles que la maintenance préventive, la maintenance corrective et la maintenance conditionnelle . .

2.2 Définition de la maintenance

La fonction maintenance est très souvent considérée comme une activité clé qui contribue de manière essentielle à la réalisation de performance des entreprises. La maintenance est définie comme " l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise " [4].

2.3 Objectifs de maintenance

2.3.1 Objectifs opérationnels

- Assurer une disponibilité maximale des équipements.
- Éliminer les pannes à tout moment.
- Maximiser la durée de vie des équipements.
- Effectuer le remplacement de l'équipement à des intervalles prédéterminés.
- Assurer aux équipements des performances de qualité.
- Garantir un fonctionnement sûr et efficace des équipements.

- Maintenir les équipements dans un état de propreté optimal

2.3.2 Objectifs économiques

- Réduire les coûts liés à la maintenance.
- Veiller à ce que la maintenance reste dans les limites budgétaires fixées.
- Prévoir les dépenses de maintenance en prenant en compte les exigences du service, le taux d'utilisation et l'âge des installations .

2.4 Types de maintenance

La maintenance peut être classée en différents types en fonction de ses objectifs et de sa planification. Dans ce qui suit en va présenter quelques types .

2.4.1 Maintenance corrective

La maintenance corrective désigne l'élimination d'une avarie ou d'une altération dans le fonctionnement d'un élément matériel, par l'un des divers moyens que sont la réparation, la restauration à l'état antérieur et le remplacement de l'élément matériel impliqué [5].

- **Maintenance palliative** : vise à rétablir rapidement la fonctionnalité après une défaillance pour limiter les interruptions.
- **Maintenance curative** : Opérations de réparation définitive, permettant d'éliminer la défaillance et récupérer la fonction perdue, d'une façon permanente.

2.4.2 Maintenance préventive

La maintenance préventive vise à diminuer la probabilité de défaillance d'un système. Il convient donc d'organiser un système de maintenance visant à minimiser ces arrêts tout en ne devenant pas très onéreux [5] . La maintenance préventive se divise en 3 types :

- **Maintenance systématique** :La maintenance régulière est basée sur des facteurs liés à l'utilisation réelle de l'équipement. Les mesures fixées par le constructeur, mais qui peuvent être modifiées par le service de maintenance.
- **Maintenance conditionnelle** : Maintenance basée sur paramètres de fonctionnement (niveau consommable, viscosité huile...) comparés à référence normes. Déclenchée par dépassement seuil anormal, permettant estimation état équipement et détermination opérations d'entretien nécessaires.
- **Maintenance prévisionnelle (prédictive)** : La version avancée de la maintenance conditionnelle Analyse des signes de dégradation et des interventions planifiées par priorité pour anticiper les défaillances. La différence consiste à passer de l'état observé à l'état à venir concret.

La figure 2.1 suivante représente les différents types de maintenance

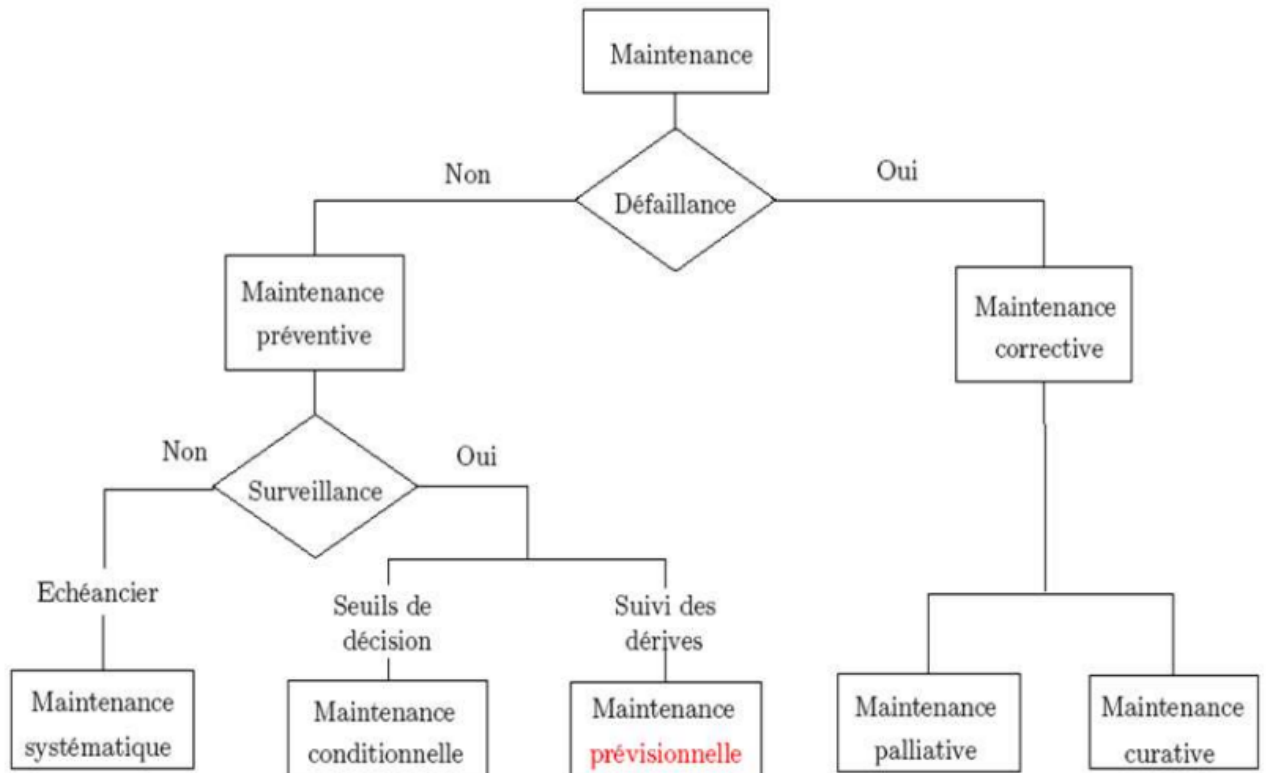


FIGURE 2.1 – Les différents types de maintenance

2.5 Moyens de maintenance

Les moyens de maintenance comprennent les outils, équipements, logiciels de gestion, techniciens qualifiés et méthodes d'intervention utilisés pour assurer la fiabilité, disponibilité et performance des équipements industriels. Et la figure 2.2 représente ces moyens

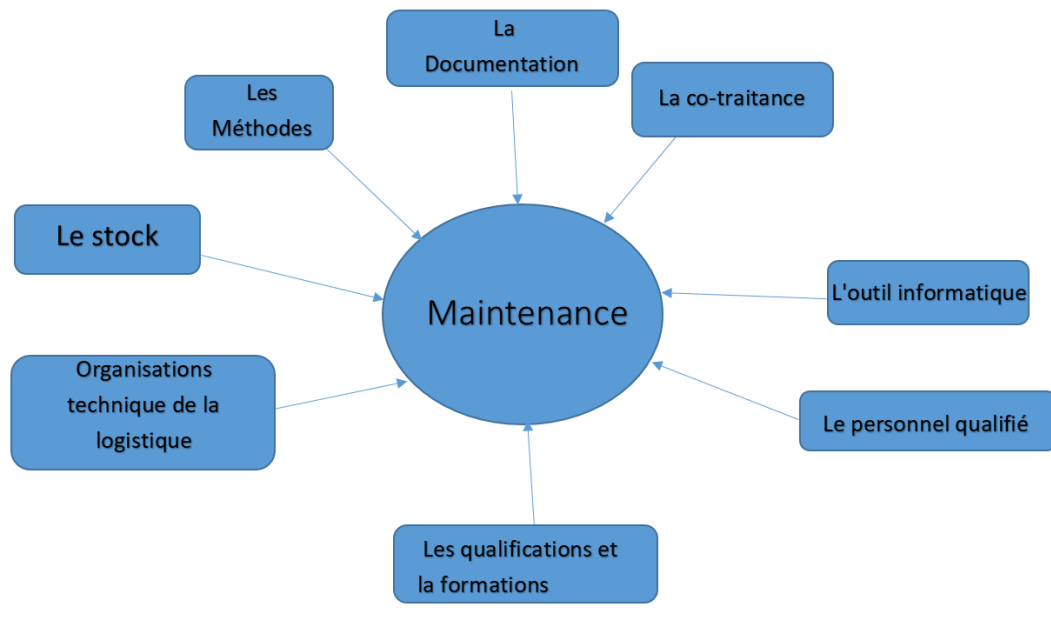


FIGURE 2.2 – Les moyens de la maintenance

2.5.1 Les méthodes d'interventions dans la maintenance

Les méthodes d'intervention en maintenance sont des approches techniques spécifiques utilisées pour effectuer des réparations, vérifications, ajustements ou remplacements visant à assurer le bon fonctionnement et la disponibilité des équipements .
Toutes les méthodes dérivent de deux méthodes de base (maintenance corrective , maintenance préventive) .

2.5.2 La documentation de maintenance

Elle se décompose en documentation générale (Documentation sur les techniques professionnelles, Documentation sur l'outillage) et : La nomenclature des équipements et La documentation du matériel .

2.5.3 La co-traitance en maintenance

La co-traitance en maintenance consiste à confier certains travaux ou services de maintenance à des prestataires externes spécialisés pour améliorer l'efficacité, réduire les coûts et bénéficier de compétences spécifiques.

2.5.4 L'outil informatique adopté à la fonction maintenance

Les techniques informatiques en maintenance réduisent les coûts, fournissent des informations détaillées et exploitables et améliorent la gestion et les techniques. Une structure bien définie, des réunions avec les utilisateurs et une formation adéquate sont nécessaires pour réussir.

2.5.5 Le personnel qualifié de maintenance

Les responsables de la maintenance doivent posséder non seulement une large gamme de compétences techniques, mais également des compétences en gestion, organisation, linguistique, analyse et prise de décision.

2.5.6 Les qualifications et la formations

Il est difficile d'avoir toutes les spécialisations en maintenance, mais les qualifications doivent correspondre aux problèmes techniques. Une connaissance générale interdisciplinaire est essentielle et une formation en équipe sélective est nécessaire pour garantir que les équipements sont disponibles.

2.5.7 Organisations technique de la logistique

La maintenance et la logistique doivent être organisées de manière appropriée pour qu'un système soit opérationnel et économique. Cela peut être accompli en engageant un fournisseur pour une formation, des pièces de rechange, etc., ou en obtenant des données techniques et logistiques régulières.

2.5.8 Le stock de maintenance

La gestion des stocks de maintenance doit répondre aux exigences de disponibilité des pièces, de délai maximal après cessation de fabrication, de coût, de fourniture appropriée et d'indication d'origine pour des problèmes de douane ou de change.

2.6 La sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est une activité d'ingénierie qualitative et quantitative. La part qualitative correspond à l'optimisation des études au Bureau d'Études ; elle représente environ 70% de l'activité totale. Les 30% restants sont consacrés à la maîtrise des risques avant la fabrication et à la reconception des systèmes.

La sûreté de fonctionnement vise à maximiser, à moindre coût, la robustesse des systèmes aux aléas. Elle implique la connaissance, l'évaluation, la prévision, la mesure et la maîtrise des défaillances technologiques et humaines [6].

La sûreté de fonctionnement n'est pas un but en soi, mais un ensemble de moyens, de démarches, de méthodes, d'outils et de vocabulaire. On peut dire simplement que la sûreté de fonctionnement désigne à la fois un ensemble de moyens et un ensemble de résultats produits par ces moyens. Les préoccupations de sécurité sont très présentes dans le monde des machines-outils ou dans les procédés continus tels que la pétrochimie.

Dans les applications de type manufacturier, les préoccupations sont plutôt liées à la disponibilité. Lorsque la sécurité ou la disponibilité d'un système est mise en défaut, on incrimine sa fiabilité. En cas de dysfonctionnement, il convient de remettre le système en conditions

de fonctionnement initial, c'est là qu'intervient la maintenabilité. Ces quatre caractéristiques constituent la sûreté de fonctionnement d'un dispositif [5].

2.7 Concept (FMDS)

2.7.1 Fiabilité

La fiabilité se réfère à la capacité d'un dispositif à accomplir une fonction requise avec un niveau de confiance donné dans des conditions spécifiques et pendant une durée déterminée [4].

la fonction de la fiabilité s'écrit comme suit

$$R(t) = e^{-\int_0^{\infty} \lambda(t) dt} \quad (2.1)$$

On utilise très souvent en maintenance une autre notion la *MTBF* ou Moyenne de Temps de Bon Fonctionnement et on l'exprime sous la forme :

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

Le taux de panne désigné par λ est donc égal à l'inverse de la *MTBF*. C'est le nombre de pannes par heures de fonctionnement. Par exemple si $\lambda = 10^{(-4)}$ signifie qu'il y a une panne toutes les 10^4 heures.

2.7.2 Maintenabilité

La maintenabilité est l'aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir sa fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions avec des procédures et des moyens prescrits [4].

Le paramètre de la maintenabilité est le MTTR qui indique la durée probable d'une intervention [7].

Indice de maintenabilité

1. **Fonction de maintenabilité d'un dispositif** La fonction de maintenabilité d'un dispositif fait référence à la capacité de ce dispositif à être maintenu efficacement et rapidement. C'est une fonction croissante, elle est donnée par :

$$M(t) = P(\text{la maintenance de E est achevée au temps } t) \quad (2.2)$$

2. **Le taux de réparation d'un dispositif $\mu(t)$** C'est la densité de probabilité pour qu'il soit remis en service entre les instant t et $t + dt$ sachant qu'il était en panne à l'instant t .

$$\mu(t) = -\frac{1}{1 - M(t)} \frac{dM(t)}{dt} = \frac{g(t)}{1 - M(t)} \quad (2.3)$$

$g(t)$ est la densité de probabilité de réparation, elle est généralement ajustée par une distribution exponentielle ou log-normale.

3. **Moyenne des temps de réparation** Une fonction importante souvent utilisée dans les études de maintenabilité est le temps de réparation (MTTR) ou le temps moyen d'arrêt. Le MTTR est la valeur prévue de temps de réparation.

$$MTTR = \int_0^{\infty} tg(t)dt = \int_0^{\infty} (1 - M(t))dt \quad (2.4)$$

2.7.3 Disponibilité

C'est l'aptitude d'un bien sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de la maintenance à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées [4].

Le MTTR reflète avec le MTBF la disponibilité d'un équipement. Pour les équipements dont le MTBF et le MTTR seraient pratiquement constants, le taux de disponibilité serait en régime permanent : [8] .

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = 1 - \frac{MTTR}{MTTR + MTBF} \quad (2.5)$$

La formule ci-dessus montre que : pour améliorer la disponibilité D, il faut soit augmenter le MTBF, soit diminuer le MTTR, soit encore par une combinaison des deux facteurs.

1. **Augmentation du MTBF**

Augmenter le MTBF se traduit par une augmentation de la qualité de l'équipement. Dans la majorité des cas, cela correspond au remplacement de l'équipement concerné. [8].

2. **Diminution du MTTR**

Diminuer le MTTR veut dire être bien organisé afin de permettre une maîtrise du fonctionnement des différents équipements. [8] .

Il y a 3 type de disponibilité qui sont :

1. Disponibilité moyenne

$$D_{moy} = \frac{\text{temps de disponibilité}}{\text{temps de disponibilité} + \text{temps d'indisponibilité}}$$

2. la disponibilité intrinsèque :

$$D_{int} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

3. Si l'on ajoute la moyenne des temps logistiques (MTL) à la disponibilité intrinsèque, on obtient la disponibilité opérationnelle :

$$D_{opr} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MTL}$$

La figure 2.3 montre la relation entre la fiabilité , la maintenabilité , la disponibilité

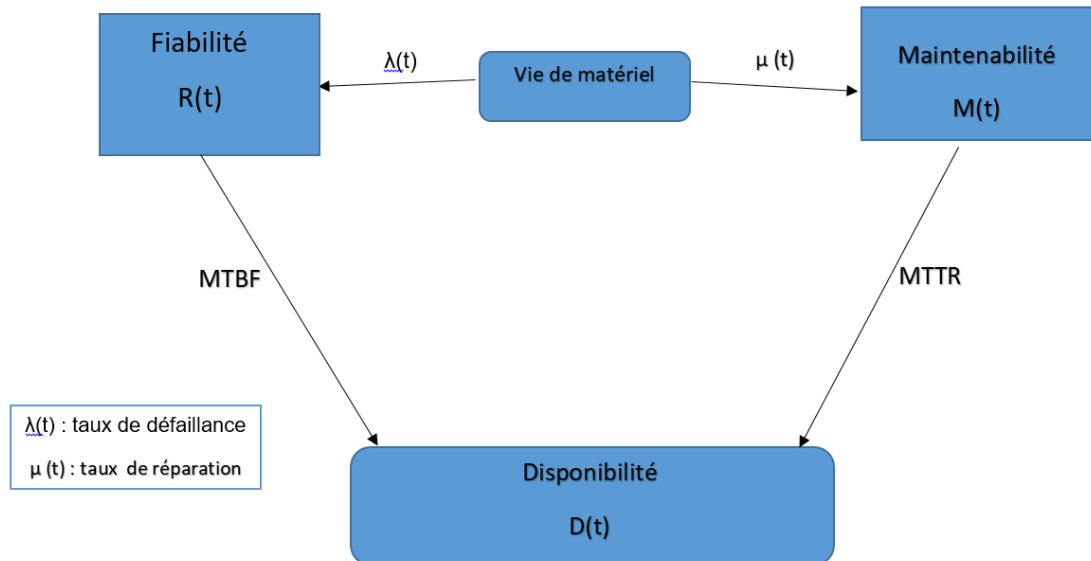


FIGURE 2.3 – Présentation schématique du concept "Fiabilité-Maintenabilité-Disponibilité"

2.7.4 Sécurité

La sécurité concerne les mesures prises pour prévenir les accidents, protéger les opérateurs, les utilisateurs et l'environnement contre les risques potentiels liés au fonctionnement et à la maintenance d'un système ou d'un équipement. Elle englobe également la conformité aux normes et réglementations en matière de sécurité.

2.8 Conclusion

En conclusion, ce chapitre nous permet d'explorer certains généralités de la maintenance, de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement des systèmes.

Nous comprenons que la maintenance est essentielle pour assurer la performance et la durabilité des équipements et des infrastructures. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différents modèles de maintenance .

3

Les modèles de maintenance et l'optimisation de la disponibilité

3.1 Introduction

L'amélioration de la disponibilité des systèmes est un objectif majeur dans de nombreux secteurs. Pour y parvenir, un modèle de maintenance efficace doit être développé et des stratégies optimisées pour assurer une disponibilité optimale des équipements.

Ce chapitre se concentre sur l'étude des modèles de maintenance et sur l'optimisation de la disponibilité. Nous explorerons différentes approches et méthodologies afin de maximiser la disponibilité de système.

3.2 Lois usuelles de fiabilité

Pratiquement, la fiabilité est une grandeur quantitative et nécessite la connaissance des distributions de durée de vie afin de l'estimer. Ces distributions doivent absolument tenir compte de tous les mécanismes de défaillance associés aux différentes technologies [9] .

Dans cette section, nous abordons les lois et les modèles de fiabilité qui sont couramment utilisés dans l'analyse de la fiabilité pour représenter les distributions de durée de vie les plus fréquemment observées. Nous mettons en évidence les caractéristiques principales de ces lois, y compris les fonctions de fiabilité, les densités de probabilité et les taux de défaillance associés

3.2.1 Loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines, elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales. La loi exponentielle est la plus couramment utilisée en fiabilité électronique pour décrire la période durant laquelle le taux de défaillance

des équipements est considéré comme constant (défaillance aléatoire) [10].

Elle décrit le temps écoulé jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances. Elle est définie par un seul paramètre qui est le taux de défaillance λ elle est caractérisée par :

$$\text{La fiabilité} : R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$\text{La fonction de répartition} : F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$\text{La densité de probabilité} : f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$\text{Le taux de défaillance} : \lambda(t) = \lambda$$

3.2.2 Loi de Weibull

La loi de Weibull est souvent utilisée en plusieurs applications industrielles ; elle caractérise bien le comportement du produit dans les trois phases de vie, présenter indépendamment, selon la valeur du paramètre de forme θ , pour la période de jeunesse $\theta < 1$, période de vie utile $\theta = 1$ et pour la période d'usure ou vieillissement $\theta > 1$. La loi de Weibull est définie par deux paramètres g et θ , elle est caractérisée par :

$$\text{La fonction de fiabilité} : R(t) = e^{-\left(\frac{t}{g}\right)^\theta}$$

$$\text{La densité de probabilité} : f(t) = \frac{\theta}{g} \left(\frac{t}{g}\right)^{\theta-1} e^{-\left(\frac{t}{g}\right)^\theta}$$

$$\text{La fonction de répartition} : F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{g}\right)^\theta}$$

$$\text{Le taux de défaillance} : \lambda(t) = \frac{\theta}{g} \left(\frac{t}{g}\right)^{\theta-1}$$

3.2.3 Loi normale

La loi normale est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes physiques, la loi normale est définie par la moyenne j et l'écart type σ , donnée par :

$$\text{La fonction de fiabilité} : R(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-j}{\sigma}\right)^2} dx$$

$$\text{La densité de Probabilité} : f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-j}{\sigma}\right)^2}$$

$$\text{La fonction de répartition} : F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-j}{\sigma}\right)^2} dx$$

Si t suit une loi Normal $N(j, \sigma)$, $y = \frac{t-j}{\sigma}$ suit une loi Normal centrée réduite dont la fonction de répartition notée ϕ est donnée par :

$$\phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{1}{2}l^2} dl$$

3.2.4 Loi log normale

Une variable aléatoire continue et positive t est distribuée selon une loi log normale si son logarithme est distribué suivant une loi normale. Cette distribution est utilisée en fiabilité pour modéliser les défaillances par fatigue, la loi lognormale a deux paramètres v et z , donnée par :

$$\text{La fonction de fiabilité} : R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(t) - v}{z}\right)$$

$$\text{La densité de probabilité} : f(t) = \frac{1}{tz\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-v}{z}\right)^2}$$

$$\text{La fonction de réparation} F(t) = \phi\left(\frac{\log(t) - v}{z}\right)$$

$$\text{Le taux de défaillance} : \lambda(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-v}{z}\right)^2}}{t \int_0^\infty z\sqrt{2\pi}f(t)dt}$$

3.2.5 Loi Gamma

Elle représente la loi de probabilité d'occurrence de ξ événements dans un processus de poisson. Par exemple si t_i est le temps entre les défaillances successives d'un système, et que t_i suit une distribution exponentielle, le temps cumulé d'apparition de ξ défaillances suit une loi Gamma :

$$\Gamma(\xi) = \int_0^\infty e^{-t} t^{\xi-1} dt$$

$$\text{La fonction de fiabilité} : R(t) = 1 - \frac{\Gamma_t(\xi)}{\Gamma(\xi)}$$

$$\text{La densité de probabilité} : f(t) = \frac{t^{\xi-1} e^{-t}}{b^\xi \Gamma(\xi)}$$

$$\text{La fonction de réparation} F(t) = \frac{\Gamma_t(\xi)}{\Gamma(\xi)}$$

$$\text{Le taux de défaillance} : \lambda(t) = \frac{t^{\xi-1} e^{-t}}{b^\xi \int_0^\infty \Gamma(\xi) f(u) du}$$

3.2.6 Loi Bêta

Cette loi représente en particulier la probabilité pour qu'un matériel survive jusqu'à un instant t , quand on essaie n matériels. D'où son intérêt dans l'évaluation de la durée des essais de fiabilité, la loi Bêta a deux paramètres ι et κ , donnée par :

$$\text{La densité de probabilité} : \frac{\Gamma(\iota + \kappa)}{\Gamma(\iota) * \Gamma(\kappa)} t^{\iota-1} (1-t)^{\kappa-1}$$

3.2.7 Loi uniforme

La loi uniforme est souvent utilisée en fiabilité pour les essais bayésiens en l'absence de connaissances pour construire l'information a priori. Cette loi peut prendre toute valeur dans un intervalle (ε et ζ) avec une densité de probabilité constante, donnée par :

$$\text{La fonction de répartition} : F(t) = \frac{t - \varepsilon}{\zeta - \varepsilon}$$

$$\text{La densité de probabilité} : f(t) = \frac{1}{\zeta - \varepsilon}$$

3.3 Test de validation d'hypothèse

Le test de d'hypothèse, nous permet de valider ou de rejeter une loi choisi pour un échantillon de données, le choix d'une loi de fiabilité se fait en considérant maints facteurs tel que : la nature des dispositifs (mécanique, électronique ... etc.) et la nature des défaillances ; Ces derniers peuvent s'avérer des indicateurs capitaux en ce qui concerne l'évolution et le comportement du système [11].

3.3.1 Test de Kolmogorov-Smirnov

Le test de Kolmogorov-Smirnov est l'un des tests d'hypothèses les plus utilisés en lois de probabilité continues, l'écart D_n^{max} en valeur absolue qui résulte de la soustraction de la fonction cumulative théorique $B_{th}(t)$ de la fonction cumulative empirique $B_n(t)$, par la suite le résultat sera comparé à celui de la table Kolmogorov-Smirnov pour un niveau de confiance de $1 - \nu$ (ν le seuil de niveau de confiance). La formule de $B_{th}(t)$ est la suivante [11] :

$$D_n^{max} = \max[B_n(t_i) - B_{th}(t_i)] \quad (3.1)$$

3.4 Les modèles de maintenance

La maintenance peut être classée selon le degré de restauration d'un système ou d'une partie du système en 3 principaux catégories (figure 3.1) " parfaite , imparfaite , minimale "

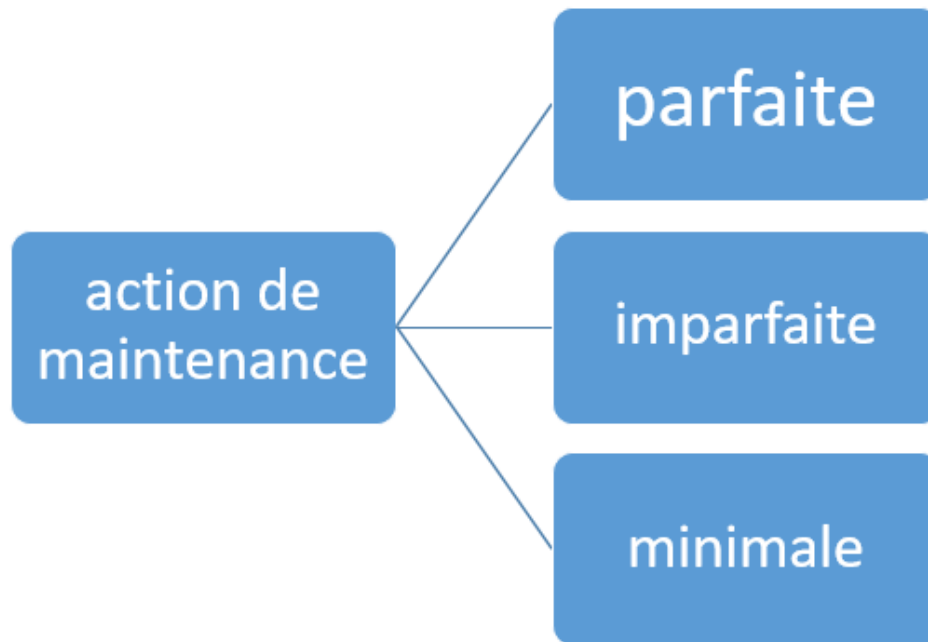


FIGURE 3.1 – Classification des modèles de maintenance

3.4.1 Modèle de maintenance minimale

Selon le modèle de maintenance minimale, l'effet de la maintenance est de remettre le système en fonctionnement dans l'état exact ou dans l'état qu'il avait avant la défaillance. Cela représente un type d'effet de maintenance qui est neutre (ne modifie ni ne détériore le système). Le terme « aussi mauvais que vieux » ou « As bad as old » en anglais est utilisé pour décrire le système après maintenance minimale [12].

La figure 3.2 représente l'intensité de défaillance dans le cas de maintenance minimale l'instant am_1 et am_2 c'est les instants d'interventions de maintenance

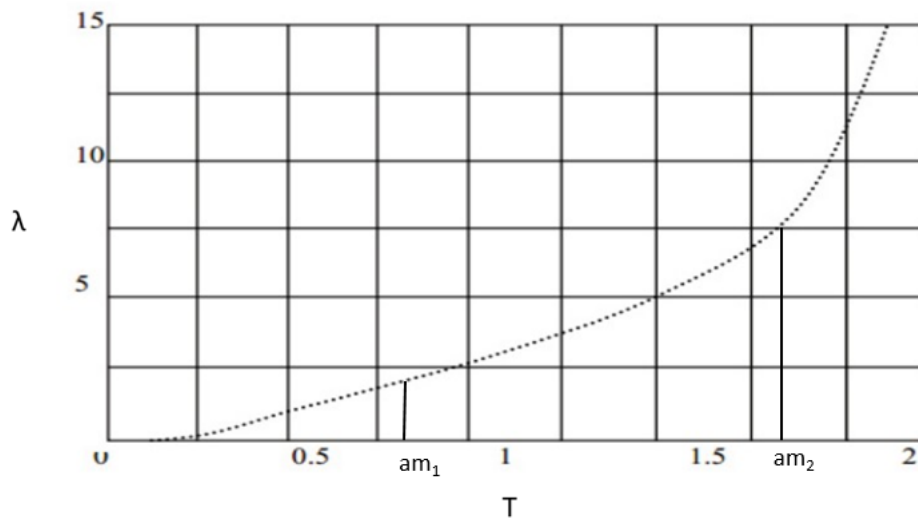


FIGURE 3.2 – L'intensité de défaillance dans le cas de maintenance minimale

3.4.2 Modèle de maintenance parfaite

Selon le modèle de maintenance parfaite, chaque action de maintenance remet le système à neuf. Ainsi, le système qui a subi une maintenance est de qualité égale à celle d'un système neuf, également connu sous le nom d'As Good As New (AGAN). Les temps de défaillance et de maintenance sont alors indépendantes et soumises à la même législation. Il est facile de démontrer que cela implique l'écriture de l'intensité de la défaillance (le niveau d'intervention) [12] :

$$\lambda_t = \lambda(t - TN_t) \quad (3.2)$$

- t : temps d'observation
- N_t : représente le nombre cumulatif d'actions de maintenance effectuées jusqu'au temps " t ".
- T : représente le temps moyen entre les actions de maintenance.
- $T N_t$: représente le temps total passé en maintenance jusqu'au temps " t ".

La Figure (3.3) représente une trajectoire de l'intensité de défaillance d'un système pour des maintenances AGAN. Les instants de défaillance sont les instants de saut de l'intensité. Après une maintenance.

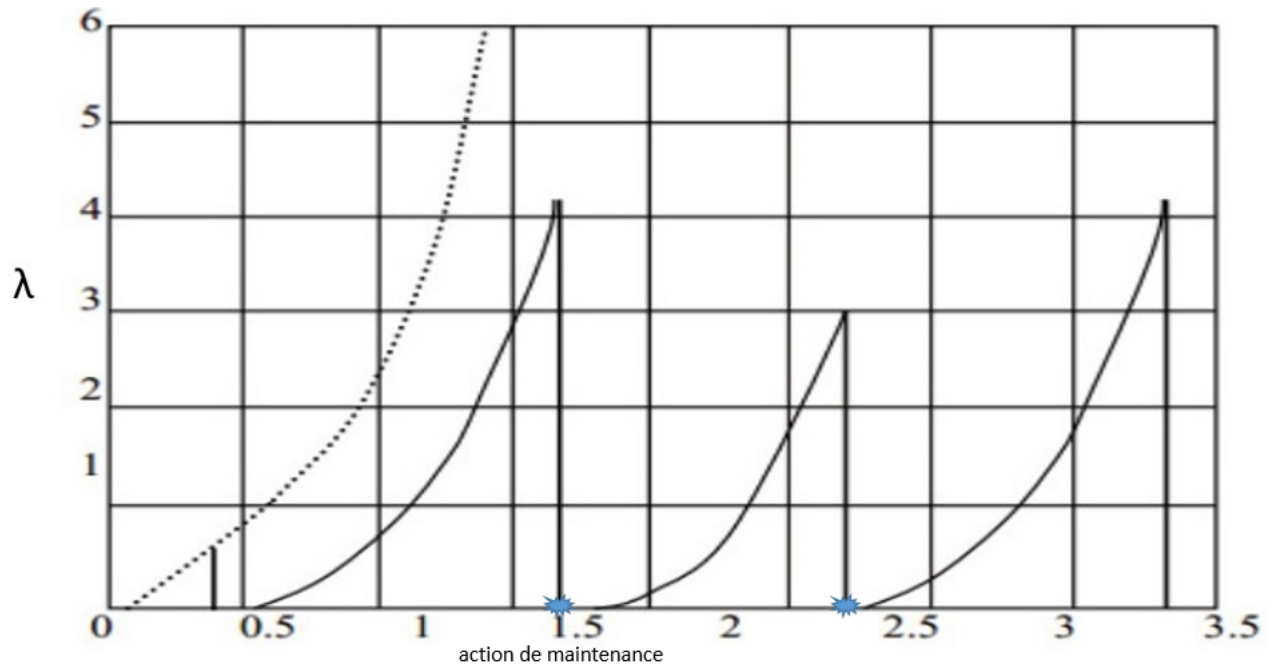


FIGURE 3.3 – L'intensité de défaillance dans le cas de maintenance parfaite

3.4.3 Modèle de maintenance imparfaite

La situation "As Bad As Old" signifie que l'efficacité de la maintenance est minimale et la situation "As Good As New" qu'elle est maximale . En pratique , on est entre ces deux cas extrêmes , Le systeme après maintenance est mieulleur que vieux ou "Better than Old" , Et après maintenance est moins bon que neuf ou "Worse than New" .

Ces deux situations se trouvent parfois dans la littérature sous le nom de réparation meilleure que minimale (Better than minimale Repaire) ou plus largement maintenance imparfaite (Imparfaite Maintenance) [13].

la figure (3.4) montre l'intensité de la défaillance dans le cas de maintenance imparfaite

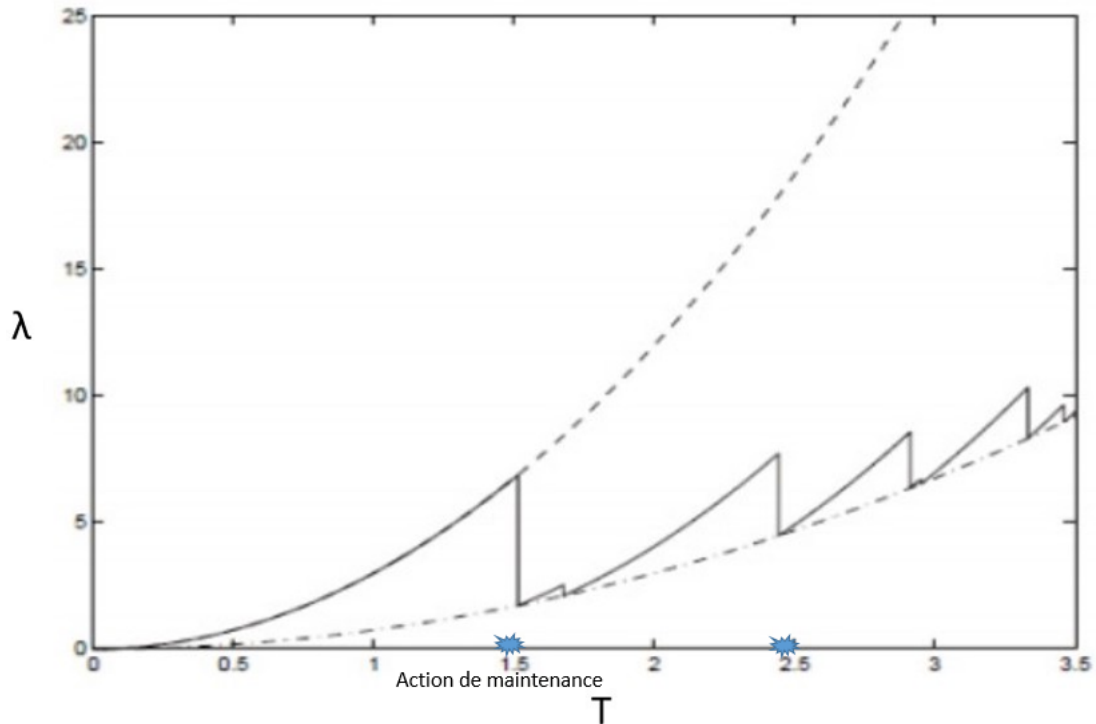


FIGURE 3.4 – L'intensité de la défaillance dans le cas de maintenance imparfaite

3.5 Approches de modélisation de stratégies de maintenance avec actions imparfaites

3.5.1 Approche $p(t)$, $q(t)$

Le modèle de Brown et de Proschan [14] a été étendu par Block et al. [15] en considérant que p et q dépendent de l'âge du système à maintenir.

$$q(t) = 1 - p(t) \quad \forall t > 0 \quad (3.3)$$

La distribution modifiée $F_p(\cdot)$ des durées de vie, s'écrit :

$$F_p(t) = 1 - e^{\left(\int_0^t \frac{p(x)}{1-F(x)} dx\right)} \quad (3.4)$$

Et le taux de panne correspondant est donné par :

$$\lambda_p(t) = \frac{\frac{dF_p(t)}{dx}}{1 - F_p(t)} = p(t)\lambda(t) \quad (3.5)$$

3.5.2 Approche des facteurs (α, β)

Ont construit un modèle reposant sur l'hypothèse suivante : Si $Y_i \quad \forall i \geq 1$ est une suite de variables aléatoires indépendantes et de même loi, alors les durées inter-défaillances sont définies par :

$$X_i = \alpha^{i-1} Y_i \quad \forall \geq 1 \quad (3.6)$$

Où α est un paramètre réel strictement positif. Le taux de panne est défini comme suit :

$$s_t = \frac{1}{\alpha^{N_t}} \lambda \left(\frac{t - T_{N_t}}{\alpha^{N_t}} \right) \quad (3.7)$$

L'efficacité de la maintenance dépend ici du paramètre α au sens où, selon la valeur prise par α , les durées inter-défaillances seront de plus en plus grandes, de plus petites ou de même loi :

- $\alpha > 1$: la maintenance est plus que parfaite au sens où le système après les actions de maintenance est meilleur que neuf ($X_{i+1} > X_i$).
- $\alpha = 1$: la maintenance est parfaite
- $\alpha \in]0, 1[$ les X_i sont de plus en plus petit, donc la fiabilité de système décroît alors l'efficacité de la maintenance est moins bonne que dans le cas précédent.

Le but de l'optimisation de la politique de maintenance est de planifier les dates de maintenance préventives de manière à optimiser les coûts assujettis aux contraintes de disponibilité. Cela ne peut être accompli que si les paramètres du modèle α et λ sont connus.

Wang et Pham [16] ont poussé les choses encore plus loin en affirmant que le temps de réparation n'est pas négligeable et que le temps de réparation suivant sera augmenté d'un multiple de β par rapport au temps de réparation précédent avec $\beta > 1$. En d'autres termes, le nombre de réparations augmente le temps de réparation.

3.5.3 Approche de (p-q)

Selon Nakagawa [17], après chaque action de maintenance préventive, il y a deux options : soit l'unité est ramenée à un état neuf (maintenance préventive parfaite) soit l'unité est ramenée à l'état où elle était avant la maintenance (maintenance préventive minimale).

L'auteur définit la probabilité d'une maintenance préventive parfaite comme p (avec $q = 1-p$) et la probabilité d'une maintenance minimale comme q (avec $q = 1-p$). Par conséquent, ces deux types de maintenance sont deux exemples spécifiques de maintenance préventive imparfaite qui se produit lorsque :

- $p = 1$ pour le premier cas (maintenance préventive parfaite)
- $p = 0$ pour le deuxième cas (maintenance préventive minimale)

Brown et Proschan [14], quant à eux, utilisent la même méthode, mais ils diffèrent de Nakagawa en parlant de maintenance corrective imparfaite. Ces auteurs définissent la distribution de la durée de vie d'un système assujetti à une maintenance corrective comme suit :

Si $F(\cdot)$ est la distribution de la probabilité associée aux durées de vie, $r(\cdot)$ est la fonction du taux de palme et p est la probabilité que l'action de maintenance soit parfaite, la distribution de la probabilité associée aux durées de vie devient :

$$F_p(t) = 1 - (1 - F(t))^p \quad (3.8)$$

Et son taux de défaillance correspondant est égal à :

$$\lambda_p(t) = p \cdot \lambda(t) \quad (3.9)$$

$$\lambda_p = \frac{f_p}{R_p} \quad (3.10)$$

$$f_p = \frac{dF_p}{dt} = p \cdot f(1 - F)^{p-1} \quad (3.11)$$

$$R_p = 1 - F_p = (1 - F)^p \quad (3.12)$$

alors son expression de taux de panne deviens

$$\lambda_p = \lambda * p \quad (3.13)$$

3.5.4 Approche utilisant l'âge virtuel

Kimiji et al [18] ont développé un modèle de réparation imparfaite en utilisant le concept de l'âge virtuel d'un système réparable. Si le système à l'âge virtuel $V_{n-1} = y$ immédiatement après la $(n - 1)^{ième}$ réparation, le $n^{ième}$ instant de défaillance X_n est tel

$$Pr(X_n \leq x / V_{n-1} = y) = \frac{F(x + y) - F(y)}{1 - F(y)} \quad (3.14)$$

Où $F(x)$ est la fonction de distribution associée aux durées de vie du système.

La figure 3.5 représente profil de l'âge virtuel en fonction du temps d'opération

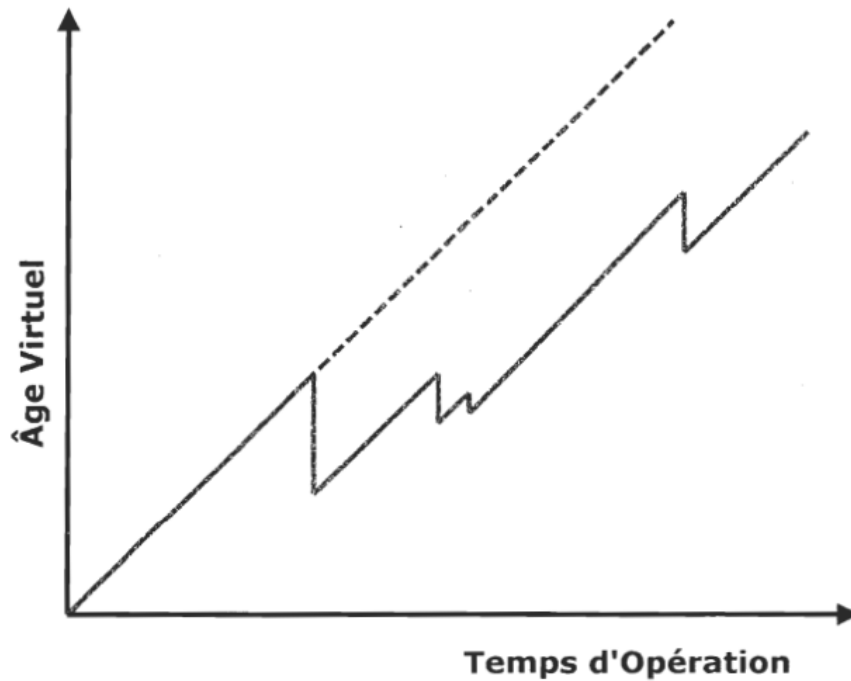


FIGURE 3.5 – Profil de l'âge virtuel en fonction du temps d'opération

Si V_{n-1} est l'âge du système à la $(n-1)^{ème}$ réparation et si la n réparation survient après X_n unités de temps de fonctionnement, alors, l'âge du V_n du système après la nieme réparation est donné par :

$$V_n = V_{n-1} + A_n + A_n X_n \quad (3.15)$$

— $0 \leq A_n \leq 1$

— $A_n = 0$, correspond à la réparation parfaite

— $A_n = 1$, correspon à une réparation minimale à la panne

une extension du modèle précédent a été proposé par [19] Il propose le modèle suivant :

$$V_n = A_n(V_{n-1} + X_n) \quad (3.16)$$

La réduction porte sur l'âge du système à la panne et pas seulement sur X_n .

3.6 Optimisation de la maintenance en utilisant les deux critères : la disponibilité et le coût

3.6.1 Modèles de remplacement optimal de coût et de disponibilité pour les systèmes multi-composants

Le système est soumis à trois actions de maintenance : réparation minimale, révision partielle et révision générale (renouvellement). Le système subit une réparation minimale après chaque défaillance et une révision générale après avoir atteint un certain âge T . Entre deux renouvellements consécutifs, un nombre déterminé de révisions partielles $(n-1)$ est effectué en

divisant le cycle en n périodes avec un intervalle égal à s . Chaque révision partielle améliore le système, tandis que les réparations minimales ramènent le système aux conditions juste avant la défaillance [20] .

Notations

- s : intervalle de révision partielle
- n : nombre des révision partielles
- $\widehat{H}(t) = \int_0^t \widehat{\lambda}(x)d(x)$: Fonction de taux de défaillance cumuler dans un intervalle $[0,t[$ avant de subir la première révision partielle .
- C_c, C_p, C_r : le coût de réparation (corrective , préventive , renouvellement) .
- T_c, T_p, T_r : le Temps de réparation (corrective , préventive , renouvellement) . tell que $T_r > T_p > T_c$
- $A(n,s)$: fonction de la disponibilité
- $C(n,s)$: Coût par de unité de temps lorsque le système subit $n - 1$ révision partielle avec une intervalle s et un renouvellement a n

La fonction de coût

$$C(n, s) = \frac{C_r + C_p(n - 1) + C_c \widehat{H}(n, s)}{n \cdot s} \quad (3.17)$$

La fonction de la disponibilité

$$A(n, s) = A = 1 - \frac{\text{temps d'indisponibilité}}{\text{temps total}} \quad (3.18)$$

$$A = 1 - \frac{T_r + T_p(n - 1) + T_c \widehat{H}(n, s)}{n \cdot s + T_r + T_p(n - 1) + T_c \widehat{H}(n, s)} \quad (3.19)$$

$$A(n, s) = \frac{ns}{n \cdot s + T_r + T_p(n - 1) + T_c \widehat{H}(n, s)} \quad (3.20)$$

3.6.2 Stratégie de maintenance imparfaite utilisant le remplacement périodique de type bloc

Dans cette politique de maintenance, l'unité est soumise à une maintenance imparfaite qui est effectuée à des intervalles prédéterminés de temps kT ($k = 1, 2, 3, \dots$) indépendamment de l'historique de défaillances de l'unité. De plus, lorsque survient une panne, elle est imparfaitement réparée (T est constante) [21] .

La figure 3.6 représent cette politique :

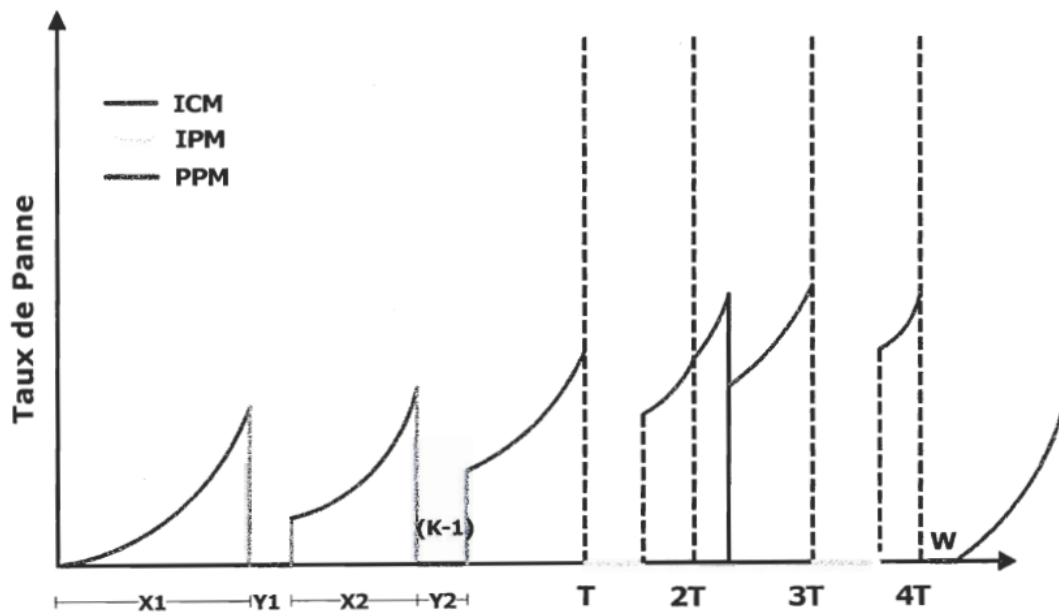


FIGURE 3.6 – Stratégie de maintenance imparfaite utilisant le remplacement périodique de type bloc

Notations

- A : Disponibilité Moyenne.
- c_f : Coût fixe pour effectuer une réparation à la panne.
- C_v : Coût variable par réparation imparfaite
- c_p : Coût de la maintenance préventive.
- c_{fr} : Coût d'une réparation $C_{fr} = C_f + (i - 1)C_v$
- $M(t)$: Fonction de renouvellement d'un processus de quasi-renouvellement.
- α : Facteur de réduction de l'âge du système $0 < \alpha < 1$
- β : Facteur d'augmentation des durées de réparation $\beta > 1$
- μ_1 : Temps de vie utile.
- η_1 : Temps de réparation pour la première panne.
- w : une variable aléatoire qui décrit le temps moyenne pour effectuer la maintenance préventive parfaite
- p : variable aléatoire qui décrit la probabilité que le système se trouve comme neuf après une maintenance imparfaite.(maintenance parfaite)
- $q = 1-p$: variable aléatoire qui décrit la probabilité que le système se trouve comme vieux après une maintenance imparfaite.(maintenance minimal)
- C : Coût de maintenance asymptotique.
- T : Temps de maintenance préventive.
- k : Nombre de réparations imparfaites.

La fonction de coût [21]

$$C(T, k, \alpha, \beta, p) = \frac{(k-1)c_f + \frac{1}{2}(k-1)(k-2)c_v + c_p p^{-1} + p c_{fr} \sum_{i=1}^{\infty} q^{i-1} M(iT)}{\frac{\mu_1(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\eta_1(\beta^{k-1}-1)}{\beta-1} + \frac{T}{p} + w} \quad (3.21)$$

La fonction de la disponibilité [21]

$$A(T, k, \alpha, \beta, p) = \frac{\frac{\mu_1(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{T}{p}}{\frac{\mu_1(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\eta_1(\beta^{k-1}-1)}{\beta-1} + \frac{T}{p} + w} \quad (3.22)$$

3.6.3 Stratégie de maintenance imparfaite utilisant le processus de quasi renouvellement

Dans cette Stratégie , à chaque fois que le système tombe en panne son âge diminue d'une certaine valeur (α) et le temps nécessaire pour effectuer une réparation imparfaite augmente d'une certaine fraction (β). [21]

Notation

- $A(T, k; \alpha, \beta)$: Disponibilité moyenne.
- c_f : Coût fixe pour effectuer une réparation à la panne.
- c_v : Coût variable par réparation imparfaite.
- c_p : Coût associé à une action de maintenance imparfaite.
- c_{fr} Coût d'une réparation. $C_{fr} = C_f + (i-1)C_v$
- $C(T, k, \alpha, \beta)$ = Coût total moyen par unité de temps sur un horizon infini
- $F_i(t)$ Fonction de distribution.
- $s_1(t)$: Fonction de fiabilité, $s_1(t) = 1 - F_1(t)$
- p : Probabilité que la maintenance effectuée soit parfaite. q = Probabilité que la maintenance effectuée soit imparfaite, $p + q = 1$
- μ : Durée de vie moyenne du système.
- η : Durée de réparation moyenne.
- α : Facteur de réduction de l'âge du système $0 < \alpha < 1$
- β : Facteur d'augmentation des durées de réparation $\beta > 1$
- T : Âge fixe dans lequel une unité est soumise à la maintenance préventive $T > 0$.
- k : Nombre de réparations imparfaites avant d'effectuer la remise à neuf du système

La fonction de coût

$$C(T, k, \alpha, \beta) = \frac{(k-1)c_f + \frac{(k-1)(k-2)}{2}c_v + c_p s_1\left(\frac{1}{\alpha^{k-1}T}\right) + c_{fr} F_1\left(\frac{1}{\alpha^{k-1}T}\right)}{\frac{\mu(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\eta(\beta^{k-1}-1)}{\beta-1} + \int_0^T s_1\left(\frac{1}{\alpha^{k-1}x}\right)dx} \quad (3.23)$$

La fonction de la disponibilité

$$A(T, k, \alpha, \beta) = \frac{\frac{\mu(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \int_0^T s_1\left(\frac{1}{\alpha^{k-1}t}\right)dt}{\frac{\mu(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\eta(\beta^{k-1}-1)}{\beta-1} + \int_0^T s_1\left(\frac{1}{\alpha^{k-1}x}\right)dx} \quad (3.24)$$

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre , nous avons pris en considération une variété de lois de fiabilité, de modèles de maintenance, de méthodes de modélisation et de techniques de maintenance. Ces connaissances sont nécessaires pour faire des choix judicieux en matière de maintenance et d'amélioration de la fiabilité et la disponibilité des systèmes.

4

Application de la stratégie de maintenance imparfaite utilisant le processus de quasi renouvellement

4.1 Introduction

Ce chapitre , présente l'application concrète d'une stratégie de maintenance imparfaite utilisant le processus de quasi renouvellement, afin de maximiser la disponibilité des engins dans l'entreprise portuaire de Skikda . Cette approche permet de garantir un niveau de performance optimal malgré l'apparition de défaillances imprévues.

4.2 Description du modèle utilisé

4.2.1 Pourquoi ce modèle ?

La stratégie de maintenance imparfaite basée sur le processus de quasi-renouvellement a un impact significatif sur la maximisation de la disponibilité des engins dans une entreprise portuaire. Cette approche permet de prendre en compte les défaillances imprévues des équipements, en utilisant une modélisation probabiliste des processus de dégradation.

Ainsi, elle permet d'optimiser les intervalles de maintenance et de maximiser la disponibilité des engins.

Par conséquent, la stratégie de maintenance imparfaite basée sur le processus de quasi-renouvellement se positionne comme une solution pertinente pour maximiser la disponibilité des engins dans une entreprise portuaire, en prenant en compte la complexité des aléas liés à leur fonctionnement .

D'autre part le manque de données précises concernant les coûts de maintenance a été un facteur déterminant dans la décision de privilégier l'optimisation de la disponibilité.

4.2.2 Notations

- $A(T, k)$: Disponibilité moyenne .
- $F_1(t)$: Fonction de distribution .
- $R_1(t)$: la fonctions de fiabilité , $R_1(t) = 1 - F_1(t)$.
- μ : Durée de vie moyenne de système .
- η : durée de réparation moyenne .
- α : Facteur de réduction de l'âge du système $0 \leq \alpha < 1$
- β : Facteur d'augmentation des durées de réparation $\beta > 1$
- T : L'âge fixe dans lequel une unité est soumise à la maintenance préventive $T > 0$.
- k : Nombre de réparations imparfaites avant d'effectuer la remise à neuf du système .

4.2.3 Le modèle

Dans ce modèle la stratégie de réparation imparfaite ce décrit de la manière suivant :

On a

X_1 : la durée de vie pour une nouvelle unité

Y_1 : la première réparation imparfaite

αx_1 : Le temps de vie de l'unité après la première réparation imparfaite

βy_1 : temps de réparation imparfaite .

αx : Le temps de vie moyen

βy : Le temps de réparation moyen

le temps de réparation augmente avec l'augmentation de nombre de réparations avec une valeur ($\beta > 1$) cela veut dire que le temps de vie de l'unité diminue de a ($0 < \alpha < 1$) après chacune des réparations imparfaites réalisées.

On suppose qu'à l'instant $t = 0$, on commence l'observations de système . Si après x_1 unités de temps, le système tombe en panne et que le temps pour effectuer une réparation imparfaite est y_1 alors, selon le processus de quasi renouvellement, la prochaine réparation aura lieu après x_2 unités de temps et la durée de réparation sera y_2 . tel que :

$$X_2 = \alpha X_1 \quad \forall \alpha (0 < \alpha < 1) \quad (4.1)$$

$$Y_2 = \beta Y_1 \quad \forall \beta (\beta > 1) \quad (4.2)$$

à La $(k - 1)^{eme}$ réparation en aura :
 $X_{k-1} = \alpha^{k-2} X_1$ tel que :

$$X_2 = \alpha X_1; X_3 = \alpha^2 X_1; X_4 = \alpha^3 X_1; \dots; X_{k-1} = \alpha^{k-2} X_1; X_k = \alpha^{k-1} X_1 \quad (4.3)$$

De même que pour $Y_{k-1} : Y_{k-1} = \beta^{k-2} Y_1$ tel que

$$Y_2 = \beta Y_1; Y_3 = \beta^2 Y_1; Y_4 = \beta^3 Y_1; \dots; Y_{k-1} = \beta^{k-2} Y_1; Y_k = \beta^{k-1} Y_1 \quad (4.4)$$

La figure 4.1 représente le schéma du modèle quasi-renouvellement

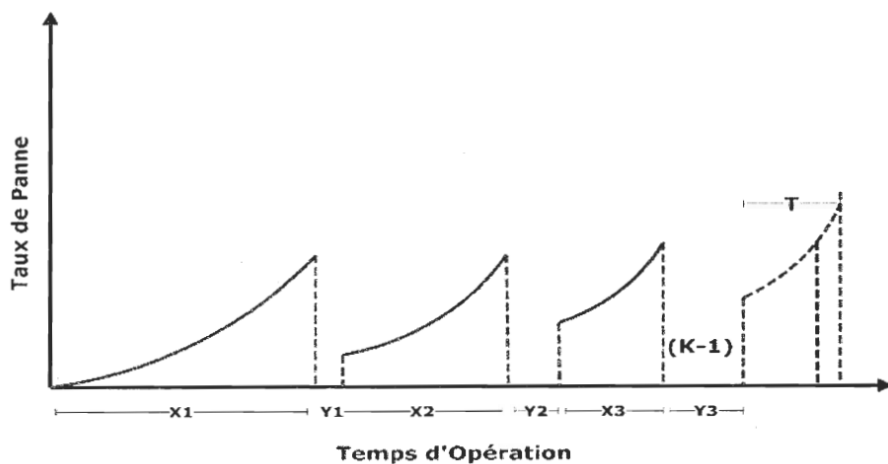


FIGURE 4.1 – Schéma du modèle quasi-renouvellement

Alors, on suppose que la fonction de disponibilité s'écrit comme suit :

$$A(T, k) = \frac{U(T, k)}{D(T, k)} \quad (4.5)$$

Tel que

$$U(T, k) = T_s + Pr \quad (4.6)$$

$$D(T, k) = T_s + T_d + Pr \quad (4.7)$$

$$A(T, k) = \frac{T_s + Pr}{T_s + T_d + Pr} \quad (4.8)$$

1. La fonction $U(T, k)$ est la fonction qui mesure le temps moyen de fonctionnement continu d'un équipement avant la première défaillance après la k-ème réparation.

On a $U(T, k) = T_s + Pr$

T_s :représente le temps moyen entre deux défaillances successives du système , on se basant sur l'équation (4.3) on aura :

$$T_s = \mu + \mu\alpha + \mu\alpha^2 + \dots + \mu\alpha^{k-2} = \frac{\mu(1 - \alpha^{k-1})}{1 - \alpha} \quad (4.9)$$

- $\mu(1 - \alpha^{k-1})$: ce rapport représente la durée de vie moyenne du système avant la première défaillance (c'est-à-dire avant la première réparation).
- Le facteur $1 - \alpha$ dans l'expression $\frac{\mu(1 - \alpha^{k-1})}{1 - \alpha}$ correspond à la probabilité qu'un système ne nécessite pas de réparation avant la première réparation imparfaite.

- Pr :représente la probabilité que le système fonctionne correctement pendant un intervalle de temps $[0, T]$ avant qu'une maintenance préventive ne soit effectuée.

Alors selon [22] et [15] l'expression Pr s'écrit comme suit

$$Pr = \int_0^T \bar{F}_p(t) dt = \int_0^T r_1(\alpha^{1-k}t) dt \quad (4.10)$$

$\bar{F}_p(t)$: La fonctions de survie

alors de l'expression (4.9) et (4.10) on aura :

$$U(T, k) = \frac{\mu(1 - \alpha^{k-1})}{1 - \alpha} + \int_0^T R_1\left(\frac{1}{\alpha^{k-1}}t\right) dt \quad (4.11)$$

2. la fonction $D(T, k)$ est la fonction qui mesure le temps moyen de réparation d'un équipement après la k -ème défaillance.

On a

$$D(T, k) = T_s + T_d + Pr$$

T_d : représente le temps moyen supplémentaire de réparation causé par les réparations imparfaites précédentes on se basant sur l'équation (4.4) on aura

$$T_d = \eta + \eta\beta + \eta\beta^2 + \dots + \eta\beta^{k-2} = \frac{\eta(\beta^{k-1} - 1)}{\beta - 1} \quad (4.12)$$

- Le terme $\eta(\beta^{k-1} - 1)$ dans l'expression $\frac{\eta(\beta^{k-1} - 1)}{\beta - 1}$ représente le temps supplémentaire de réparation dû aux réparations imparfaites précédentes .
- Le terme $\beta - 1$ dans l'expression $\frac{\eta(\beta^{k-1} - 1)}{\beta - 1}$ correspond au facteur d'augmentation de la durée de réparation moyenne due aux réparations imparfaites précédentes.
- L'expression $T_s + T_d$: représentent alors la durée de réparation moyenne de cet équipement .

On utilisant les expressions (4.11) et (4.12) on aura l'expression $D(T, k)$ qui s'écrit comme suit :

$$D(T, k) = \frac{\mu(1 - \alpha^{k-1})}{1 - \alpha} + \frac{\eta(\beta^{k-1} - 1)}{\beta - 1} + \int_0^T R_1\left(\frac{1}{\alpha^{k-1}}x\right)dx \quad (4.13)$$

de l'expression (4.11) et (4.13) on aura la fonctions de la disponibilité s'écrit comme suit .

$$A(T, k) = \frac{\frac{\mu(1 - \alpha^{k-1})}{1 - \alpha} + \int_0^T R_1\left(\frac{1}{\alpha^{k-1}}t\right)dt}{\frac{\mu(1 - \alpha^{k-1})}{1 - \alpha} + \frac{\eta(\beta^{k-1} - 1)}{\beta - 1} + \int_0^T R_1\left(\frac{1}{\alpha^{k-1}}x\right)dx} \quad (4.14)$$

4.2.4 Les données

CE222				
TBF(h)	Immobilisation(h)	TTR(h)	Cumulé des TBF	Cumulé des TTR
288	30	27	288	27
12	30	27	300	54
72	11	9	372	63
36	38	33	408	96
36	6	5	444	101
180	3	2	624	103
528	2	1	1152	104
144	4	2	1296	106
312	5	4	1608	110
192	16	14	1800	124
156	16	14	1956	138
36	24	21	1992	159
12	48	42	2004	201
12	37	32	2016	233
72	18	16	2088	249
12	54	48	2100	297
12	54	48	2112	345
12	54	48	2124	393
336	2	1	2460	394
144	25	21	2604	415

TABLE 4.1 – Les données des pannes de l’engin CE222

CHAPITRE 4. APPLICATION DE LA STRATÉGIE DE MAINTENANCE IMPARFAITE UTILISANT LE PROCESSUS DE QUASI RENOUVELLEMENT

CE223				
TBF(h)	Immobilisation(h)	TTR(h)	Cumule TBF	Cumule TTR
36	3	2	36	6
312	5	4	348	10
60	11	9	408	19
288	2	1	696	20
72	18	15	768	35
432	3	2	1200	37
312	16	14	1512	51
48	17	14	1560	65
348	34	29	1908	94
48	6	5	1956	99
216	40	35	2172	134
12	32	28	2184	162
48	3	2	2232	164
24	18	16	2256	180
12	45	40	2268	220
36	45	40	2304	260
48	3	2	2352	262
60	2	1	2412	263
132	4	2	2544	265

TABLE 4.2 – Les données des pannes de l’engin CE223

CE232				
TBF(h)	Immobilisation(h)	TTR(h)	Cumule TBF	cumule TTR
36	7	6	36	6
12	9	8	48	14
12	15	13	60	27
108	6	5	168	32
12	12	10	180	42
348	13	11	528	53
60	20	17	588	70
324	3	2	912	72
228	32	28	1140	100
24	50	45	1164	145
144	60	54	1308	199
12	40	36	1320	235
12	54	48	1332	283
12	54	48	1344	331
12	54	48	1356	379
408	54	48	1764	427
24	18	16	1788	443
12	66	58	1800	501
36	24	21	1836	522
36	4	2	1872	524

TABLE 4.3 – Les données des pannes de l’engin CE232

4.3 Calcul de quelques indicateurs de performance

1. MTBF

$$MTBF = \frac{g}{\theta} \Gamma\left(1 + \left(\frac{1}{\theta}\right)\right) \quad (4.15)$$

2. MTTR

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n TTR_i}{n} \quad (4.16)$$

— TTR_i : Les durées des TTR

— n : Le nombre de pannes

3. La disponibilité opérationnelle (D_{opr})

$$D_{opr} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MTL} \quad (4.17)$$

Le tableau 4.4 suivant montre les résultats de calcul de ces indicateurs

engins indicateur	CE222	CE223	CE232
MTBF	130.2945	140.8606	118.9023
MTTR	21	14	26
D_{opr}	0.8555	0.9038	0.8149

TABLE 4.4 – Les indicateurs de performance des engins

4.4 Résultats et discussion

4.4.1 Détermination des paramètres du modèle

1. Le paramètre η , est déterminés à partir de l'historique des données de réparation .
2. Les paramètres g et θ sont les paramètres de la loi de Weibull. Ils ont été déterminés à partir du logiciel MATLAB en appliquant la fonction "wblfit" sur les temps entre les pannes (TBF) des engins étudiés.
3. μ : Pour calculer la durée de vie moyenne du système, nous utilisons la formule suivante :

$$\mu = g\Gamma\left(\frac{1}{\theta} + 1\right) \quad (4.18)$$

La fonction Gamma est égale à $\Gamma(t) = \int_0^\infty Y^{t-1} e^{-Y} dY$

Ce tableau 4.4.1 représente les valeurs des paramètres des engins à étudier.

engins paramètres	α	β	η	μ	g	θ
CE222	0.95	1.05	21	182.1805	200.1432	1.4117
CE223	0.95	1.05	14	142.8415	143.66	1.014
CE232	0.95	1.05	26	91.4002	78.2978	0.7687

TABLE 4.5 – Les valeurs des paramètres des engins

4.4.2 Validation des paramètre de la loi de weibull

Le test de validation de Kolmogorov-Smirnov est utilisé pour vérifier la validité des paramètre de la loi de weibull. Les résultats sont représenter dans le tableau (4.6)

Dans le tableau (4.6), $Statistique_D$ fait référence à la statistique D du test de Kolmogorov-Smirnov calculée pour chaque échantillon .Cette statistique mesure la plus grande différence entre la fonction de répartition empirique des données observées et la fonction de répartition théorique de la loi de Weibull. Plus la valeur de la statistique D est élevée, plus les données observées s'écartent de la distribution théorique.

Et la valeur " P_{valeur} " fait référence à la valeur critique du test de Kolmogorov-Smirnov calculée pour chaque échantillon . Cette valeur est déterminée en fonction du niveau de signification ν choisi (dans ce cas, $\nu = 0.05$) et de la taille de l'échantillon. Elle représente le seuil à partir duquel on valide les paramètres (les données suivent la loi de Weibull) .

Dans Le tableau :

- Si la valeur de la *statistique_D* est supérieure à P_{valeur} , on accepte pas les valeurs de la loi de weibull ça veut dire que la décision sera "Rejeté" ce qui signifie que les données ne suivent pas la loi de Weibull.
- Sinon la décision sera "Accepté" ce qui signifie que les données suivent la loi de Weibull

engins \ paramètres	g	θ	<i>Statistique_D</i>	P_{valeur}	Décision
CE222	200.1432	1.4117	0.28914	0.31157	Accepté
CE223	143.66	1.014	0.23993	0.31157	Accepté
CE232	78.2978	0.7687	0.2246	0.30368	Accepté

TABLE 4.6 – Les résultats du test de Kolmogorov Smirnov

4.4.3 Variation de la disponibilité

En utilisant le logiciel "MATLAB" pour programmer la fonction de disponibilité et en utilisant la fonction "fminserch" pour l'optimiser, nous avons pu obtenir les résultats suivants pour chaque engin.

Engin CE222

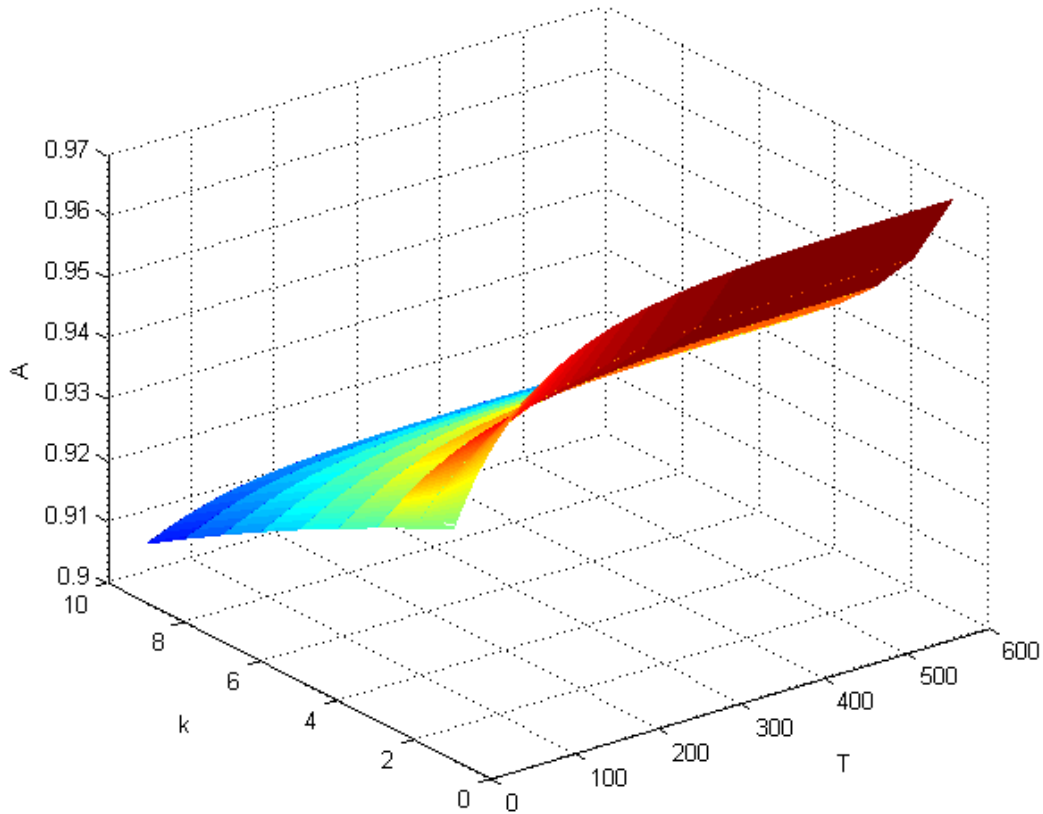


FIGURE 4.2 – La disponibilité pour l’engin CE222

les valeurs optimales

A_0 : La valeur de la disponibilité opérationnelle

$$A^* = 0.9454 > A_0 = 0.8555$$

$$T^* = 3559.4(\text{heurs})$$

$$k^* = 2.000$$

Engin CE223

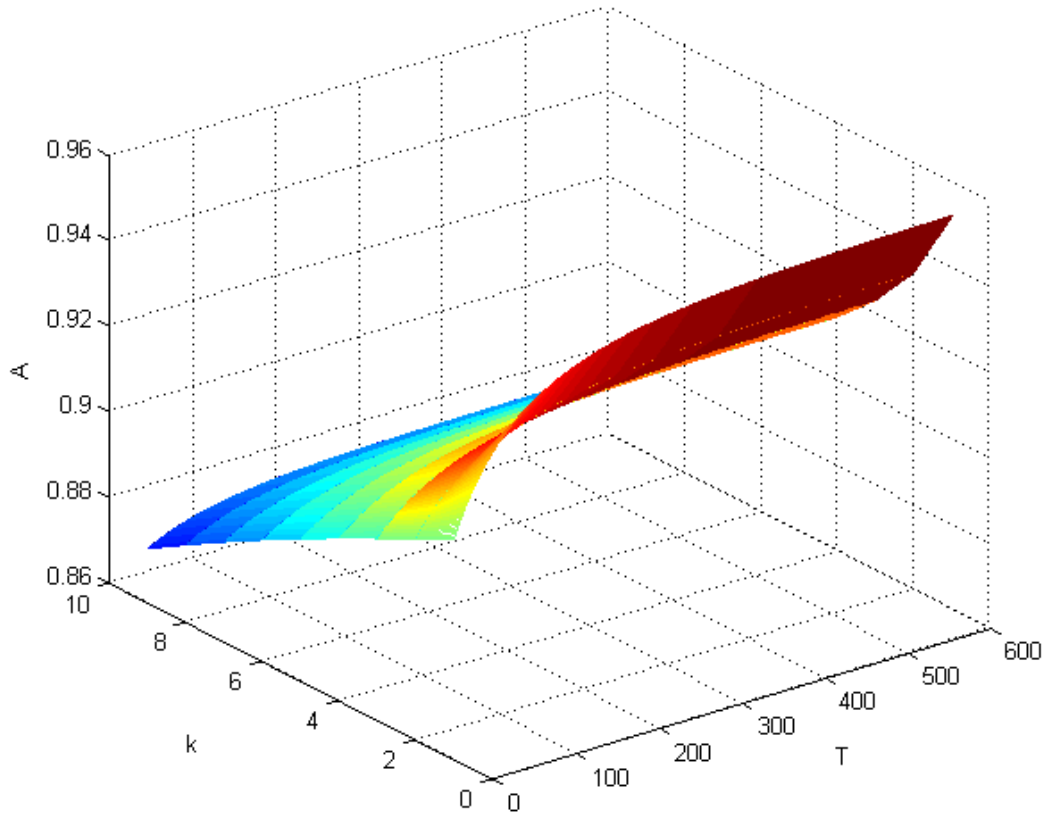


FIGURE 4.3 – La disponibilité pour l’engin CE223

les valeurs optimales

A_0 : La valeur de la disponibilité opérationnelle

$$A^* = 0.9521 > A_0 = 0,9038$$

$$T^* = 3789.8(\text{heurs})$$

$$k^* = 2.000$$

Engin CE232

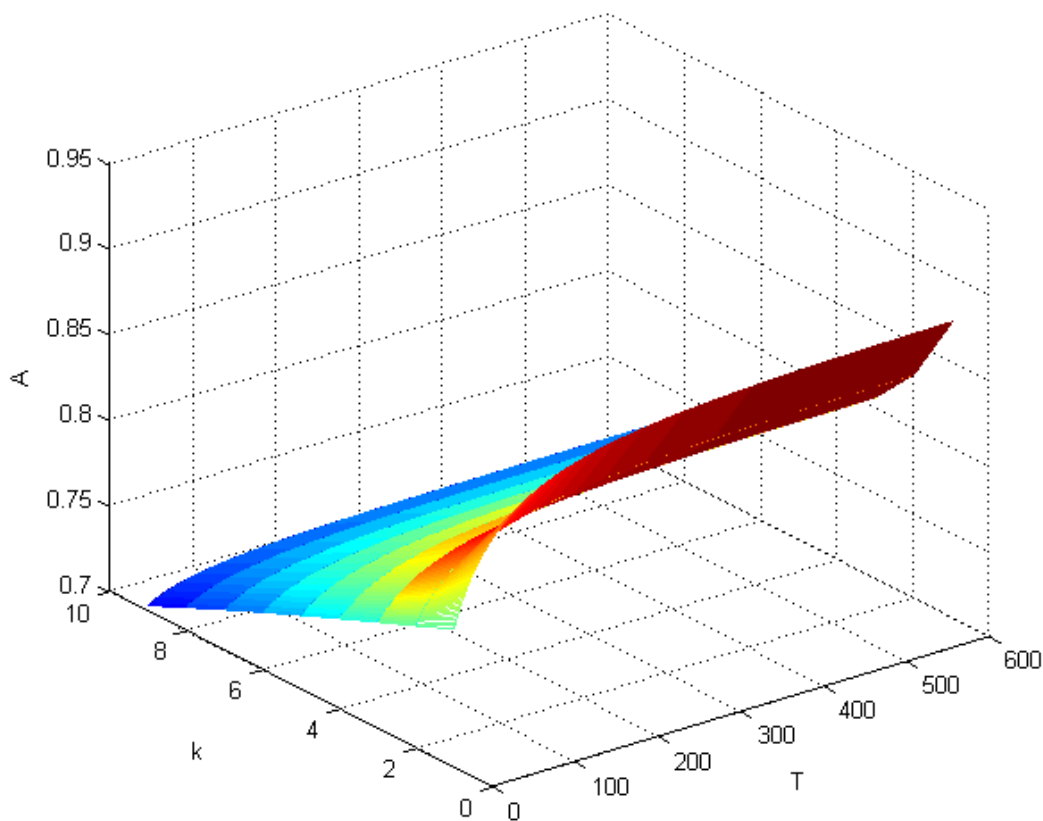


FIGURE 4.4 – La disponibilité pour l’engin CE232

les valeurs optimales

A_0 : La valeur de la disponibilité opérationnelle

$$A^* = 0.8727 > A_0 = 0,8149$$

$$T^* = 6116.0(\text{heurs})$$

$$k^* = 2.000$$

4.4.4 Discussion des résultats

En examinant de manière approfondie les courbes de disponibilité des trois engins étudiés, nous pouvons constater une similitude notable entre eux (figures 4.2 , 4.3 et 4.4). Ces similitudes montrent une tendance générale à la diminution de la disponibilité lorsque le nombre de réparations imparfaites effectuées dans un intervalle de temps précédant une maintenance préventive augmente tout en réduisant la durée de cette période.

De plus, il est important de souligner que l'impact de la diminution de la disponibilité due à l'augmentation du nombre de réparations imparfaites dans l'intervalle de temps précédant la maintenance préventive est plus significatif que celui de la diminution de la durée pendant laquelle l'équipement bénéficie de cette maintenance préventive tout en maintenant un nombre fixe de réparations imparfaites.

Ces résultats soulignent l'importance cruciale de tenir compte du nombre de réparations imparfaites et de la durée de l'intervalle de maintenance préventive dans la gestion de la disponibilité des engins. Avec cette méthode, vous pouvez créer les meilleures stratégies de maintenance pour assurer des performances optimales des équipements.

En résumé, ces résultats soulignent la nécessité d'adopter une approche de gestion de la maintenance qui prenant en compte les interactions complexes entre le nombre de réparations imparfaites, la durée de l'intervalle de maintenance préventive et la disponibilité globale des engins. En adoptant cette approche, il sera possible d'améliorer l'utilisation des ressources et de garantir une disponibilité maximale des équipements.

4.5 Étude de sensibilité

Pour évaluer l'impact des variables α (facteur de réduction de l'âge du système), β (facteur d'augmentation des durées de réparation) et k (nombre de réparations imparfaites) sur les optima trouvés T^* et A^* , nous procéderons à une étude de sensibilité à se sujet .

Dans les tableaux suivants, nous avons présenté les variations de la disponibilité et du temps optimal T en fonction des facteurs α et β , ainsi que du nombre de réparations imparfaites K.

Engin CE222

k	α	T_{opt}	A_{max}
2	0.2	134.8201	0.9474
	0.4	250.7629	0.9545
	0.6	353.1622	0.9599
	0.8	496.5000	0.9642
	0.9	545.7490	0.9660
5	0.2	1.9900	0.8131
	0.4	18.8850	0.8517
	0.6	91.2833	0.8892
	0.8	260.986	0.9212
	0.9	396.1107	0.9344
8	0.2	1.9900	0.6973
	0.4	1.9900	0.7542
	0.6	19.8538	0.8191
	0.8	130.2835	0.8846
	0.9	299.5278	0.9130

k	β	T_{opt}	A_{max}
2	1.1	569.5566	0.9669
	1.3	569.5566	0.9669
	1.6	569.5566	0.9669
	1.8	569.5566	0.9669
	2.0	569.5566	0.9669
5	1.1	483.7742	0.9360
	1.3	486.0576	0.9164
	1.6	493.9124	0.8799
	1.8	549.1198	0.8511
	2.0	502.5927	0.8189
8	1.1	422.2789	0.9141
	1.3	434.3975	0.8517
	1.6	442.9647	0.7010
	1.8	445.3906	0.5729
	2.0	446.6446	0.4429

TABLE 4.7 – La variation de la disponibilité et de T en fonction de α , β et k pour l'engin CE222.

Engin CE223

k	α	T_{opt}	A_{max}
2	0.2	177.4353	0.9241
	0.4	321.4904	0.9342
	0.6	500.7955	0.9420
	0.8	599.7587	0.9480
	0.9	599.7891	0.9506
5	0.2	1.9900	0.7462
	0.4	24.6340	0.7952
	0.6	120.7844	0.8444
	0.8	331.2774	0.8878
	0.9	503.1575	0.9060
8	0.2	1.9900	0.6089
	0.4	1.9900	0.6748
	0.6	26.7567	0.7538
	0.8	160.5887	0.8383
	0.9	333.5252	0.8764

k	β	T_{opt}	A_{max}
2	1.1	599.8367	0.9517
	1.3	599.8367	0.9517
	1.6	599.8367	0.9517
	1.8	599.8367	0.9517
	2.0	599.8367	0.9517
5	1.1	598.9089	0.9081
	1.3	599.6758	0.8812
	1.6	599.7626	0.8321
	1.8	599.7880	0.7944
	2.0	599.7101	0.7536
8	1.1	517.8364	0.8780
	1.3	544.0400	0.7952
	1.6	566.0670	0.6132
	1.8	570.1074	0.4756
	2.0	565.7361	0.3497

TABLE 4.8 – La variation de la disponibilité et de T en fonction de α , β et k pour l'engin CE223.

Engin CE232

k	α	T_{opt}	A_{max}
2	0.2	195.0645	0.8083
	0.4	398.6028	0.8311
	0.6	599.7447	0.8490
	0.8	599.8311	0.8632
	0.9	599.8886	0.8692
5	0.2	1.9900	0.5048
	0.4	29.1253	0.5736
	0.6	131.9086	0.6528
	0.8	398.4068	0.7327
	0.9	586.3415	0.7695
8	0.2	1.9900	0.3505
	0.4	1.9900	0.4183
	0.6	27.9276	0.5149
	0.8	191.2103	0.6424
	0.9	380.2809	0.7108

k	β	T_{opt}	A_{max}
2	1.1	599.9989	0.8720
	1.3	599.9989	0.8720
	1.6	599.9989	0.8720
	1.8	599.9989	0.8720
	2.0	599.9989	0.8720
5	1.1	599.7817	0.7739
	1.3	599.8113	0.7197
	1.6	599.9987	0.6318
	1.8	599.9988	0.5723
	2.0	599.9989	0.5143
8	1.1	522.3240	0.7137
	1.3	533.7738	0.5736
	1.6	533.4689	0.3544
	1.8	524.4106	0.2390
	2.0	515.0022	0.1570

TABLE 4.9 – La variation de la disponibilité et de T en fonction de α , β et k pour l’engin CE232.

Interprétation des résultats

L’analyse des résultats obtenus permet de tirer plusieurs interprétations concernant l’optimisation de la disponibilité des engins au sein de l’entreprise portuaire de Skikda .

1. Impact de la variable α (Facteur de réduction de l’âge du système) :
 - On remarque pour l’engin CE222, CE223 et CE232, que l’augmentation de α conduit à une augmentation de temps de maintenance préventive optimale (T_{opt}) et de la disponibilité maximale (A_{max}). Cela indique qu’augmenter l’âge du système a un impact positif sur la disponibilité des engins . Le facteur α dans le modèle de maintenance imparfaite quasi-renouvellement représente le facteur de réduction de l’âge du système (l’engin dans notre cas). Ainsi, une augmentation de ce facteur implique une diminution de la dégradation de la durée de vie moyenne de l’engin Cela signifie une dégradation minimale .
2. Impact de la variable β (Facteur d’augmentation des durées de réparation) :
 - Pour les trois engins (CE222, CE223, CE232), on constate que l’augmentation de β n’a pas d’impact significatif sur les valeurs optimales de disponibilité (T_{opt}) et de disponibilité maximale (A_{max}). Cela suggère que l’augmentation des durées de réparation n’a pas d’effet notable sur la disponibilité des engins dans ce contexte.
3. Variations des valeurs optimales avec k :
 - Pour les engins CE222, CE223 et CE232, on observe que l’augmentation de k conduit à une diminution de la disponibilité maximale. Cela signifie qu’un nombre plus élevé de réparations imparfaites entraîne une mauvaise disponibilité globale.

Les résultats indiquent que la variable α avec K a un impact significatif sur les valeurs optimales de T^* et A^* . Une diminution de α et une augmentation de K entraînent une diminution de A^* et T^* , ce qui signifie que des niveaux plus bas de réparations(en terme de qualité de réparation) et des nombres plus élevés des réparations imparfaites peuvent conduire à une mauvaise disponibilité.

Pour cela, comme recommandation pour assurer une bonne qualité de réparation et diminuer autant que possible la dégradation de la durée de vie des engins :

- il faut Utiliser des pièces de rechange de qualité qui sont spécifiquement conçues pour les engins en réparation. Les pièces d'origine garantissent une compatibilité et une fiabilité optimales.
- il faut Tener des registres détaillés de toutes les réparations effectuées, y compris les problèmes identifiés, les actions prises, les pièces de rechange utilisées et les tests de contrôle de qualité effectués. Cela permet de suivre l'historique des réparations, de faciliter le suivi et de fournir une référence pour les futurs travaux de maintenance .
- il faut que les techniciens disposent des outils, des équipements et des ressources appropriés pour effectuer les réparations de manière efficace et de qualité. Les outils de diagnostic, les instruments de mesure précis contribuent à des réparations fiables.

D'autre part, le paramètre β a un impact minimal sur les valeurs optimales de T^* et A^* pour un nombre de réparations imparfaites égal à 2 ou 5, mais pour un nombre de réparations égal à 8, la diminution de la disponibilité est significative car pour un grand nombre de réparations, le facteur β aura un impact plus marquant sur la disponibilité , car Le facteur β a une relation directe avec le nombre de réparations et leur durée. Cela signifie qu'une augmentation de la durée de réparation pour un petit nombre de réparations dans un intervalle assez large ne sera pas significative. Cependant, à mesure que le nombre de réparations augmente et que leur durée augmente dans le même intervalle, l'impact de β devient plus marqué (comme cela a été observé lorsque le nombre de réparations était égal à 8).

Pour cela, comme recommandation pour diminuer autant que possible l'augmentation des durées de réparation pour les engins :

- il faut avoir un inventaire adéquat de pièces de rechange couramment utilisées. Cela permet de réduire les délais d'attente pour obtenir les pièces nécessaires à la réparation, minimisant ainsi les temps d'arrêt
- l'utilisation de technologies avancées telle que l'IoT (Internet des objets) pour faciliter les diagnostics et les réparations , pour accélérer le processus de réparation en fournissant des informations en temps réel et des solutions basées sur des données .
- il faut Établir une planification détaillée des tâches de réparation en tenant compte des ressources nécessaires, des étapes de travail et des délais. Une planification adéquate permet d'optimiser l'utilisation du temps et de minimiser les interruptions.

4.6 Conclusion

Dans ce quatrième chapitre, nous avons présenté un modèle de maintenance imparfaite utilisant le processus de quasi-renouvellement. Cette stratégie suggère d'effectuer un nombre k de réparations imparfaites dans un intervalle de temps T . Le but de ce modèle est de décrire l'état du système lorsqu'il subit un certain nombre d'actions de réparations imparfaites dans un intervalle de temps défini.

Dans l'application numérique utilisant "MATLAB", nous avons programmé les différentes fonctions dans le but de maximiser la disponibilité en fonction de k (nombre de réparations imparfaites effectuées dans un intervalle de temps) et T (l'âge auquel l'engin subit une maintenance préventive).

Les résultats montrent que ce modèle permet de maximiser la disponibilité et fournit les valeurs optimales de T et k pour atteindre ce maximum.

Conclusion générale

Le but de cette étude était d'optimiser la disponibilité des engins au sein de l'entreprise portuaire de Skikda en appliquant le modèle de maintenance imparfaite basé sur le processus de quasi-renouvellement.

Les représentations graphiques de disponibilité des engins étudiés ont montré des similitudes notables. Nous avons découvert que l'augmentation du nombre de réparations imparfaites effectuées avant la maintenance préventive réduit la disponibilité et la durée de la maintenance préventive.

Il est important de noter que l'impact des réparations imparfaites sur la disponibilité des engins est plus important que celui de la durée de la maintenance préventive.

L'augmentation du nombre de réparations a un impact négatif sur la disponibilité des engins. À mesure que le nombre de réparations augmente, les temps d'arrêt non planifiés se multiplient, ce qui réduit la disponibilité opérationnelle de l'équipement. Les réparations fréquentes peuvent entraîner une augmentation des interruptions de production, une diminution du temps de fonctionnement et une augmentation des coûts de maintenance.

En optimisant ces variables, il est possible d'améliorer la disponibilité des engins et de garantir des performances optimales.

Comme perspectives, nous constatons que :

- Pour rendre notre étude plus fiable, il est préférable d'élargir l'échantillon d'étude.
- Il est important de mettre en évidence une gestion efficace des stocks de pièces de rechange pour minimiser les temps d'arrêt des engins. Il convient d'analyser la demande, d'identifier les pièces les plus utilisées ou critiques, et de maintenir des niveaux de stock adéquats pour répondre aux besoins de maintenance de manière rapide et efficace.

Bibliographie

- [1] M. Boutinzar and M. Azegagh, “Mémoire de master . disponibilité et maintenabilité du réseau anti-incendie du parc de stockage rtc sonatrach béjaia,” 2018.
- [2] R. Hammou and S. Chahboune, “Mémoire de master . etude de la fiabilité et de la disponibilité des équipements au niveau de l’entreprise mac-soum,” 2016.
- [3] N. Oukaour and F. Bouhamou, “Mémoire d’ingénieur . analyse du retour d’expérience pour la planification de la maintenance du parc des chariots élévateurs au port de béjaïa,” Septembre 1998.
- [4] AFNOR, “Terminologie relative à la fiabilité - maintenabilité - disponibilité , xnf 60-500,” 1988.
- [5] Bendjoudi C and Benkerrou L, “Mémoire de master . analyse de fiabilité pour l’optimisation de la maintenance préventive : Application aux équipements de manutention de **BMT**,” 2013.
- [6] Y. Mortureux, “La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques,” 2001.
- [7] F. Monchy, La fonction maintenance : Formation à la gestion de la maintenance industrielle. Masson, 1987.
- [8] M. A. Bouchouicha and S. Sekhri, “Diagnostic et analyse de la fonction maintenance au sein de la nouvelle conserverie algérienne,” 2001.
- [9] M. Guemana, A. Hafaifa, and M. Ben Rahmoune, “Reliability study of gas turbines for improving their availability by ensuring optimal exploitation,” OIL GAS-EUROPEAN MAGAZINE, vol. 41, no. 2, pp. 88–91, 2015.
- [10] Society of Automotive Engineers, Incorporated, Reliability and Maintainability Guideline for Manufacturing Machinery and Equipment. 2nd ed., 1999.
- [11] “Laggoune.r, cour master 1 maintenance industrielle : Fiabilité des systèmes .université de bejaia,” 2019/2020.
- [12] A. M, Optimisation de la Maintenance Préventive des Systèmes de Productions Incorporant la Dépendance par les Métaheuristiques. PhD thesis, 2015.
- [13] M. Benabdelhak, R. Yekken, and A. Sahali, “Mémoire de master . optimisation multi-objectifs des paramètres de soudage par friction et malaxage fsw.,” 2018.
- [14] M. Brown and F. Proschan, “Imperfect repair,” Journal of Applied probability, vol. 20, no. 4, pp. 851–859, 1983.
- [15] H. W. Block, W. S. Borges, and T. H. Savits, “Age-dependent minimal repair,” Journal of applied probability, vol. 22, no. 2, pp. 370–385, 1985.
- [16] H. Wang and H. Pham, “Availability and optimal maintenance of series system subject to imperfect repair,” IE Working Paper, pp. 96–101, 1996.

- [17] T. Nakagawa, “Optimum policies when preventive maintenance is imperfect,” IEEE Transactions on Reliability, vol. 28, no. 4, pp. 331–332, 1979.
- [18] M. Kijima, H. Morimura, and Y. Suzuki, “Periodical replacement problem without assuming minimal repair,” European Journal of Operational Research, vol. 37, no. 2, pp. 194–203, 1988.
- [19] M. Kijima, H. Morimura, and Y. Suzuki, “Some results for repairable system with general repair,” Journal of Applied Probability, vol. 26, pp. 89–102, 1989.
- [20] H. C. Oteyaka, Optimal cost and availability replacement models for multi-component systems. PhD thesis, Université Laval, 2008.
- [21] M. Arturo, Optimisation de la disponibilité des systèmes assujettis à la maintenance imparfaite. PhD thesis, Université Laval, 2008.
- [22] T. Nakagawa, Maintenance theory of reliability. Springer Science & Business Media, 2005.

Résumé

La disponibilité des engins constitue un facteur essentiel dans le bon fonctionnement et la productivité d'une entreprise portuaire. Assurer une disponibilité optimale des engins permet d'optimiser les opérations portuaires et de répondre aux besoins de manière efficace et efficiente.

Ce mémoire a pour objectif d'optimiser la disponibilité des engins au sein de l'entreprise portuaire de Skikda. À l'aide d'une stratégie de maintenance imparfaite basée sur le processus de quasi-renouvellement. Dans un premier lieu, le logiciel "MATLAB" a été utilisé pour programmer la fonction de disponibilité. À l'aide de la fonction "fmincon", les valeurs optimales de T et K de notre fonction ont été déterminées. Dans un deuxième lieu, une étude de sensibilité a été réalisée afin d'évaluer l'impact des variations des paramètres sur les résultats obtenus.

Des applications numériques ont été réalisées pour illustrer le comportement de la politique appliquée envers les différents paramètres de l'étude.

Mots clés : disponibilité , maintenance , réparation imparfaite , quasi- renouvellement , optimisation .

Abstract

The availability of equipment is a crucial factor in the smooth operation and productivity of a port company. Ensuring optimal equipment availability allows for the optimization of port operations and effective response to needs.

This thesis aims to optimize the availability of equipment within the Skikda port company, using a strategy of imperfect maintenance based on the quasi-renewal process.

In the first phase, the software "MATLAB" was used to program the availability function. Using the "fmincon" function, the optimal values of T and K for our function were determined. In the second phase, a sensitivity study was conducted to assess the impact of parameter variations on the obtained results.

Numerical applications have been conducted to illustrate the behavior of the policy implemented towards the various parameters of the study.

Keywords : availability, maintenance, imperfect repairs , optimization , quasi-renewal process