

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira de Béjaïa  
Faculté des Sciences Exactes  
Département de Recherche Opérationnelle

# MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

Sous le thème

**Maintenance Préventive périodique  
avec réparation minimale  
Application aux équipements de  
manutention de BMT**

Réalisé par :

M<sup>lle</sup>. BENKERROU LYNDA  
M<sup>lle</sup>. BENDJOUDI CHERIFA

Rapporteurs :

M<sup>r</sup> AISSANI.D  
M<sup>r</sup> LAGGOUNE.R

### *La liste des abréviations*

- BMT*** : ***B***ejaia ***M***editerranean ***T***erminal.  
***EPB*** : ***E***ntreprise ***P***ortuaire de ***B***éjaia.  
***TC*** : ***C***onteneur.  
***EVP*** : ***E***quivalent ***V***ingt ***P***ieds (TC 20 pieds).  
***QC*** : ***Q***uai ***C***rane (Portique de quai).  
***RTG*** : ***R***ubber ***T***ier ***G***untery (Portique sur pneus).  
***SNTF*** : ***S***ociété ***N***ationnale du ***T***ransport ***F***erroviaire.



**Louange A Dieu, le miséricordieux, sans Lui rien de tout cela  
n'aurait pu être.**

*Nous* tenons d'abord à remercier nos encadreurs, le professeur **D.AISSANI** et le doctor **R.LAGGOUNE** qui nous ont encadré avec patience durant la réalisation de ce travail, leurs conseils nous ont été bien utiles, pour la rédaction de ce travail.

*Nous* remercions vivement les membres de jury : Mr **M. BOUAIEM** pour l'honneur qu'il nous à fait en en acceptant de présider le jury et Mme **H.BOUSSOUIRA** et Mr **E.AIT MOKHTAR** pour avoir accepter d'examiner notre travail.

*Un* un vif remerciement à Mr **S.DJOUDER** et Mr **E.AIT MOKHTAR** pour leurs aides et leurs disponibilités.

*Nous* tenons une place particulière aux personnels de la BMT, en particulier Mme **S.MADI** qui nous a été d'une grande aide, le personnel de la Détrition des Opérations pour leur aide et leur orientation.

*Un* grand merci pour tous les membres de nos familles pour leurs soutiens et leurs encouragements, particulièrement **nos parents**.



***Je dédica ce modeste travail à :***

*Mon père, le professeur de toujours,*

*Ma très chère mère, ma sœur de tous mon courage,*

*Mon chère frère Hamza et sa femme Ouiam et sa fille Fati ,*

*Mon Adorable frère Ziad,*

*A Ma très chère sœur Kahina et son épouse Noureddine et son fils Radouen,*

*Ma très chère sœur Koussaila et son épouse Abd alghani et son fils Sif edin,*

*Ma très chère grand-mère,*

*A mes proches et toute ma famille,*

*A mes amis et tous les gens qui m'aiment,*

*A tous ceux qui sont proches de mon coeur,*

*A ma chère binôme Lynda et sa famille.*

**CHERIFA**



***Je dédica ce modeste travail à :***

*Rien n'est aussi bien à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.*

*A ceux qui m'ont accompagné durant les moments les plus rudes de ce long parcours de mon éducation.*

*A mes très chers parents (**Allaoua et Nadira**)*

*A mes frères farid, loucif, Aissa et jugurtha. Mes chères soeurs Fatiha et Kahina qui m'ont soutenu*

*A ma grande famille, mes oncles et leur famille, mes tantes et leurs familles*

*A la mémoire de **Ami Smail** et de mon grand père **Boubkeur** surtout mes chères cousins et cousines*

*A mes meilleurs et précieux amis(es) qui m'ont accordé leurs amitiés :*

*Nabila, Mebrouk, Hakim, Melkhir, Lila, Samia, ...*

*A tous ceux qui m'on aider de prés ou de loin et à tous ceux qui m'aiment*

*A ma chère binôme Cherifa et sa famille.*

**LYNDA**

# Table des matières

Liste des abréviations	i
Table des Matières	i
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Introduction générale	1
<b>1 Présentation de <i>BMT</i> (Bejaia Mediteranean Terminal)</b>	<b>4</b>
1.1 Objectif du partenariat	5
1.2 Position géographique privilégiée	5
1.3 Activités et personnel	5
1.3.1 Opérations au niveau du terminal	6
1.3.2 Maintenance et équipements	6
1.3.3 Centre de formation	6
1.3.4 Autres fonctions administratives	7
1.4 La structure de l'entreprise	7
1.4.1 Direction Générale	7
1.4.2 Direction des ressources humaines (DRH)	7
1.4.3 Direction des opérations (DO) :	7
1.4.4 Direction Marketing (DM) :	10
1.4.5 Direction des Finances et de Comptabilité (DFC)	11
1.4.6 Direction Technique (DT)	11
1.5 Description de la direction technique	12
1.5.1 Les équipements de BMT	12
1.5.2 Rôle des différents Services de direction technique	15

1.6	Description du parc à conteneurs . . . . .	16
1.6.1	Le Terminal à conteneurs de BMT . . . . .	16
1.6.2	La capacité . . . . .	17
1.7	Les Outils de gestion du Terminal . . . . .	17
1.7.1	Le CTMS (Container Terminal Management System) . . . . .	18
1.7.2	Le PDS (Position Determining System) . . . . .	19
1.7.3	Le RDS (Radio Data System) . . . . .	19
1.7.4	Le OCR (Optical Character Recognition) . . . . .	20
1.8	Les procédures de BMT . . . . .	21
1.8.1	A l'Import . . . . .	21
1.8.2	A l'Export . . . . .	23
1.9	Objectifs de BMT . . . . .	24
1.10	Les atouts de l'entreprise . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Généralités sur la fiabilité et traitement statistique des données de fiabilité</b>	<b>26</b>
2.1	Généralités sur la sûreté de fonctionnement . . . . .	26
2.1.1	Concepts de base de la sûreté de fonctionnement (FMDS) . . . . .	27
2.2	Notions théoriques de fiabilité . . . . .	28
2.2.1	La fiabilité . . . . .	28
2.2.2	La panne "La défaillance" . . . . .	29
2.2.3	Matériel réparable . . . . .	29
2.2.4	Matériel irréparable . . . . .	30
2.2.5	Indices de fiabilité . . . . .	30
2.2.6	Spécificité de la fiabilité en mécanique . . . . .	32
2.2.7	Fiabilité des systèmes . . . . .	35
2.2.8	Disponibilité . . . . .	36
2.3	Les données de retour d'expérience . . . . .	37
2.3.1	Données complètes . . . . .	37
2.3.2	Données censurées . . . . .	37
2.4	Modèles paramétriques de fiabilité . . . . .	38
2.4.1	Choix du modèle . . . . .	39
2.4.2	Estimation des paramètres des lois . . . . .	43
2.4.3	Validation des modèles : Tests d'ajustement . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Principaux modèles de la maintenance préventive</b>	<b>46</b>
3.1	Processus de renouvellement . . . . .	46
3.1.1	Nombre de renouvellement . . . . .	47

3.1.2	Fonction de renouvellement . . . . .	48
3.2	Maintenance et optimisation . . . . .	48
3.2.1	Objectif de la maintenance . . . . .	48
3.2.2	Les différentes formes de la maintenance . . . . .	48
3.2.3	Détermination des coûts . . . . .	50
3.3	Principaux modèles de la maintenance préventive . . . . .	50
3.3.1	Remplacement Périodique (de Bloc) - Critère de Coût . . . . .	50
3.3.2	Remplacement périodique : Critère de disponibilité . . . . .	51
3.3.3	Réparation Périodique de Groupe - Critère de base temps de bon fonc- tionnement . . . . .	52
3.3.4	Maintenance Préventive périodique avec réparation minimale . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Analyse de la fiabilité des équipements de manutention de BMT</b>	<b>56</b>
4.1	Les données de retour d'expérience au sein du service maintenance . . . . .	56
4.2	Modélisation paramétrique des lois de fiabilité des sous-systèmes . . . . .	57
4.2.1	Spécifications sous-systèmes . . . . .	59
4.2.2	Modélisation des lois de fiabilité des sous-systèmes . . . . .	61
4.2.3	Interprétation des résultats . . . . .	68
4.3	Modélisation de la fiabilité des engins . . . . .	68
4.3.1	Interprétation . . . . .	70
<b>5</b>	<b>Optimisation de la maintenance des sous-systèmes des engins</b>	<b>71</b>
5.1	Modélisation du problème . . . . .	71
5.1.1	Notations . . . . .	71
5.1.2	Le modèle étudier . . . . .	72
5.2	Justification du choix de la politique de maintenance . . . . .	72
5.2.1	Estimations des coûts . . . . .	72
5.3	Résultats de l'optimisation . . . . .	76
5.3.1	Interprétation des résultats . . . . .	79
5.3.2	Optimisation des engins en entier . . . . .	80
5.3.3	Réarrangement des périodicités des révisions générales . . . . .	80
	<b>Conclusion générale</b>	<b>82</b>
	<b>Bibliographie</b>	
	<b>Annexe</b>	



# Table des figures

- 1.1 Jointe venture . . . . . 4
- 1.2 Situation du terminal a conteneurs. . . . . 5
- 1.3 La structure de BMT. . . . . 12
  
- 2.1 Les composantes de la sureté de fonctionnement. . . . . 28
- 2.2 Chronogramme d'un matériel réparable. . . . . 30
- 2.3 Chronogramme d'un matériel irréparable. . . . . 30
- 2.4 Fonction de fiabilité. . . . . 31
- 2.5 Courbe en baignoire. . . . . 33
- 2.6 La courbe du taux de défaillance en mécanique. . . . . 34
- 2.7 Configuration série. . . . . 35
- 2.8 Configuration parallèle. . . . . 36
- 2.9 La densité de la loi exponentielle. . . . . 40
- 2.10 La densité de la loi Weibull. . . . . 41
- 2.11 La densité de la loi Normale. . . . . 42
- 2.12 La densité de la loi Gamma. . . . . 43
  
- 3.1 Organisation de la maintenance. . . . . 49
- 3.2 Schéma de remplacement périodique . . . . . 51
- 3.3 Une PM est effectuée après chaque T unités de temps opérationnel. . . . . 51
- 3.4 Maintenance périodique de n machines . . . . . 52
  
- 4.1 Aperçu général sur le RTG. . . . . 58
- 4.2 Groupe électrogène. . . . . 59
- 4.3 Sous-système translation sur roues. . . . . 59
- 4.4 Sous-système levage. . . . . 60
- 4.5 Sous-système chariotage. . . . . 60
- 4.6 Sous-système palonnier. . . . . 61

5.1	Histogrammes représentant les densités des engins étudiés . . . . .	i
5.2	Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l'engin QC1 . . . .	i
5.3	Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l'engin QC2 . . . .	
5.4	Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l'engin MHC . . . .	
5.5	Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l'engin RTG06 . . . .	
5.6	Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l'engin RTG07 . . . .	
5.7	Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l'engin RTG08 . . . .	

# Liste des tableaux

1.1	Capacité du terminal à conteneurs . . . . .	18
1.2	Les Caractéristiques du Quais . . . . .	18
4.1	Engins étudiés . . . . .	57
4.2	Résultats de la modélisation paramétrique pour les s/systèmes de l'engin QC1 .	62
4.3	Résultats de la modélisation paramétrique pour les s/systèmes de l'engin QC2 .	63
4.4	Résultats de la modélisation paramétrique pour les s/systèmes de l'engin MHC .	64
4.5	Résultats de la modélisation paramétrique pour les s/systèmes de l'engin RTG6	65
4.6	Résultats de la modélisation paramétrique pour les s/systèmes de l'engin RTG7	66
4.7	Résultats de la modélisation paramétrique pour les s/systèmes de l'engin RTG8	67
4.8	Résultats de la modélisation paramétrique pour les engins . . . . .	69
5.1	Les coûts d'une maintenance des sous-systèmes de QC1 . . . . .	73
5.2	Les coûts d'une maintenance des sous-systèmes de QC2 . . . . .	73
5.3	Les coûts d'une maintenance des sous-systèmes de MHC . . . . .	74
5.4	Les coûts d'une maintenance des sous-systèmes de RTG06 . . . . .	74
5.5	Les coûts d'une maintenance des sous-systèmes de RTG07 . . . . .	75
5.6	Les coûts d'une maintenance des sous-systèmes de RTG08 . . . . .	75
5.7	Temps optimums de remplacement des sous-systèmes de QC1 . . . . .	76
5.8	Temps optimums de remplacement des sous-systèmes de QC2 . . . . .	77
5.9	Temps optimums de remplacement des sous-systèmes de MHC . . . . .	77
5.10	Temps optimums de remplacement des sous-systèmes du RTG06 . . . . .	78
5.11	Temps optimums de remplacement des sous-systèmes du RTG07 . . . . .	78
5.12	Temps optimums de remplacement des sous-systèmes de du RTG08 . . . . .	79

# Introduction Générale

Le transport maritime devient, de nos jours, de plus en plus important et représente une alternative crédible et intéressante au transport terrestre et aérien. L'interdépendance entre commerce et flux de biens et de services, en voie d'évolution continue, fait que ce système de transport représente une préoccupation d'une importance cruciale. En effet, les différentes compagnies et entreprises fournissent de grands efforts dans le but de détecter des possibilités de réduction des coûts associés à ce transport. L'une des solutions retenues entre autres, est la conteneurisation qui s'est véritablement généralisée pour le transport maritime des marchandises solides sur toutes les mers du globe [17].

Au cours des quatre dernières décennies, le conteneur comme partie essentiel du concept d'unité de chargement a réalisé une importance incontestable dans le transport maritime international. Avec la conteneurisation croissante, le nombre de terminaux à conteneurs n'a pas cessé d'augmenter et la concurrence entre eux est devenue tout à fait remarquable. Les activités sont aujourd'hui inconcevables sans l'utilisation efficace des technologies de l'information et des méthodes d'optimisation appropriées.

La performance d'un terminal à conteneur se mesure par le temps d'escale, la rapidité des opérations et le coût de transit du conteneur. Ces facteurs sont intimement conditionnés par une efficacité dans la planification des tâches et une gestion optimale des ressources, notamment la gestion de la maintenance du matériel de manutention.

BMT (Bejaia Mediterranean Terminal) est la première du genre dans notre pays. Elle dispose de plusieurs engins qui assurent les différentes opérations liées à son fonctionnement. Chaque opération nécessite un ou plusieurs engins spécifiques. Etant données le besoin de réaliser plusieurs opérations en parallèles (le débarquement, la livraison, la visite,...), l'intervention des engins doit être synchronisée et avoir un meilleur rendement.

Afin d'assurer un bon fonctionnement du terminal à conteneurs, des études d'évaluation de performances ont été également nécessaires.

Une première étude a été réalisée en 2007 [19]. Elle avait pour objectif la modélisation globale du processus débarquement / embarquement.

Une deuxième étude a été réalisée en 2008 [28]. Elle avait pour objectif d'analyser le fonctionnement du parc à conteneurs de l'entreprise BMT afin d'évaluer ses performances, puis de prévoir le comportement du système en cas d'augmentation du flot des arrivées des navires porte-conteneurs. Dans cette étude, un nouveau modèle a été proposé en décomposant le modèle global en quatre sous systèmes indépendants, à savoir : le processus "embarquement", le processus "débarquement", le processus "stock plein" et le processus "stock vide".

Une troisième étude a été effectuée en 2009 [27]. Elle avait pour objectif de déterminer le nombre optimal des camions remorqueurs à acheminer lors des processus embarquement et débarquement, afin de minimiser les durées d'attente des QCs et des Camions remorqueurs ainsi que la durée de service d'embarquement et de débarquement.

Une quatrième étude a été réalisée en 2011 [16]. Elle avait pour objectif de mettre en évidence l'influence des RTGs et du " Call Center " dans l'évaluation des performances du terminal à conteneurs BMT.

Une cinquième étude a été réalisée en 2012 [18]. Elle avait pour objectif d'établir un modèle adéquat au fonctionnement du parc plein (zone de stockage des TCs pleins), en tenant compte de l'opération de livraison sur l'évaluation des performances du terminal.

La stratégie de maintenance a des répercussions directes sur l'exploitation d'un système, la production et les charges financières. A chaque instant de l'exploitation du système, le décideur (gestionnaire) de maintenance doit faire un choix face aux interventions possibles sur le système afin de déterminer l'action à effectuer. Ce choix doit permettre de satisfaire aux mieux les objectifs fixés à priori et permettre ainsi une exploitation optimale du système.

Dans ce cadre, une étude a été réalisée au niveau de "l'EPB " (Entreprise Portuaire de Bejaia) en 1998 [8], cette étude a été illustré par une analyse de retour d'expérience des engins de manutention de l'EPB de petits et moyens tonnages. Elle avait pour objectif de montrer comment effectuer une analyse de fiabilité d'un matériel, grâce à son retour d'expérience, et de préciser à quels niveaux les résultats de cette analyse interviennent dans l'aide à la prise de

décision en matière de maintenance.

En revanche, notre travail a pour ambition de fournir une démarche scientifique qui permettrait l'amélioration de la gestion des équipements de manutention, du point de vue maintenance, au terminal à conteneurs de Bejaia(BMT). Il s'agit plus particulièrement d'optimiser les périodicités des maintenances préventives d'un système multi composants. Pour cela nous avons adopté une politique de maintenance préventive périodique avec réparation minimale à la défaillance. Nous considérons que les maintenances périodiques sont imparfaites, ce qui peut être assimilé à des révisions partielles. Le problème a été formulé sous forme d'un programme mathématique non linéaire sans contraintes, où la fonction du coût est choisie comme fonction objectif.

Précision ici qu'à la différence de [8], les équipements considérés dans notre mémoire sont spécifiques à BMT.

Ce mémoire est composé d'une introduction générale, cinq chapitres, une conclusion, une annexe et une bibliographie :

- Nous avons entamé ce mémoire par une présentation de l'entreprise BMT, ses structures, ses services et ses équipements ;
- Le deuxième chapitre traite dans un premier temps des généralités sur la sûreté de fonctionnement et les différents concepts de bases ; fiabilité et disponibilité, et dans un second temps, aborde la nature des données de retour d'expérience, synthétise quelques éléments bibliographiques, illustrent les méthodes de calcul de fiabilité (ajustements des lois).
- Ensuite, dans le troisième chapitre, nous avons regroupé les principaux modèles de la maintenance préventive se trouvant dans la littérature proposée par Ilya Gertsbakh.
- Le chapitre 4 est consacré à l'analyse du retour d'expérience des équipements de manutention de la BMT. Il aborde l'ajustement de lois de fiabilité des sous-systèmes par plusieurs lois paramétriques et l'ajustement de lois de fiabilité des engins (systèmes).
- Les modèle paramétriques des sous-systèmes obtenus dans le chapitre 4 sont intégrés dans le chapitre 5 pour déterminer les périodes des révisions partiels qui optimisent le coût total de maintenance.

# Présentation de *BMT* (Bejaia Mediterranean Terminal)

## Introduction[15]

**BMT** (Béjaia Mediterranean Terminal) a été créée sur décision du Conseil des Participations de l'Etat (CPE) en Mai 2004, pour la conception, le financement, l'exploitation, l'entretien d'un Terminal à conteneur et la réalisation d'un centre de formation en techniques portuaires au port de Béjaia.

**BMT- SPA** est une jointe venture entre l'Entreprise Portuaire de Bejaia (EPB) et le groupe Portek Systems and Equipment(PSE), une société Singapourienne. EPB est l'autorité portuaire qui gère le port de Béjaia. PORTEK Systems and Equipment, une filiale du Groupe PORTEK, qui est un opérateur de Terminaux à conteneurs présent dans plusieurs ports dans le monde et également spécialisé dans les équipements portuaires. Le capital de **BMT** s'élève à 2.000.000 *USD*(500.000.000 *DA*) répartis à raison de 51% pour L'EPB et 49% pour PORTEK. Les activités commerciales de la **BMT** ont débuté en juillet 2005.



FIGURE 1.1 – Jointe venture

## 1.1 Objectif du partenariat

- Participer à l'intégration de l'économie algérienne ;
- Améliorer la balance commerciale ;
- Réduire les risques d'exploitation du marché ;
- Acquérir de nouvelles technologies ;
- Développer de nouveaux marchés.

## 1.2 Position géographique privilégiée

Implanté au centre du pays, au cœur de la méditerranée dans le nord du continent africain, le Port de Béjaia occupe une situation géographique stratégique. Il dessert un hinterland important et très vaste. La ville, le Port et le terminal à conteneurs de Béjaia disposent de ce fait de voies de communication reliant l'ensemble des routes du pays, des voies ferroviaires et à proximité d'un aéroport international.

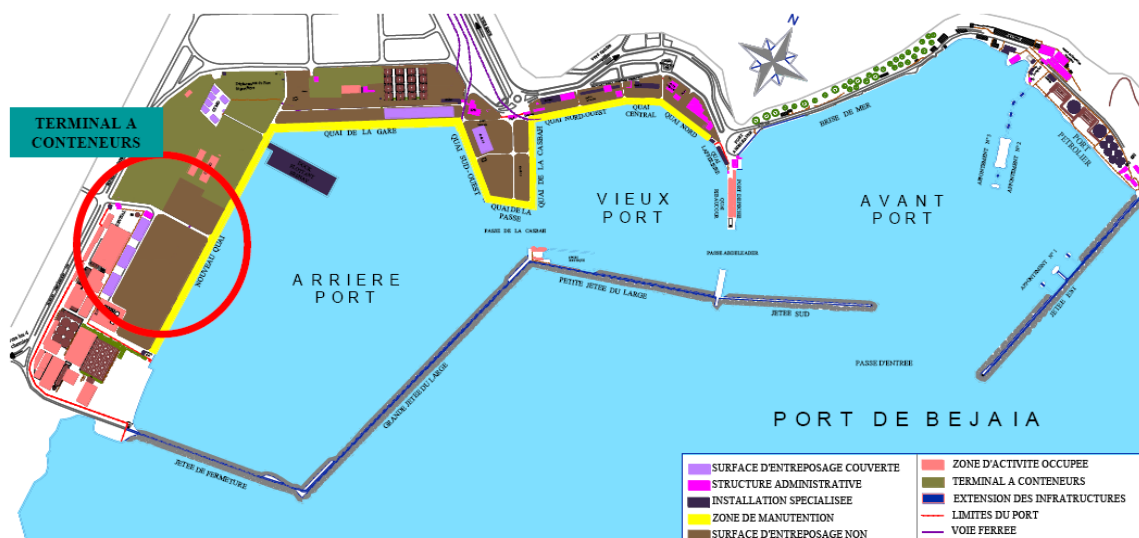


FIGURE 1.2 – Situation du terminal a conteneurs.

## 1.3 Activités et personnel

BMT est une entreprise prestataire de service portuaire, dans la gestion de terminaux à conteneurs. L'activité principale de BMT est la gestion et l'exploitation du Terminal à conteneurs. Pour faire, elle s'est dotée d'équipements de dernière nouveauté et de systèmes informa-



tiques pour le support de la logistique du conteneur afin d'offrir des services de qualité, efficaces et fiables pour assurer une satisfaction totale des clients.

**BMT** veille au développement et à la gestion de son terminal à conteneurs où l'intégrité, la productivité, l'innovation, la courtoisie, et la sécurité sont de rigueur. **BMT** est constamment soucieuse des intérêts de ses clients avec lesquels elle partage le souci de performance et de coût. Elle met à la disposition de ses clients des ressources humaines et des moyens nécessaires pour optimiser sa productivité et atteindre des niveaux de performance concurrentielle.

### 1.3.1 Opérations au niveau du terminal

- Personnel spécialisé et qualifié dans la manutention de navires porte conteneurs (débarquement / embarquement) ;
- Opérations d'aconnage (stockage, dépotage, ...);
- Suivi de livraison, visite et restitution des Tcs ;
- Sécurité et traçabilité des opérations ;
- Prise en charge et suivi des réclamations des clients.

### 1.3.2 Maintenance et équipements

- Personnel spécialisé et qualifié dans la maintenance des équipements portuaires, apte à gérer, contrôler l'état et fournir le support technique aux équipements du Terminal ;
- Elaboration des procédures d'évaluations des risques et des programmes d'entretien préventif avec des enregistrements historiques et interventions ;
- Détection rapide des pannes et exécution de la procédure de réparation en temps réduits.

### 1.3.3 Centre de formation

Le centre de formation de **BMT** est spécialisé dans la formation aux métiers des terminaux à conteneurs en particulier dans les opérations de manutention et acconnage, la maintenance des équipements et dans d'autres formations propres aux métiers portuaires.

Sa vocation principale est de former le personnel de **BMT** en améliorant et en renforçant ses connaissances théoriques et pratiques, pour les adapter aux conditions de la concurrence nationale et internationale. Le centre est également ouvert au personnel des autres ports algériens.

### 1.3.4 Autres fonctions administratives

- Etude et suivi des besoins actuels et futurs de BMT ;
- La gestion et suivi de carrière du personnel BMT ;
- La gestion des activités administratives ;
- La gestion des systèmes informatiques ;
- La gestion hygiène et sécurité de travail (HSE) ;
- Surveillance et sécurité de la marchandise.

## 1.4 La structure de l'entreprise

### 1.4.1 Direction Générale

A sa tête, le directeur général qui gère l'entreprise, a le pouvoir de décision, administrer l'entreprise, assigner des directives pour les différentes structures et faire la liaison entre les directions de l'entreprise.

### 1.4.2 Direction des ressources humaines (DRH)

- **Service personnel :**

La mission du service personnel est de mettre en œuvre des systèmes de gestion intégrés à la stratégie de l'entreprise et qui traduisent une adéquation entre les impératifs économiques et les attentes du personnel. Pour cela, la véritable importance de cette structure réside dans la recherche des meilleurs potentiels.

- **Service des moyens généraux :**

Chargé des achats et de la gestion des stocks de l'entreprise.

- **Service hygiène et sécurité :**

Assure la sécurité de la marchandise, du parc à conteneurs et propreté de l'entreprise et de son environnement.

### 1.4.3 Direction des opérations (DO) :

Assure la planification des escales du parc à conteneurs et la planification des ressources (humaines et matériels). Elle prend en charge les opérations de manutention, comme la réception des navires porte conteneurs et leurs chargements et déchargement, comme elle suit les opérations de l'acconage telles que : le suivi des livraisons, dépotage, mise à disposition des conteneurs vides, traitement des conteneurs frigorifiques.

- **Service acconage :**

Il suit les opérations de l'acconage, telles que : le suivi des livraisons, dépotage, mise à disposition des conteneurs vides, traitement des conteneurs frigorifiques, et la sécurité au sein du terminal.



- **Service manutention :**

Il prend en charge les opérations de manutention, comme la réception des navires porte conteneurs et leurs chargements et déchargement.



- **Traitement Frigo**

Le traitement des conteneurs frigorifiques, branchement, gardiennage, et monitoring de la température est assurée par une équipe spécialisée du département technique au niveau de la zone REEFER. En cas de défaillance d'un conteneur frigorifique, sur demande du client, l'équipe technique de BMT peut effectuer une intervention curative en réparant une unité défaillante.



- **Transport ferroviaire**

BMT logistique et les services de la SNTF ont signé une convention de travail ouvrant la possibilité à BMT LOGISTICS d'utiliser le transport des chemins de fer Algérien pour transporter les conteneurs à partir du port de Béjaia, offrant ainsi un service transmodal à ses clients et lui donnant la possibilité de les livrer avec une prestation de transport de bout en bout réguliers.

Les services avec livraison sur sites assurés par BMT LOGISTICS sont :



-Port de Béjaia --> GMR (Alger).

-Port de Béjaia --> Akbou.

-Port de Béjaia --> Bordj Bou Arreridj.

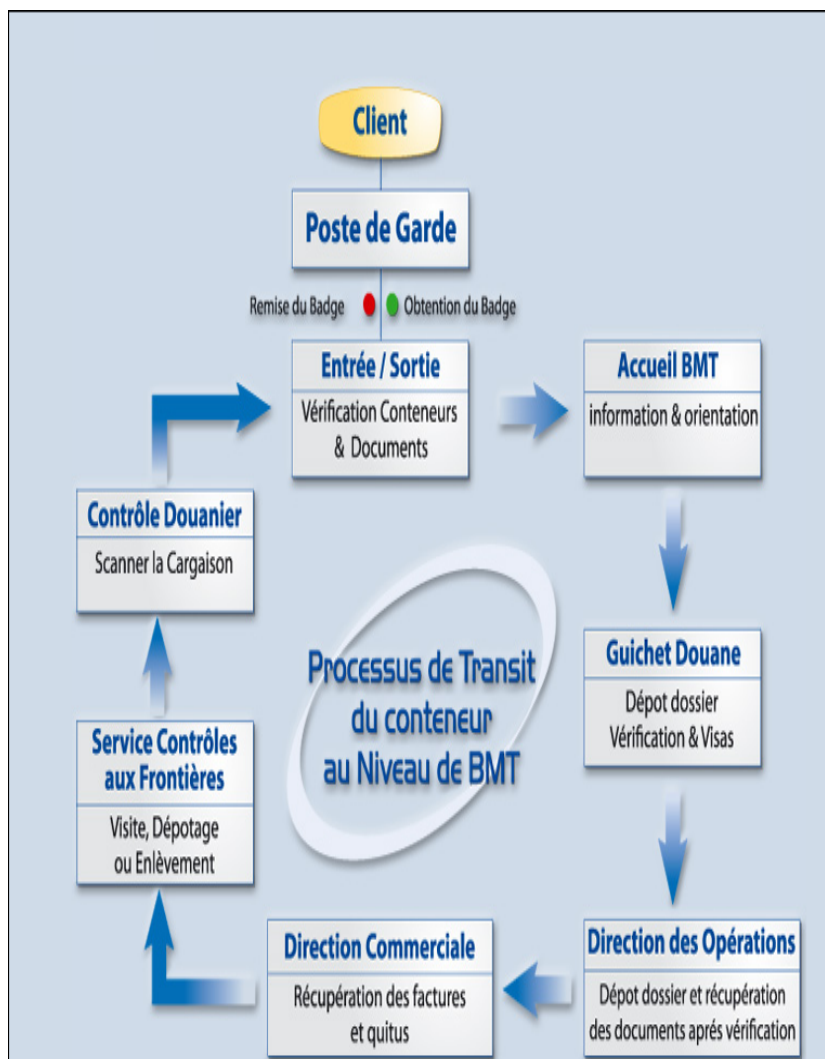
-Port de Béjaia --> Sétif.

Occasionnellement, si le client le désire, BMT Logistiques peut livrer sur d'autres destinations.

-Port de Béjaia --> destination AD-HOC.

- **Empotage & Dépotage :**

BMT compte des équipes spécialisées pour assurer l'empotage et le dépotage de conteneurs. La cadence de dépotage et empotage dépend de la marchandise et de la rapidité d'exécution qui constitue une autre mesure de qualité de service. Deux équipes constituées de 8 personnes chacune assurent cette prestation. Des engins sont affectés à cette tâche : Clarck, Steaker.



- **Service logistique :**

Il s'occupe d'une part de la gestion de la zone Extra Portuaire (restitution, mise à disposition et rapprochement des conteneurs vides) et du transport de la marchandise.

#### 1.4.4 Direction Marketing (DM) :

Veille à la marque de l'entreprise en se préoccupant en permanence d'entretenir des relations avec les clients. Elle vise à faire connaître ses missions, ses programmes, ses orientations et ses performances auprès de ses clients. Elle amène son environnement externe à prendre conscience de l'importance des démarches qu'elle entreprend dans le développement et l'amélioration de la qualité des services.

- **Service commercial**

Suit la facturation, la gestion de portefeuille client et le recouvrement.

- **Département informatique**

Assure le bon fonctionnement du CTMS, la maintenance du parc informatique de l'entreprise et le développement de nouvelles applications aux différentes structures.

#### **1.4.5 Direction des Finances et de Comptabilité (DFC)**

Procède à l'enregistrement de toutes les opérations effectuées par l'entreprise au cours de l'année. Elle est constituée de deux services :

- **Service de comptabilité**

Procède au contrôle et l'enregistrement de toutes les factures d'achat, de prestation et d'investissement.

- **Service des finances**

Procède au règlement de toutes les factures d'un côté et de l'autre à l'encaissement de toutes les créances de l'entreprise émis à la banque.

#### **1.4.6 Direction Technique (DT)**

Assure une maintenance préventive et curative des engins du parc à conteneurs.

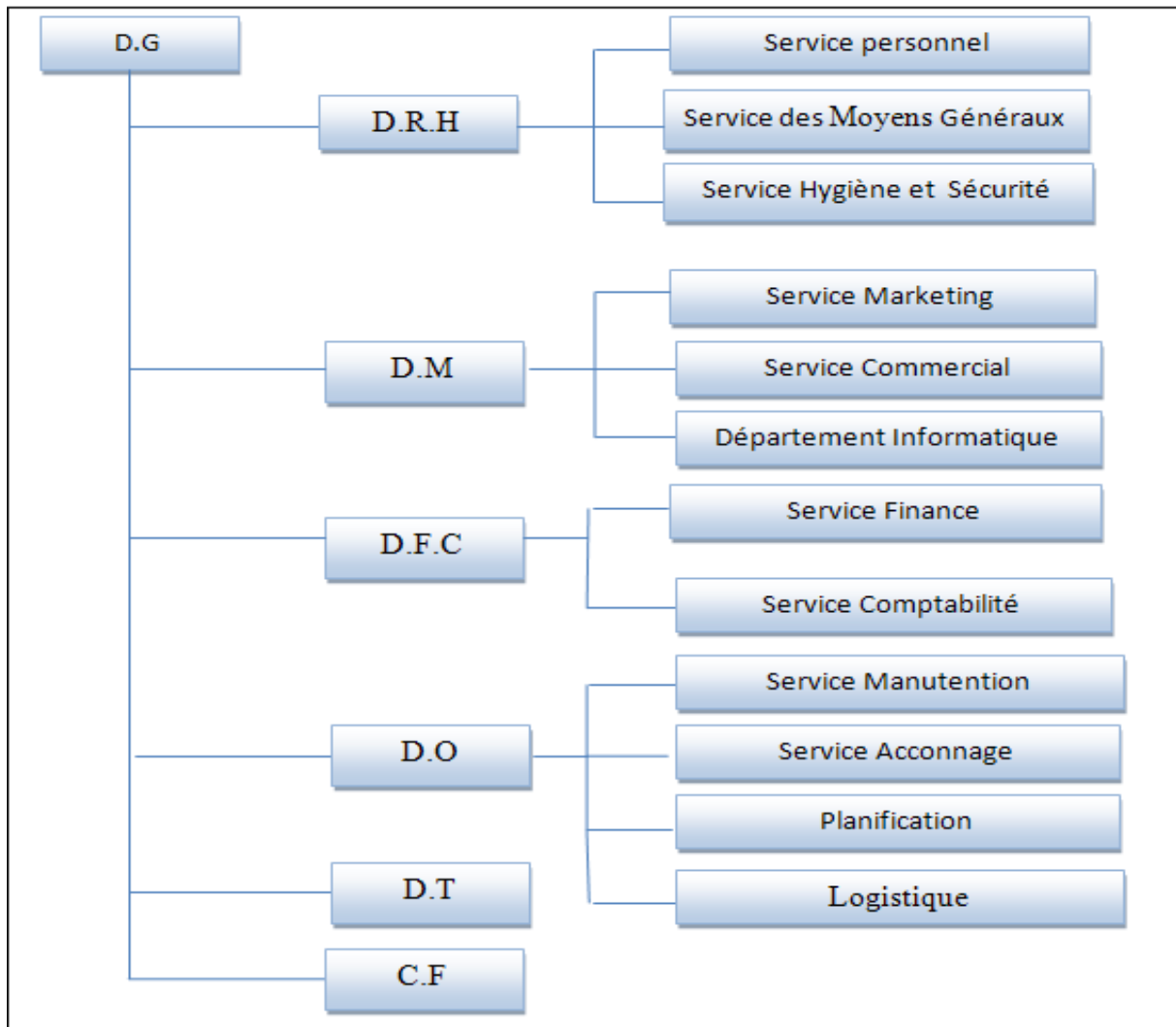


FIGURE 1.3 – La structure de BMT.

## 1.5 Description de la direction technique

### 1.5.1 Les équipements de BMT

Vous trouverez ci-dessous les équipements de BMT par ordre de priorité pour la direction Technique :

### 1. Grue mobile portuaire (MHC)

Nombre : 01

Tonnage : 100 Tonnes

► **Caractéristiques :**

- ✓ Charge et décharge le conteneur du navire au vice versa de camion ;
- ✓ Un Genset (groupe électrogène) ;
- ✓ Système de moteur électrique ;
- ✓ Système de portique.

### 2. Les Portiques de Quai.

Nombre : 02

Tonnage Type : 40 et 70 Tonnes Post Panamaux.

► **Caractéristiques :**

- ✓ Il soulève les conteneurs par une grue qui est adaptée dans un chariot et peut se déplacer horizontalement sur un rail ou une paire de rails adaptés sous un faisceau ;
- ✓ Charge et décharge le conteneur du navire au vice versa de camion et d'étai ;
- ✓ Système de portique ;
- ✓ Douze (12) moteurs électriques ;
- ✓ Douze (12) darke-systèmes ;
- ✓ Ascenseur ;
- ✓ Pièces de machines ;
- ✓ Un Genset (groupe électrogène) ;
- ✓ Une carlingue électrique ;
- ✓ Système de grue ;
- ✓ Manipulation des câbles ;
- ✓ Système de moteur électrique ;
- ✓ Freinage hydraulique ;
- ✓ Une carlingue au fond.

### 3. RTG (Rubber Tyred Gantry)

Nombre : 06+2

Tonnage gerbage : 40 tonnes

Deux RTGs : 6+1 au Sol

6+1 en hauteur

Six RTGs : 4+1 au Sol

6+1 en hauteur



**► Caractéristiques :**

- ✓ Soulever le conteneur du camion au bloc ;
- ✓ 4 systèmes de portique, 4 roues et 4moteurs commandés avec un Genset (groupe électrogène) ;
- ✓ Il a deux directions : 0° (parallèles au bloc) ; 90° (quand le RTG se déplace à l'autre bloc au besoin) ;
- ✓ Aucun ascenseur ;
- ✓ Une carlingue pour l'opérateur, et une salle électrique ;
- ✓ Ecarteur vertical : supporte par des câbles liés au chariot ;
- ✓ Horizontal à chariot : la carlingue de l'opérateur est soutenue par le chariot.

**4. Reach Steaker**

Nombre : 06.

Tonnage : 45 tonnes.

**► Caractéristiques :**

- ✓ Il a presque le même rôle que le RTG ;
- ✓ Il ne peut pas accéder a certaine position ;
- ✓ Soulève le conteneur (vide ou plein) ;
- ✓ Deux roues d'entraînement (obstinées) et deux autres roules vers l'arrière pour la direction ;
- ✓ Elle a un spreader et une grue ;
- ✓ Circuit hydraulique (freinage, levage, écarteur, direction) ;
- ✓ La grue ou le télescope est équipée d'un contre poids pour charger et décharger le conteneur sur place ;
- ✓ Il peut atteindre même le conteneur sur le navire ;
- ✓ Il a une serrure de torsion.

**5. Empty Sprader**

Nombre : 04

Tonnage : 70 Tonnes.

**► Caractéristiques :**

- ✓ Spreader de flat ; il prend des deux cotés.

**6. Chariot élévateur**

Nombre : 11

Tonnage : 3 ; 5 ; 10 et 1.5 Tonnes.

**► Caractéristiques :**

- ✓ Ils sont faits pour le stockage ;
- ✓ Les chariots élévateurs de 3 et 5 tonnes peuvent entrer dans le conteneur et soulever des marchandises.

**7. Tracteurs Remorques**

Nombre : 22

Tonnage : 45 tonnes.

**► Caractéristiques :**

- ✓ Transporter le conteneur du quai jusqu'au terminal et vice versa.

**1.5.2 Rôle des différents Services de direction technique****• Service méthodes et qualité****► Mission principale**

Analyser et mettre en œuvre des méthodes efficaces et économiques de maintenance pour une meilleure performance des équipements, une meilleure sécurité et une meilleure qualité.

**► Activités**

✓ Optimiser les plans de maintenance préventive et corrective, en tenant compte des aspects technico-économiques.

✓ Analyser les modes de défaillance des équipements, de leurs effets et de leur criticité.

✓ Analyser la fiabilité et la disponibilité des équipements.

✓ Analyser les coûts et la qualité des moyens et des achats.

✓ Définir les mesures techniques et administratives destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement des équipements.

✓ Identifier le besoin des pièces de rechange et assurer leur disponibilité en stock.

✓ Prendre décision sur le choix des méthodes de maintenance.

**• Chef de service portiques****► Mission principale**

Manager et assurer la maintenance des équipements relatifs aux portiques et frigos.

**► Activités**

✓ Assurer la gestion humaine et matérielle de son service.

✓ Exécuter les plans de maintenance.

✓ Améliorer et optimiser le rendement des machines.

✓ Coordonner avec le chef de Service Méthodes pour assurer la disponibilité des pièces de rechanges nécessaires.

- ✓ Planifier et identifier le besoin de formation de son personnel.
- ✓ Intervenir et résoudre les dysfonctionnements des machines.

- **Chef de service engins**

- ▶ **Mission principale**

Manager et assurer la maintenance des engins relatifs à l'atelier et les engins.

- ▶ **Activités**

- ✓ Assurer la gestion humaine et matérielle de son service.
- ✓ Exécuter les plans de maintenance.
- ✓ Améliorer et optimiser le rendement des machines.
- ✓ Coordonner avec le chef de Service Méthodes pour assurer la disponibilité des pièces de rechanges nécessaires.
- ✓ Planifier et identifier le besoin de formation de son personnel.

## 1.6 Description du parc à conteneurs

### 1.6.1 Le Terminal à conteneurs de BMT



	Capacité	Superficie
Parc à Conteneurs Pleins	8 300 EVP	68 500 $m^2$
Parc à Conteneurs Reefers	500 Prises	2 800 $m^2$
Zone Pour Visite/Empotage et Dépotage	1500 EVP	18 700 $m^2$
Le Parc à Conteneurs	10 300 EVP	90 000 $m^2$
Zone Extra-Portuaire (à 3 Km du Port)	5 000 EVP	50 000 $m^2$

TABLE 1.1 – Capacité du terminal à conteneurs

Quais pour Accostage	Caractéristiques
Longueur	500 ml
Profondeur	12 m
Superficie du Bassin	60 h
Nombre de Postes	04
Taux d'utilisation du qua	70

TABLE 1.2 – Les Caractéristiques du Quais

sa sécurité. Les systèmes installés comprennent un CTMS, un OCR, un PDS et un environnement opérant en EDI.

### 1.7.1 Le CTMS (Container Terminal Management System)

BMT dispose d'un système logiciel de gestion du Terminal à conteneurs moderne (CTMS) qui a pour objectif d'effectuer des activités en temps réel, d'assurer une bonne planification du Terminal, d'offrir un niveau élevé de l'efficacité opérationnelle pour ses clients, d'améliorer le service et s'adapter aux besoins des clients. Le CTMS assure plusieurs tâches telles que :



- Le suivi du processus d'importation et d'exportation ;
- La gestion de retour des conteneurs vides au terminal ;
- La gestion des restitutions des conteneurs (vides ou pleins) ;

- Le suivi de dépotage des conteneurs ;
- La planification des navires et du parc à conteneurs ;
- Le suivi des opérations de chargement et de déchargement ;
- La réception des conteneurs à l'exportation ;
- Le suivi des opérations de shifting au niveau du parc à conteneurs ;
- La facturation des clients.

### 1.7.2 Le PDS (Position Determining System)

Le PDS, autrement dit le Système de Détection de Positionnement, permet de détecter tous les mouvements du conteneur en fournissant la position des appareils de manutention lorsque le conteneur est manipulé en employant le GPS (Gestion de Position par Satellite).

### 1.7.3 Le RDS (Radio Data System)

Pour accroître sa compétitivité, BMT doit optimiser la gestion de ses parcs à conteneurs. A cet effet, des stratégies fondamentales consistant à contrôler en temps réel les équipements de manutention de conteneurs et à assurer des cadences de chargement et déchargement plus rapides, ce qui, bien entendu, nécessite de disposer d'informations adéquates concernant les aires de transbordement et de stockage.

Pour cela, un système qui englobe tous les éléments de transmissions de données par radio fréquence (RDS) affecté à la gestion des conteneurs en ligne et en temps réel s'avère vital dans la perspective d'une gestion performante des vastes quantités d'information associées aux flux de conteneurs entrants et sortants du terminal.

Le RDS fonctionne sur la base d'une transmission de données sans fil via les signaux hertziens numériques, opérant à une fréquence déterminée. La transmission sans fil (wireless) maintient une liaison radio bilatérale entre un Terminal mobile au niveau d'un poste de travail (au niveau des parcs à conteneurs ou sur le quai) et le serveur principal sur lequel tourne le CTMS. Le Terminal mobile est utilisé par les employés des opérations pour collecter et visualiser les données concernant la gestion du parc à conteneurs.

Ce Terminal mobile peut être portable, mais il peut aussi être monté sur un portique ou sur tout autre type d'équipement de levage. L'utilisation de la communication bilatérale signifie que les utilisateurs mobiles (par exemple grue, RTG, portique de levage) ne doivent pas se déplacer pour recevoir des instructions ou transmettre un rapport concernant les opérations. Ils sont donc en mesure d'effectuer leur travail en temps réel beaucoup plus efficacement avec gain de temps.

Les implications concrètes liées aux avantages du RDS se résument comme suit :

- Mise à dispositions d'informations actualisées en temps réel ;
- Cadences de chargement et déchargement plus rapides ;
- Temps de réponse plus brefs ;
- Meilleure utilisation des ressources humaines et matérielles ;
- Productivité des ressources accrue ;
- Plus grande précision et niveaux de services améliorés ;
- Les conteneurs ne sont plus égarés ;
- Opérations au niveau des aires de stockage sont plus rapides et plus efficaces ;
- Opérations plus rapides au niveau des postes de transbordement ;
- Flexibilité dans la re-programmation des ressources et des tâches.

La mise en place du RDS a été nécessitée afin de réaliser des objectifs en termes de qualité de service, de rapidité, de productivité et d'utilisation rationnelle des ressources.

#### 1.7.4 Le OCR (Optical Character Recognition)

Pour améliorer l'efficacité et la productivité de la manutention des conteneurs en transit dans le Terminal à conteneurs, BMT a opté pour une installation du système OCR basé sur la reconnaissance des caractères.

OCR est conçu pour identifier en temps réel tous les conteneurs entrant dans le Terminal ou sortant. Au moment où le conteneur (transporté par camion) s'engage dans le Terminal ou lorsqu'il en sort, le système OCR saisit et archive les numéros des conteneurs et enregistre l'heure d'arrivée ou de sortie du conteneur.

Équipé de caméras à balayage linéaire ultra rapides et à haute résolution, le système OCR reconnaît l'image vidéo de chaque numéro d'identification inscrit sur les conteneurs et transmet ces numéros au CTMS. Le système est conçu pour reconnaître les codes conformes à la norme ISO sur les conteneurs transportés par les camions.

• **Avantages** : Ce système de suivi en temps réel devrait permettre à BMT d'accroître l'efficacité des opérations de suivi et donnera aux utilisateurs une information précise, ce qui améliorera les services à la clientèle et diminuera les retards et les coûts associés à la manutention et au transit des conteneurs.

## 1.8 Les procédures de BMT

### 1.8.1 A l'Import

- **La visite**

Pour permettre un bon suivi des visites conteneurs, le transitaire doit remettre au service des opérations les documents suivants :

- Copie du Connaissance avec mention de la prestation requise ;
- Bon à délivrer ;
- Bon de commande.

Par la suite, l'agent de BMT établira une liste complète des conteneurs à préparer pour la visite du lendemain qui sera remise au chef de section exploitation, qui doit à son tour confirmer la mise à disposition des conteneurs en zone de visite pour le lendemain.

- **La pesée**

Le client est appelé à présenter au service des Opérations les documents suivants :

- Bon de commande (avec visa du service commercial de recouvrements) ;
- Copie du Connaissance ;
- Bon à délivrer.

A ce moment là, l'agent BMT fait charger le conteneur sur un camion remorque pour effectuer la pesée.

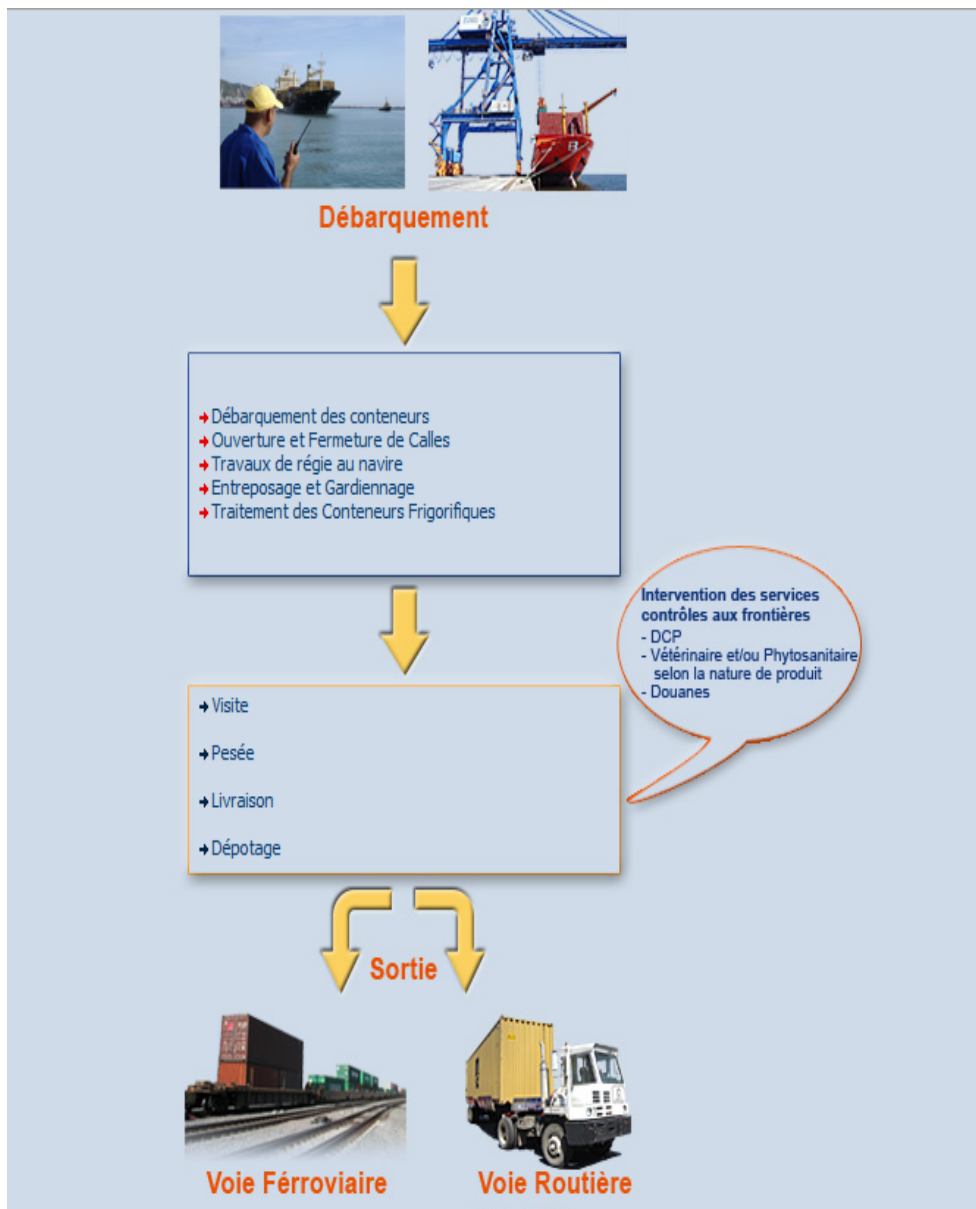
- **La livraison**

Pour permettre un suivi rigoureux des livraisons, le transitaire doit remettre un dossier complet, devant contenir :

- Bon à délivrer (apuré par la douane) ;
- Mise à quai en triple exemplaires ;
- Copie de connaissance ;
- Bon de commande (avec précision de la nature de prestation) visé par le service commercial (recouvrement).

Par conséquent l'agent chargé des opérations commerciales devrait confirmer la conformité du dossier pour établir le Container Delivery Order et l'enregistrer sur fichier électronique consacré au suivi des livraisons.





### • Le dépotage

Le transitaire doit remettre à l'agent de BMT chargé des dépotages un dossier complet devant contenir :

- Bon de commande ;
- Bon à délivrer (apuré par la douane) ;
- Lettre de dépotage (apuré par la douane) ;
- Copie de connaissance avant 16h00.

Par la suite l'agent de BMT prépare les Container Movement Request (document nécessaire pour le dépotage à remettre au pointeur affecté à la zone de dépotage), mais au préalable l'agent chargé des opérations commerciales remettra au chef de section exploitation une liste contenant tout les conteneurs à préparer pour le lendemain (selon demandes enregistrées après 16h00).

Après chaque confirmation de fin de dépotage, l'agent doit s'assurer que la lettre de dépotage soit signée par le responsable de section pour clôturer le dossier.

## 1.8.2 A l'Export

### • La restitution

Pour permettre un suivi rigoureux des restitutions, l'agent BMT responsable doit exiger du pointeur une liste quotidienne des conteneurs restitués avec leurs positions au terminal et s'assurer de comparer les bons reçus avec le nombre total de conteneurs figurants sur la liste.



### • Suivi des mises à quai

Cette opération est assurée par l'agent responsable des restitutions, qui doit s'en assurer du bon suivi grâce à la tenue d'un fichier électronique mis à jour avec la saisie des restitutions journalières, et ce avec le concours du pointeur désigné à charge pour le suivi des restitutions conjointement avec l'agent responsable des restitutions à la fin de la journée. La signature des mises à quai est assurée par le chef de section.

- **Mise à disposition**

Le suivi des mises à dispositions devrait être assuré par l'agent chargé des opérations commerciales responsable des mises à dispositions, qui doit par conséquent tenir un fichier électronique spécialement consacré aux conteneurs mis à disposition. Les documents requis pour une mise à disposition sont :

- Demande de mise à disposition du consignataire dûment signée par la douane ;
- Un bon de commande ;
- Lettre d'emportage (en cas d'emportage à quai) dûment signée par la douane ;
- Bon d'embarquement qui nous permettra d'effectuer l'embarquement en toute régularité.

- **l'Empotage**

Le client est libre d'effectuer cette opération soit à l'intérieur du terminal à conteneur soit à l'extérieur dans ses magasins.

- **Cas d'emportage à quai :**

Le client doit remettre au service des opérations :

- Lettre d'emportage ;
- Mise à disposition avec la liste des conteneurs à embarquer ;
- Le bon de commande.

- **Cas d'emportage externe :**

Le client doit remettre au service des opérations :

- Bon de commande ;
- Mise à disposition avec la liste des conteneurs vides.

- **Visite/Pesée**

Le transitaire ou le client final doit remettre au service des opérations le document suivant :

- Bon de commande.

## 1.9 Objectifs de BMT

Faire du Terminal à Conteneurs de **BMT** une infrastructure moderne à même de répondre aux exigences les plus sévères en matière de qualité dans le traitement du conteneur.

- faire du terminal a conteneurs de BMT une infrastructure moderne à même de répondre aux exigences en matière de qualité dans le traitement des conteneurs.
- La mise a disposition d'une nouvelle technologie dans le traitement des conteneurs pour :
  - Un gain de productivité ;
  - Une réduction des coûts d'escale ;

- Une fiabilité de l'information ;
  - Un meilleur service clientèle ;
  - Sauvegarder la marchandise des clients ;
  - Faire face a la concurrence nationale et internationale ;
  - Propulser le terminal au stade international ;
  - Gagner des parts du marché.
- Pour les conteneurs le passage de 20 a 30 conteneurs l'heure ;
  - La réalisation de 150.000 EVP à l'horizon de 2015 ;
  - La création et la gestion d'un centre de formation.

## 1.10 Les atouts de l'entreprise

Pour réaliser ses objectifs, **BMT** met à la disposition de ses clients une Technologie et un savoir-faire dans le traitement du conteneur pour leur assurer :

- Une rade et un port non congestionné ;
- Un tirant d'eau d'au moins de 12 m ;
- Des quais spécialisés pour les conteneurs ;
- Un personnel bien formé et motivé ;
- Des moyens modernes pour une meilleure productivité ;
- Des temps d'escale très réduits ;
- Un guichet unique pour faciliter les procédures de transit en douane ;
- Des espaces pour le dépotage des conteneurs à l'intérieur du Terminal à conteneurs ;
- Une traçabilité du conteneur pour un enlèvement rapide ;
- Une courtoisie et une qualité d'engagement pour la clientèle ;
- Une organisation de transport du conteneur de bout en bout ;
- Une capacité de stockage importante ;
- Des installations spécialisées pour les reefers et les produits dangereux ;
- Terminal entièrement sécurisé contre le vol et toute autre infraction ;
- Une interface directe avec les consignataires et les transitaires via EDI.

# Généralités sur la fiabilité et traitement statistique des données de fiabilité

## Introduction

La mise en œuvre d'une politique de maintenance nécessite une parfaite connaissance du comportement opérationnel du matériel, ceci est obtenu par la détermination des lois de survie (de fiabilité) les plus réalistes possibles. Pour cela il faut constituer des échantillons de temps de défaillance à partir de l'analyse des données de retour d'expérience. Le jugement sur ces échantillons se trouve confronté à deux contraintes. Celle de l'estimation, où on doit chercher à trouver les valeurs des paramètres dont dépend la distribution d'origine, les plus convenables possibles. La seconde contrainte est relative aux tests d'hypothèses, où on doit s'assurer, avec risque consenti, que la distribution choisie est représentative des données d'exploitation. Avant leur utilisation, ces données doivent faire l'objet d'une validation par expertise.

## 2.1 Généralités sur 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'Etudes ; elle représente 70% environ de l'activité totale. Les 30% restants représentent la partie dite quantitative qui est consacrée à la maîtrise des risques avant fabrication à partir des architectures déjà élaborées ou pour la reconception des systèmes. C'est donc la phase d'optimisation des architectures des systèmes et de leur mise en œuvre de façon à maximiser, à moindre coût, leur robustesse aux aléas. La Sûreté de fonctionnement consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des systèmes technologiques et les défaillances humaines [29].

La sûreté de fonctionnement n'est pas un but en soi, mais un moyen ou un ensemble de moyens : des démarches, des méthodes, des outils et un 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 dites de sécurité sont très présentes dans le monde des machines-outils ou dans les procédés continus comme la pétrochimie. Dans les applications de type manufacturier, les préoccupations sont plutôt liées à la disponibilité. Dès lors que la sécurité ou la disponibilité d'un système est mise en défaut, on incrimine sa fiabilité. Enfin, 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.

### 2.1.1 Concepts de base de la sûreté de fonctionnement (FMDS)

#### ► Fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée. La fiabilité est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité  $A$  accomplisse une fonction requise, dans des conditions données, pendant l'intervalle de temps  $[0, t]$  [9, 10] :

$$R(t) = P[A \text{ non défaillant dans } [0, t]]. \quad (2.1)$$

#### ► Disponibilité

La disponibilité est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions données, et à un instant donné. La disponibilité est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité  $A$  soit en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions données, et à un instant  $t$  donné :

$$D(t) = P[A \text{ non défaillant à l'instant } t]. \quad (2.2)$$

#### ► Maintenabilité

La maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits.

$$M(t) = P[A \text{ est réparé sur } [0, t]] \quad (2.3)$$

► **Sécurité**

La sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques : danger ou risque d'agression physique, d'accident, de vol, de détérioration...

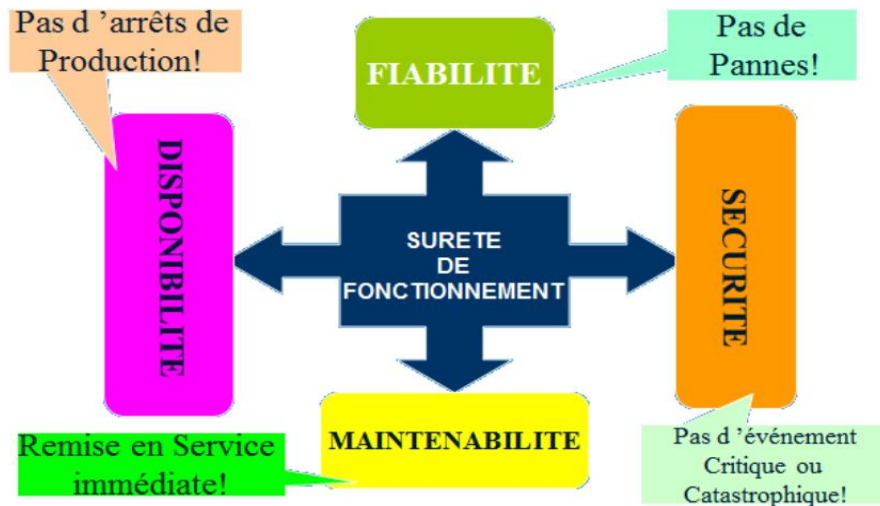


FIGURE 2.1 – Les composantes de la sûreté de fonctionnement.

## 2.2 Notions théoriques de fiabilité

### 2.2.1 La fiabilité

[20] La fiabilité est la probabilité que le système réalise la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et dans un intervalle de temps donné  $[0, t]$ .

La notion de fiabilité se distingue selon l'étape étudiée de la vie du système :

a) **La fiabilité prévisionnelle** [3]

C'est la fiabilité calculée sur la base d'un modèle mathématique défini à partir des données du projet et de la fiabilité estimée des composants.

b) **La fiabilité estimée "Intrinsèque"** [3]

C'est la fiabilité d'un dispositif mesurée au cours d'essais spécifiques, effectués dans le cadre d'un programme d'essais entièrement définis.

c) **La fiabilité opérationnelle** [3]

La fiabilité opérationnelle est la fiabilité mesurée sur un des dispositifs en exploitation normale ; elle dépend des conditions réelles d'utilisations et du support logistique.

### 2.2.2 La panne "La défaillance"

[2] C'est une perte partielle ou totale ou simplement une variation des propriétés de l'élément qui diminue significativement ou bien entraîne la perte totale de la capacité de fonctionnement.

On distingue selon la vitesse de variation de ces propriétés deux types de défaillance :

**a) Les défaillances graduelles [2]**

Elles se caractérisent par une variation progressive des paramètres déterminant la fiabilité du système. Ce type de défaillance est prépondérant pour le matériel mécanique, pour lequel se manifeste l'usure des composants après une certaine durée de fonctionnement.

**b) Les défaillances subites [2]**

Elles sont dues à une perte totale des propriétés du système entraînant son incapacité de fonctionnement, contrairement aux défaillances graduelles. Ce type de défaillances caractérise spécialement le matériel électronique.

On peut aussi classer les défaillances selon la période de vie de l'équipement. On distingue deux classes :

**a) Les défaillances aléatoires [23]**

Elles apparaissent durant la période de vie utile du matériel. Ce sont des défaillances accidentelles. Elles ont la même probabilité d'apparition.

**b) Les défaillances par usure [23]**

Ce sont des pannes progressives et elles apparaissent suites à la fatigue, l'usure et la dégradation du matériel après une longue période de fonctionnement.

### 2.2.3 Matériel réparable

[23] C'est un matériel qui peut être remis en fonctionnement après avoir subi une défaillance. La vie d'un tel matériel peut être décrite à l'aide de chronogramme suivant (Voir Figure 4.3) :

Avec :

- ✓MUT (Mean Up Time) : Moyenne des temps de bon fonctionnement ;
- ✓MDT (Mean Down Time) : Moyenne des temps de panne ;
- ✓MTBF (Mean Time Between Failure) : Moyenne des temps entre défaillance ;
- ✓MTTR (Mean Time to Repair) : Moyenne des temps de réparation.



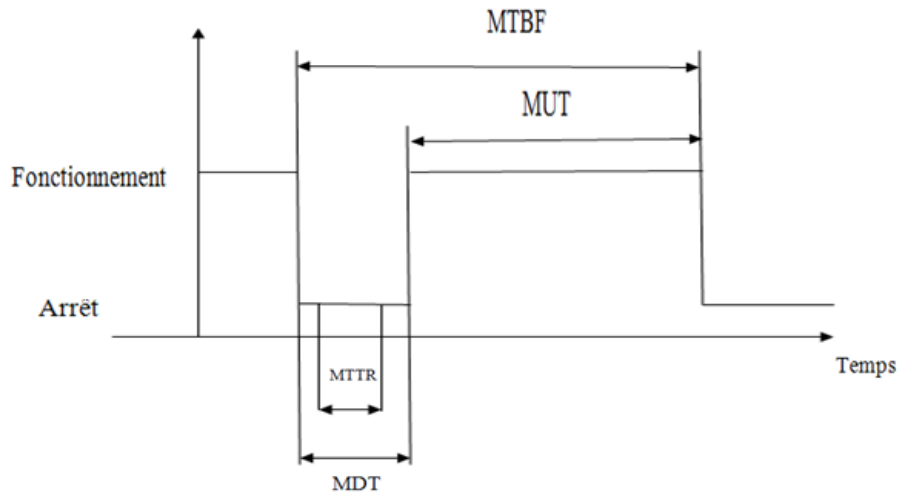


FIGURE 2.2 – Chronogramme d'un matériel réparable.

### 2.2.4 Matériel irréparable

[23] Le matériel irréparable ne peut être remis en fonctionnement. On définit alors la MTTF (Mean Time To Failure) : moyenne des temps jusqu'à la défaillance. La vie d'un tel matériel irréparable peut être décrite à l'aide de chronogramme suivant (Voir Figure 4.4) :

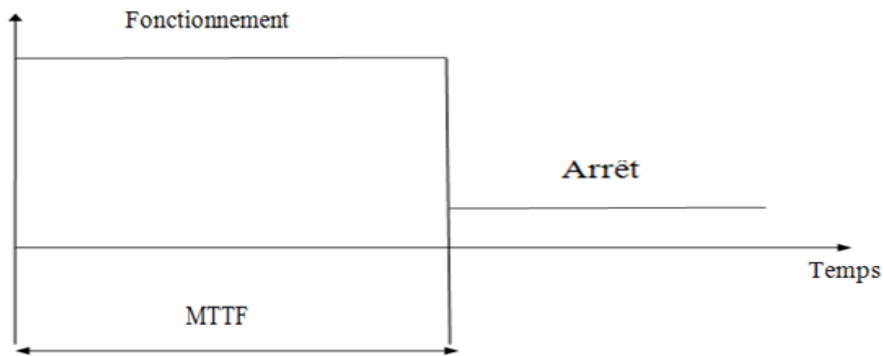


FIGURE 2.3 – Chronogramme d'un matériel irréparable.

### 2.2.5 Indices de fiabilité

**Définition 2.2.1.** On appelle durée de vie du système, l'intervalle de temps entre la mise en exploitation jusqu'à la première défaillance. Cette durée de vie  $T$  sera assimilée à une variable aléatoire non négative, définie sur un espace probabilisé  $(\Omega, A, P)$  [2].

La fiabilité peut être évaluée à l'aide de plusieurs indices, parmi lesquels on peut citer :

► **Fonction de fiabilité (de survie)** [6]

Elle est exprimée par la fonction du temps :

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T > t) = P(\text{dispositif fonctionne encore a l'instant } t) \\ &= 1 - P(T \leq t) = 1 - F(t). \end{aligned} \quad (2.4)$$

En, générale elle est décroissante sur  $\mathfrak{R}^+$  et elle représente la probabilité pour que le système fonctionne sans défaillance au cours de l'intervalle  $[0, t]$ .

La fonction de répartition de la variable aléatoire  $T$ ,

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - R(t), \quad (2.5)$$

indique la probabilité qu'une panne se produise dans  $[0, t]$ , c'est-à-dire que le dispositif ne fonctionne plus à l'instant  $t$ .

On admettra que  $F(t)$  est continue et dérivable :  $f(t) = F'(t)$

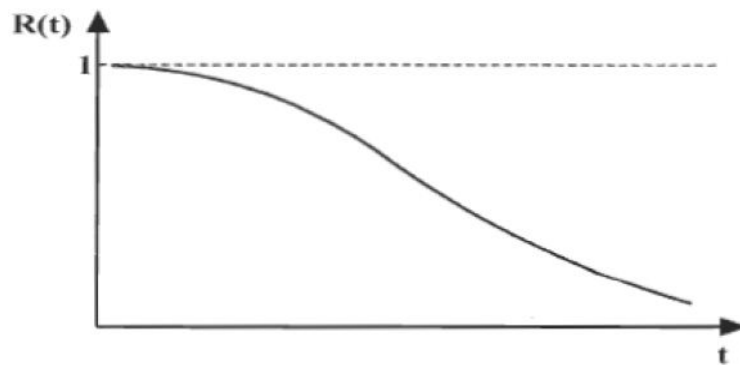


FIGURE 2.4 – Fonction de fiabilité.

\* **MTTF ” Mean Time To failure ”** : L'une des caractéristiques probabiliste moyenne est le MTTF, traduit comme le temps moyen de bon fonctionnement jusqu'à la première panne. Si  $MTTF < +\infty$  alors,

$$E(T) = \int_0^{\infty} t dF(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt. \quad (2.6)$$

► **Taux de défaillance instantané (Failure rate)** [1]

Soit l'événement :

$A_{t,t+h} = \{\text{l'élément fonctionne sans défaillance durant l'intervalle } [t, t+h]\}$ .

La probabilité pour que l'élément fonctionne sans défaillance au cours de l'intervalle  $[t, t+h]$  sachant qu'il n'est pas tombé en panne jusqu'à l'instant  $t$  est :

$$R(t, t+h) = P(A_{t,t+h}/A_{0,t}) = \frac{P(A_{t,t+h}, A_{0,t})}{P(A_{0,t})}$$

$$= \frac{P(A_{0,t+h})}{P(A_{0,t})} = \frac{R(t+h)}{R(t)} ;$$

La probabilité de panne au cours de l'intervalle  $[t, t+h]$  est :

$$F(t, t+h) = 1 - R(t, t+h) = \frac{R(t) - R(t+h)}{R(t)} ;$$

On appelle taux de défaillance, la fonction  $\lambda(t)$  :

$$\lambda(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \left( \frac{F(t, t+h)}{h} \right) = \frac{-R'(t)}{R(t)} ; \quad (2.7)$$

La notion du taux de défaillance représente la probabilité de panne dans l'intervalle infiniment petit  $[t, t+h]$  sachant qu'il a fonctionné sans défaillance jusqu'à l'instant  $t$ .

### 2.2.6 Spécificité de la fiabilité en mécanique

[21] Dans ce paragraphe, nous abordons la spécificité des composants mécaniques dans les études des durées de vie, nous mettons en évidence certains paramètres pouvant influencer l'évaluation de leur fiabilité.

#### Les différentes phases du cycle de vie d'un produit

L'évolution du taux de défaillance d'un produit pendant toute sa durée de vie est caractérisée par ce qu'on appelle en analyse de fiabilité la courbe en baignoire. (figure 4.6) Le taux de défaillance est élevé au début de la vie du dispositif. Ensuite, il diminue assez rapidement avec le temps (taux de défaillance décroissant), cette phase de vie est appelée période de jeunesse. Après, il se stabilise à une valeur qu'on souhaite aussi basse que possible pendant une période appelée période de vie utile (taux de défaillance constant). A la fin, il remonte lorsque l'usure et le vieillissement font sentir leurs effets, c'est la période de vieillissement (taux de défaillance croissant) :

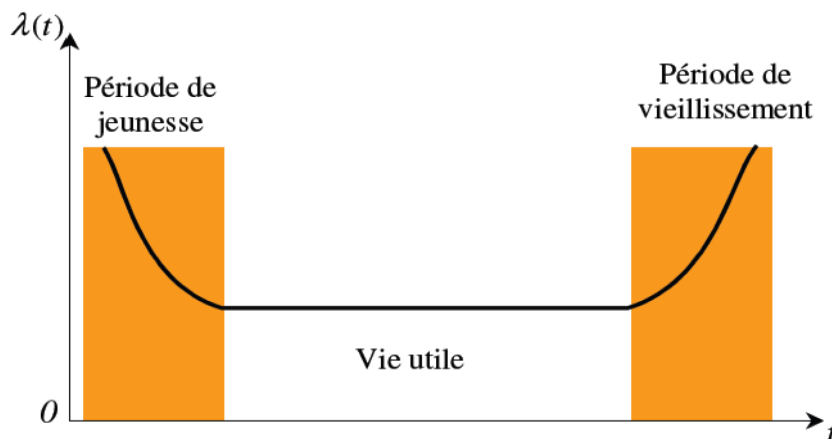


FIGURE 2.5 – Courbe en baignoire.

De nombreux éléments, tels que les composants électroniques, ont un taux de défaillance qui évolue de cette manière là.

Pour souligner la particularité des composants mécaniques dans l'analyse de la fiabilité par rapport aux composants électroniques, nous allons comparer l'évolution du taux de défaillance dans les deux cas.

### Taux de défaillance pour des composants électroniques

L'expérience a montré que pour des composants électroniques la courbe, représentant le taux de défaillance en fonction du temps  $t$ , a la même allure que la courbe en baignoire (figure 2.5). Elle est donc composée de trois phases :

#### 1. Phase 1

La première phase définit la période de jeunesse, caractérisée par une décroissance rapide du taux de défaillance. Pour un composant électronique cette décroissance s'explique par l'élimination progressive de défauts dus aux processus de conception ou de fabrication mal maîtrisés ou à un lot de composants mauvais. Cette période peut être minimisée pour les composants vendus aujourd'hui. En effet, les fabricants de composants électroniques se sont engagés à vérifier la qualité de leurs produits en sortie de fabrication.

#### 2. Phase 2

La deuxième phase définit la période de vie utile généralement très longue. Le taux de défaillance est approximativement constant. Le choix de la loi exponentielle, dont la propriété principale est d'être sans mémoire, est tout à fait satisfaisant. Les pannes sont dites aléatoires, leur apparition n'est pas liée à l'âge du composant mais à d'autres mécanismes d'endommagement. Les calculs prévisionnels de fiabilité se font presque souvent dans cette période de vie utile .

### 3. Phase 3

La dernière phase est la période de vieillissement, elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance avec l'âge du dispositif. Ceci est expliqué par des phénomènes de vieillissement tels que l'usure, l'érosion, etc. Cette période est très nettement au-delà de la durée de vie réelle d'un composant électronique. Parfois, on réalise des tests de vieillissement accélérés pour révéler les différents modes de défaillance des composants.

#### Taux de défaillance pour des composants mécaniques

Les composants mécaniques sont soumis, dès le début de leur vie, au phénomène d'usure ou de vieillissement. Si on trace la courbe du taux de défaillance, en fonction du temps, on obtient une courbe qui ne présente pas le plateau de la figure 2.3 ; la période de vie utile (taux de défaillance constant) n'existe pas ou elle est réduite. Le taux de défaillance du dispositif est une fonction non linéaire du temps et ceci dans chaque phase de sa vie (voir figure 2.6, [Doyle, 1992], [McLean, 2000]) :

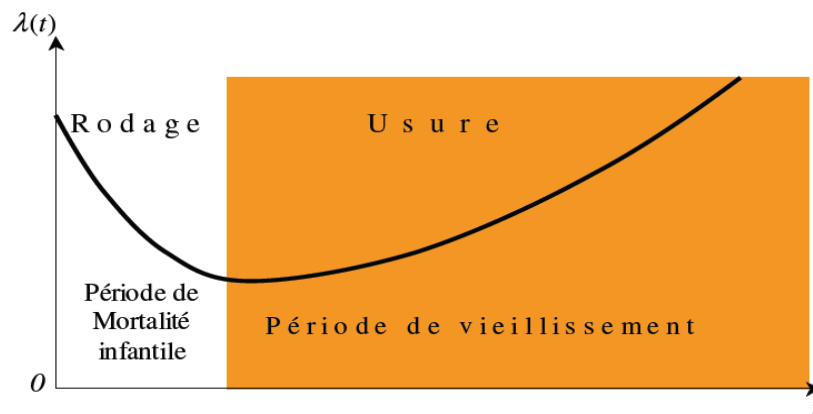


FIGURE 2.6 – La courbe du taux de défaillance en mécanique.

- La première phase définit la période de mortalité infantile. C'est une durée de vie en principe très courte. Elle est décrite par une décroissance progressive du taux de défaillance avec le temps dû à une amélioration des caractéristiques internes (caractéristiques de défauts) et des interfaces, par un rodage préalable des pièces. Par conséquent il n'est pas souhaitable de tester les composants mécaniques dans cette période de leur vie.
- La dernière phase définit la période de vieillissement qui comporte la majorité de la vie du dispositif. Elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance. Les pièces mécaniques sont soumises à des phénomènes de vieillissement multiples qui peuvent agir en combinaison : corrosion, usure, déformation, fatigue, et finalement perte

de résilience ou fragilisation.

Contrairement aux composants électroniques les calculs de la fiabilité pour des composants mécaniques se font essentiellement dans la période de vieillissement, en utilisant des lois de probabilité dont le taux de défaillance est fonction du temps telles que la loi Log-normale, Weibull, etc.

### 2.2.7 Fiabilité des systèmes

La fiabilité d'un système complexe se mesure en fonction de celles de ses composants élémentaires. Selon l'incidence de la défaillance de l'un de ses composants sur l'état du système, on distingue trois configurations :

#### 1. Configuration série (sans redondance) [10]

Un système en série ne fonctionne que si tous ses éléments fonctionnent. Il ne présente donc aucune redondance ; la défaillance d'un élément quelconque entraîne inévitablement la défaillance du système. Il en résulte que :

$$T = \min(T_1, T_2, \dots, T_n),$$

d'où

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T > t) = P(T_1 > t \text{ et } \dots \text{ et } T_n > t) \\ &= \prod_{k=1}^n P(T_k > t) = \prod_{k=1}^n R_k(t). \end{aligned} \quad (2.8)$$

On peut déduire à partir de la formule précédente que la durée de vie du système en série est plus fiable que celle du composant le moins fiable.

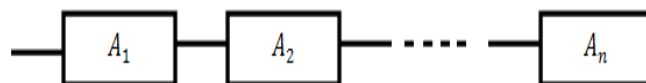


FIGURE 2.7 – Configuration série.

#### 2. Configuration parallèle [6]

Un système en parallèle fonctionne si au moins un de ses éléments fonctionne. Une défaillance ne se produit donc que si tous les éléments sont défaillants. Il en résulte que

$$T = \max(T_1, T_2, \dots, T_n),$$

d'où

$$\begin{aligned} F(t) &= P(T \leq t) = P(T_1 \leq t \text{ et } \dots \text{ et } T_n \leq t) \\ &= \prod_{k=1}^n P(T_k \leq t) = \prod_{k=1}^n F_k(t). \end{aligned}$$

ou encore

$$R(t) = 1 - \prod_{k=1}^n [1 - R_k(t)]. \quad (2.9)$$

La fiabilité d'un système en parallèle est donc supérieure à celle du composant le plus fiable.

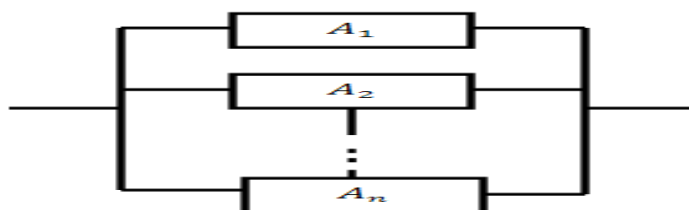


FIGURE 2.8 – Configuration parallèle.

### 3. Configuration k parmi n [10]

Un système k-de-n fonctionne si au moins  $k$  de ses  $n$  éléments fonctionnent. Si en particulier ces éléments ont la même fiabilité  $R_1(t)$ , le nombre d'éléments non défectueux à l'instant  $t$  obéit à une binomiale et l'on trouve :

$$R(t) = \sum_{i=k}^n C_i^n R_i(t) [1 - R_i(t)]^{n-i}. \quad (2.10)$$

## 2.2.8 Disponibilité

[2] Soit  $X(t)$  une variable aléatoire décrivant l'état d'un élément avec :

$$X(t) = \begin{cases} 1, & \text{si l'élément fonctionne;} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

On appelle  $D(t)$  la disponibilité de l'élément à l'instant  $t$ . C'est la probabilité que l'élément fonctionne à cet instant :

$$D(t) = P(X(t) = 1) = E(X(t)).$$

**Théorème 2.5.1** Soit

$$\begin{aligned} L(t) &= P(S_i + S'_i < t) \\ H(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} L^n(t) \end{aligned}$$

où

$L^n$  :Produit de convolution d'ordre  $n$  de  $L(t)$ .

✓ La disponibilité à l'instant  $t$ , s'exprime sous la forme :

$$D(t) = R(t) + \int_0^t R(t-X)dH(X) \quad (2.11)$$

✓ La disponibilité limite vaut :

$$D = \lim_{t \rightarrow \infty} D(t) = \frac{E(S_i)}{E(S_i) + E(S'_i)} \quad (2.12)$$

## 2.3 Les données de retour d'expérience

[23, 11] Lorsqu'on désire déterminer les paramètres de fiabilité d'un matériel donné, il est souvent préférable de recourir aux données du retour d'expérience. En effet, il n'est pas toujours possible d'effectuer des essais de fiabilité du fait que ceux-ci s'avèrent parfois longs et coûteux. Par ailleurs, les données de retour d'expérience offrent l'intérêt de permettre une modélisation du comportement du matériel beaucoup plus proche de la réalité, car elles intègrent les erreurs humaines d'utilisation et de maintenance, ce qui n'est pas le cas des essais de fiabilité.

Les données du retour d'expérience se répartissent en :

### 2.3.1 Données complètes

Il s'agit du cas le plus informatif, où les instants de défaillance et la date de mise en service de chacune des unités de l'échantillon soumis à l'analyse sont connus.

### 2.3.2 Données censurées

Dans la pratique, on est souvent confronté aux situations suivantes :

- Certains équipements, sont retirés de l'exploitation avant la fin de la période d'observation ;
- A la fin de la période d'observation, certains équipements sont encore en état de bon fonctionnement ;

- Les équipements ne sont pas forcément suivis depuis leurs mise en service initiale ;

Certaines durées de vie sont alors incomplètes, néanmoins il n'y a pas de raison de ne pas tenir compte dans le traitement statistique des durées de vie, notamment dans le cas où le nombre de données complètes est restreint. Les omettre seraient se départir d'une quantité non négligeable de l'information.



Les différents types de données censurées sont :

**a) Données censurées à droite**

Il s'agit du cas où :

- Les unités de l'échantillon soumis à l'analyse ont toutes le même âge ;
- A la fin de la durée d'observation, certaines entités de l'échantillon sont encore en état de bon fonctionnement ;
- Les instants de défaillance des éléments hors fonctionnement sont connus.

**b) Données censurées simples à gauche**

Il s'agit du cas où :

- Les éléments ne sont pas suivis depuis leurs mises en service, mais seulement à partir d'un moment  $T$  ;
- Les instants de défaillance de tous les éléments sont connus.

**c) Données censurées multiples à droite**

Il s'agit du cas où :

- Les âges des unités de l'échantillon sont différents ;
- Certaines unités sont encore en état de bon fonctionnement à la fin de la durée d'observation ;
- Les instants de défaillance des unités hors fonctionnement sont connus.

**d) Données censurées multiple à gauche**

Il s'agit du cas où :

- Les instants de défaillance de chacune des unités de l'échantillon sont connus ;
- Il existe dans l'échantillon des unités dont on ne connaît pas très bien les instants de mise en service.

**e) Données censurées multiples à gauche et à droite**

Il s'agit du cas fréquent dans la pratique qui regroupe les deux situations de censure multiples à gauche et à droite.

## 2.4 Modèles paramétriques de fiabilité

Dans ce qui suit nous présentons les principaux modèles paramétriques de fiabilité pour lesquelles nous retracerons les principales étapes : Choix du modèle, estimation des paramètres du modèle ainsi que sa validation.

### 2.4.1 Choix du modèle

[24, 14, 11] Le choix d'une loi à priori constitue la première étape de la modélisation. Ce choix dépend du type du matériel à étudier. Ainsi, les pièces mécaniques sont souvent bien modélisées par la loi de Weibull. La loi de exponentielle caractérise les systèmes électroniques et électriques mais aussi les systèmes complexes composés d'éléments d'âge différents.

#### ✂ Loi exponentielle [11]

C'est la loi la plus répondue dans le domaine de la fiabilité que ce soit sur le plan pratique ou théorique. En pratique c'est le meilleur modèle pour les défaillances du matériel électronique. Elle modélise aussi la période de vie utile des matériels, caractérisée par des défaillances aléatoires avec une probabilité constante d'apparition, ainsi que les matériels complexes constitués de composants de différents âges. Sur le plan théorique, l'hypothèse d'exponentialité simplifie énormément les calculs.

##### ► Densité de probabilité :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad t \geq 0, \lambda > 0 \quad (2.13)$$

##### ► Fonction de répartition

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad t \geq 0, \lambda > 0 \quad (2.14)$$

##### ► Fonction fiabilité

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad t \geq 0, \lambda > 0 \quad (2.15)$$

##### ► Caractéristiques

###### • Taux de défaillance

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

###### • Espérance

$$E(t) = \frac{1}{\lambda}$$

###### • Variance

$$V(t) = \frac{1}{\lambda^2}$$

► **Présentation graphique**

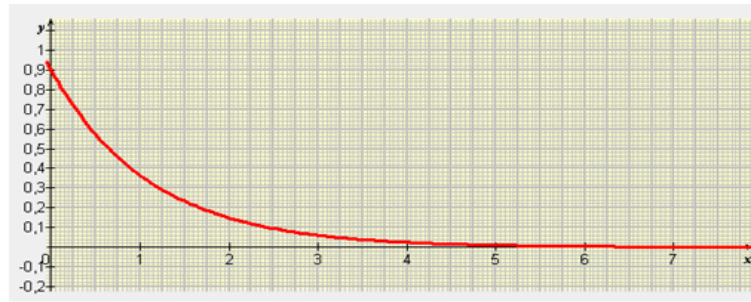


FIGURE 2.9 – La densité de la loi exponentielle.

✂ **Loi de Weibull [11, 7]**

La loi Weibull est la plus utilisée en fiabilité, en particulier dans le domaine de la mécanique. Cette loi a l'avantage d'être souple et de pouvoir s'ajuster à différents résultats d'expérimentation. Elle permet de représenter les différentes phases de vie d'un matériel : jeunesse, vie utile et vieillesse.

La loi Weibull est une loi connue à trois paramètres  $\gamma$ ,  $\eta$ ,  $\beta$  :

- ✓  $\gamma$  : paramètre de position ;
- ✓  $\eta$  : paramètre de l'échelle ( $\eta > 0$ ) ;
- ✓  $\beta$  : paramètre de forme ( $\beta > 0$ ).

Si  $\beta < 1$  : le taux de défaillance décroît en fonction de t, ce qui correspond à la période de jeunesse des matériels dans la courbe en baignoire.

Si  $\beta = 1$  : le taux de défaillance est constant en fonction de t, ce qui correspond à la période de vie utile des matériels dans la courbe en baignoire.

Si  $\beta > 1$  : le taux de défaillance est croissant en fonction de t, ce qui correspond à la période de vieillesse des matériels dans la courbe en baignoire, c'est là qu'il faudra intervenir de façon préventive. Pour  $\beta > 3$ , la loi Weibull se rapproche de la loi Normale.

► **Fonction de densité**

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{x - \gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} e^{-\left[ \frac{x-\gamma}{\eta} \right]^\beta} \quad (2.16)$$

avec  $x - \gamma > 0$ .

$\beta$  : Paramètre de forme (sans unités).

$\eta$  : Paramètre d'échelle (unité de temps).

$\gamma$  : Paramètre de position (unité de temps).

► **Fonction de répartition**

$$F(x) = 1 - e^{-\left( \frac{x-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (2.17)$$

► **Fonction fiabilité**

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \tag{2.18}$$

► **Caractéristiques**

• **Espérance mathématique**

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x) dx = \gamma|\eta * \Gamma(1 + \beta)$$

$\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$  est la fonction Gamma

• **Variance**

$$V(x) = E(X^2) - E^2(X) = \eta^2[\Gamma(1 + \frac{2}{\beta}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{\beta})]$$

• **Taux de défaillance**

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

► **Présentation graphique**



FIGURE 2.10 – La densité de la loi Weibull.

✂ **Loi Normale [11]**

L'intérêt de la loi Normale réside dans le fait qu'elle est la distribution limite de plusieurs lois de probabilité. En fiabilité, elle représente la fin de vie des systèmes vieillissants sous l'effet de l'usure, la fatigue, la corrosion...etc. Elle possède deux paramètres  $m, \sigma$  et elle est continue et symétrique.

► **Densité de probabilité**

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < t < +\infty \tag{2.19}$$

► **Fonction de répartition**

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u-m)^2}{2\sigma^2}} du \quad (2.20)$$

► **Caractéristiques**

• **Espérance**

$$E(t) = m$$

• **Variance**

$$V(t) = \sigma^2$$

► **Présentation graphique**

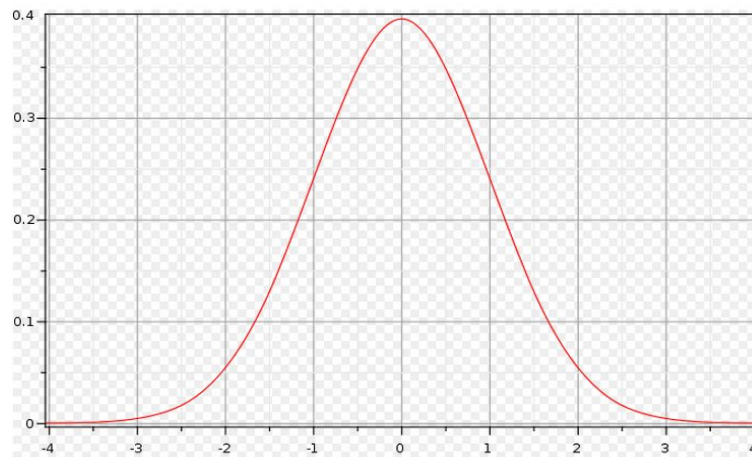


FIGURE 2.11 – La densité de la loi Normale.

✂ **Loi Gamma [13]**

La loi Gamma est une loi à deux paramètres : le paramètre d'échelle  $\lambda$  et le paramètre de forme  $\beta$ . Selon les valeurs de ces deux paramètres, on peut se ramener à des loi classiques, notamment la loi exponentielle, la loi de Khi-Deux...

► **Densité de probabilité**

$$f(t) = \frac{1}{\lambda^\beta \Gamma(\beta)} t^{\beta-1} e^{(-\frac{t}{\lambda})} \quad , t \geq 0 \quad (2.21)$$

► **Fonction de répartition**

$$F(t) = \int_0^t \frac{u^{\beta-1}}{\lambda^\beta \Gamma(\beta)} e^{(-\frac{u}{\lambda})} du \quad (2.22)$$

► **Caractéristiques**

- **Espérance**

$$E(t) = \beta\lambda$$

- **Variance**

$$V(t) = \beta\lambda^2$$

avec  $t \geq 0, \lambda > 0, \beta > 0$ .

► **Présentation graphique**

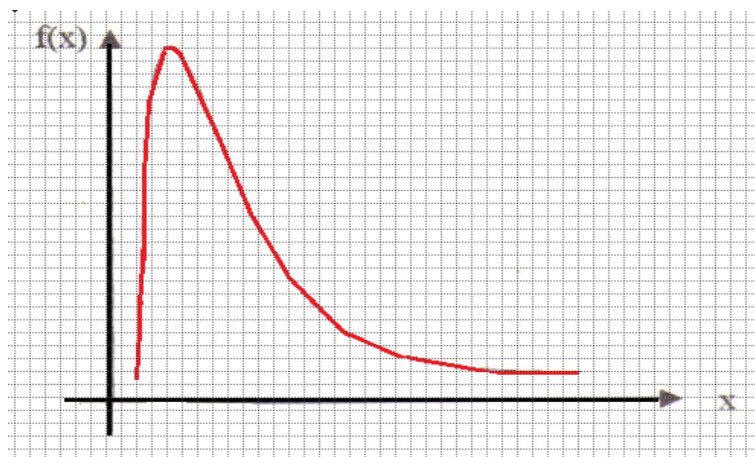


FIGURE 2.12 – La densité de la loi Gamma.

### 2.4.2 Estimation des paramètres des lois

Lorsque on désire estimer les paramètres  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)$  d'une loi de probabilité, on souhaite déterminer une valeur  $\hat{\theta}$  qui ne soit pas très éloignée de la valeur inconnue  $\theta$ . Le choix parmi les estimateurs possibles devra se faire en fonction des propriétés de chacun.

✂ **Méthode de Maximum de Vraisemblance MLE [5]**

C'est la valeur de  $\theta$  qui maximise la vraisemblance  $L(x, \theta)$  qui est donnée par :

$$L(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n f_i(x) \quad f_i(x) \text{ est la loi de } X. \quad (2.23)$$

$$L(\hat{\theta}) = \text{Sup}_{\theta \in \Theta} L(x, \theta) \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \quad (2.24)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \log L(x, \theta)}{\partial \theta} = 0 & \text{Pour trouver } \hat{\theta} \\ \frac{\partial^2 \log L(x, \theta)}{\partial \theta^2} < 0 & \text{Pour assurer que c'est un maximum} \end{cases} \quad (2.25)$$

Si on a plusieurs paramètres  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$  à estimer alors on va résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial \log L(x, \theta_1)}{\partial \theta_1} = 0 \\ \frac{\partial \log L(x, \theta_2)}{\partial \theta_2} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial \log L(x, \theta_n)}{\partial \theta_n} = 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

✂ **Méthode des moments** [25]

Soit le  $t^{eme}$  moment de  $f(T, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i)$ , on a :

$$\mu'_t = \int_{-\infty}^{+\infty} T^t(T, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i) dt \tag{2.27}$$

avec  $f(T, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i)$  la fonction de densité de probabilité de la variable aléatoire T et  $\theta_i$  les paramètres de la fonction.

Les premiers moments  $m'_t$  à partir de l'échantillon  $(t_1, t_2, \dots, t_n)$  sont donné par :

$$m'_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n nT_i^t \tag{2.28}$$

Les valeurs des paramètres  $\theta_i$  sont la solution du système d'équation :

$$\begin{cases} \mu'_1 = m'_1, \\ \mu'_2 = m'_2, \\ \mu'_3 = m'_3, \\ \mu'_4 = m'_4. \end{cases} \tag{2.29}$$

### 2.4.3 Validation des modèles : Tests d'ajustement

Ce type de test traite des méthodes qui permettent de choisir entre deux hypothèses.

► **Règle de décision**

La décision de l'hypothèse  $H_0$  est notée D. D est alors appelée **région de rejet** de  $H_0$  ou **région critique**

- Si  $x \in D \Rightarrow$  On rejette  $H_0$ .
- Si  $x \in D^c \Rightarrow$  On ne rejette pas  $H_0$ .

✂ **Test de Khi-Deux** [26]

Soit  $X_1, X_2, \dots, X_n$  un n-échantillon issu d'une variable aléatoire X.

On partage le domaine D de la variable X, partie de l'ensemble des réels  $\mathfrak{R}$ , en r classes  $C_1, C_2, \dots, C_r$ .

Généralement on prend  $r \approx \sqrt{n}$ .

Soit :

$n_i$  : l'effectif de la classe  $C_i$

$p_i$  : probabilité de se trouve dans la classe  $C_i$ . Elle est deduite à partir de la loi de probabilité à tester.

$np_i$  : effectif théorique de la calsse  $C_i$

Pearson a démontré que la variable aléatoire :

$$K_n^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(N_i - np_i)^2}{np_i} \tag{2.30}$$

Suit asymptotiquement un Khi-Deux à  $(r - 1)$  degrés de liberté.  $N_i$  étant la variable aléatoire représentant l'effectif de classe  $C_i$  et dont la réalisation est  $n_i$ .

Soit  $k_n^2$  la réalisation de la variable aléatoire  $K_n^2$ , la règle de décision est alors :

Si  $k_n^2 < X_{(r-1, \alpha)}^2$ , on accepte l'ajustement de la variable aléatoire  $X$  par la loi choisie.

Si  $k_n^2 > X_{(r-1, \alpha)}^2$ , on rejette l'ajustement de la variable aléatoire  $X$  par la loi choisie.

Lorsque les paramètres de la loi à valider sont estimés à partir de l'échantillon, le degré de liberté du Khi-Deux est alors égal à  $(r - q - 1)$ ,  $q$  étant le nombre de paramètres estimés.

L'application du test du Khi-Deux doit satisfaire les conditions suivantes :

1. Le nombre de classes doit être supérieur ou égal à 7 ;
2. L'effectif théorique  $np_i$  de chaque classe doit être supérieur ou égal à 8 ;
3. Les effectifs théoriques des  $r$  classes doivent être sensiblement égaux.

✂ **Test de Kolmogorov Smirnov** [5, 26]

Soit  $X_1, X_2, \dots, X_n$  un n-échantillon, issu d'une variable aléatoire  $X$ , que l'on veut ajuster par une loi théorique  $F_0(x)$ . Soit  $F_n$  sa fonction empirique.

Kolmogorov a démontré que la variable aléatoire :

$$D_n = \max_{x \in \mathcal{R}} |F_n(x) - F_0(x)| \tag{2.31}$$

suit asymptotiquement une loi indépendante de  $F_0$  :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} P(\sqrt{n}D_n < x) = K(x) \tag{2.32}$$

Avec :

$$\begin{cases} K(x) = 0, & \text{si } x \leq 0; \\ K(x) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} (-1)^j e^{-2j^2 x^2}, & \text{si } x > 0. \end{cases} \tag{2.33}$$

Cette fonction est tabulée (table de Kolmogorov).

Soit  $d(\alpha)$  la valeur tabulée telle que  $P(D_n > d(\alpha)) = \alpha$ .

La règle de décision est alors :

Si  $D_n > d(\alpha)$ , on rejette l'ajustement de la variable aléatoire  $X$  par la loi choisie.

Si  $D_n < d(\alpha)$ , on accepte l'ajustement de la variable aléatoire  $X$  par la loi choisie.



# Principaux modèles de la maintenance préventive

## Introduction

Par souci de rentabilité économique, l'industrie se trouve confronté à un problème de prise de décision (quelle est la politique de maintenance qui nous permet de dégager des gains?). La théorie de renouvellement est toute indiquée pour trouver une réponse à cette question. Elle propose plusieurs modèles d'optimisation en fonction de la politique de maintenance adoptée.

Le présent chapitre illustre les principaux modèles de la maintenance préventive proposée par Ilya Gertsbakh.

## 3.1 Processus de renouvellement

[3] Soit un élément mis en fonctionnement à la date  $t_0 = 0$ . Il fonctionne jusqu'à la date  $t_1$  où il tombe en panne. Il est alors remis neuf instantanément (durée de renouvellement nulle). Le nouveau élément tombe en panne au bout d'un temps  $t_2$ , est remplacé par un troisième et le processus se poursuit. Nous nous intéresserons essentiellement au nombre de pannes qui apparaissent dans un intervalle de temps donné.

On suppose que les instants de défaillances  $t_0, t_1, t_2 \dots$  sont indépendantes et ont la même distribution de probabilité  $F(t)$ . Ils sont appelés inter-arrivés et constituent un processus de renouvellement.

**Définition 3.1.1.** Soit un flot d'évènements aléatoires  $\{t_n, n \geq 1\}$  :

$$t_1 = w_1, t_2 = w_1 + w_2, \dots, t_n = \sum_{i=1}^n w_i \quad (3.1)$$

tel que

1. Les variables aléatoires  $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  forment une suite de variables aléatoires indépendantes, non toutes nulles, avec une probabilité égale à 1.

2. Les variables aléatoires  $(w_i)_{i \geq 1}$  sont identiquement distribuées :

$$P(w_i < t) = F(t), i = 1, \dots, n$$

Le flot  $\{w_n = t_n - t_{n-1}, n \geq 1, t_0 = 0\}$  est appelé processus de renouvellement.

### 3.1.1 Nombre de renouvellement

[3, 13]

**Définition 3.1.2.** La variable aléatoire  $N(t)$ , égale au nombre de renouvellement au cours de l'intervalle  $[0, t]$  est appelée variable aléatoire de renouvellement :

$$N(t) = \text{Max}\{k, t_k \geq 0\} \quad (3.2)$$

$$N(t) = 0 \quad \text{si } w_i > 1. \quad (3.3)$$

Avec  $w_1 = t_1 - t_0$

Le processus  $\{N(t), t \geq 0\}$  est également appelé processus de renouvellement.

Les instants de renouvellement sont définis par la relation récurrente suivante :

$$\begin{cases} t_0 = 0; , \\ t_n = t_{n-1} + w_n. \quad n > 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

$w_n$  : durée de vie de  $n^{\text{eme}}$  élément.

$$\begin{aligned} P(N(t) = n) &= p(t_n < t, t_{n+1} > t) \\ &= P(t_n < t).P(t_{n+1} > t) \\ &= P(t_n < t).(1 - P(t_{n+1} > t)) \\ &= P(t_n < t) - P(t_n < t).P(t_{n-1} < t) \\ &= P(t_n < t) - P(t_{n+1} < t) \\ &= P(w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n < t) \\ &\quad - P(w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n + w_{n+1} < t) \\ &= F^n(t) - F^{n+1}(t). \end{aligned} \quad (3.5)$$

$F^n(t)$  : Produit de convolution d'ordre n pour la fonction  $F(t)$  (c'est la fonction de répartition de la somme de n variable aléatoires indépendantes de même fonction de répartition F)

### 3.1.2 Fonction de renouvellement

[3]

**Définition 3.1.3.** On appelle fonction de renouvellement  $H(t)$  le nombre moyen de renouvellement au cours de l'intervalle  $[0, t]$ .

La fonction  $H(t)$  est solution de l'équation intégrale du renouvellement :

$$H(t) = F(t) + \int_0^t H(t-x)df(x) \quad (3.6)$$

✓ La fonction :  $h(t) = H'(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f^n(t)$ , est appelée densité de panne ou de renouvellement. C'est la probabilité inconditionnelle d'occurrence d'une panne au cours de  $[t, t + dt]$ .

✓ La fonction de renouvellement joue un rôle important dans la théorie de renouvellement. Elle trouve de nombreuses applications en théorie de fiabilité, mais elle ne peut être obtenue sous sa forme explicite que dans des cas rares. Dans la pratique cette fonction est approchée en utilisant les théorèmes limités de renouvellement.

## 3.2 Maintenance et optimisation

✂ **La maintenance** [23]

La maintenance est toute activité nécessaire pour empêcher la défaillance et maintenir un élément en état de bon fonctionnement.

### 3.2.1 Objectif de la maintenance

Les principaux objectifs de la maintenance sont :

- Optimiser la fiabilité du matériel ;
- Assurer continuellement le bon état de marche des installations dans les meilleures conditions de qualités, de délai et de prix de revient ;
- Augmenter la capacité de production par modification ou par installations nouvelles ;
- Améliorer la sécurité du travail ;
- Former le personnel dans les spécialités spécifiques à la maintenance.

### 3.2.2 Les différentes formes de la maintenance

[22] Les différentes formes de la maintenance peuvent être représenté dans l'organigramme suivant (figure 3.1) :

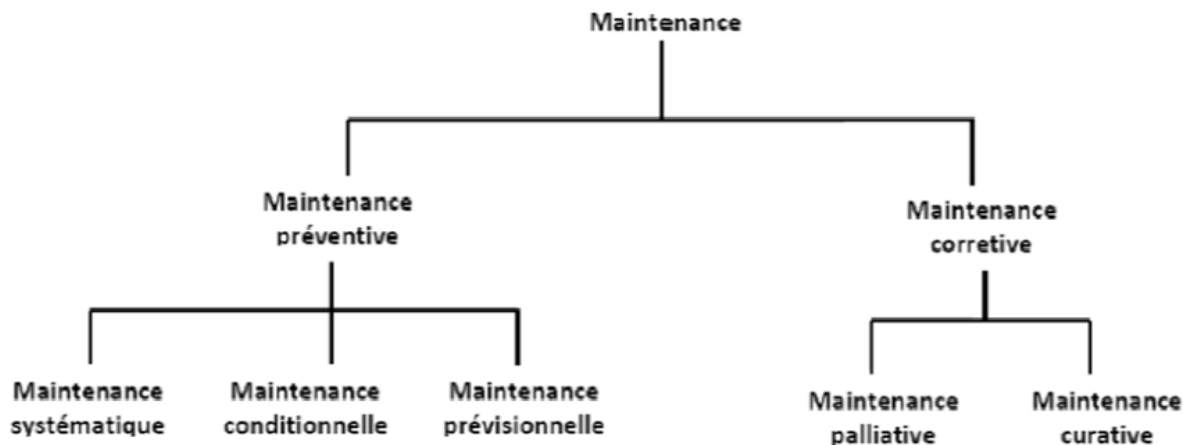


FIGURE 3.1 – Organisation de la maintenance.

### 1. La 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. On aura deux formes de maintenance dite préventive :

- a) **Maintenance préventive systématique** : Elle est effectuée selon un échéancier établis, selon le temps ou le nombre d'unités d'usages ; ce type de maintenance s'adresse à des éléments provoquant une perte de production ou des coûts d'arrêts imprévisibles classés comme importants pour l'entreprise.
- b) **Maintenance préventive conditionnelle** : La maintenance préventive conditionnelle convient pour des matériels coûtant chers en remplacement et pouvant être surveillés par des méthodes non destructives (Analyse de vibration, de huile, de la température).

La mise en pratique de cette maintenance nécessite de décomposer les sous systèmes en éléments maintenable. Ces éléments doivent être visités ou chargés régulièrement. La périodicité de ses visites s'établir par l'étude des lis de durée de vie. Des programmes d'entretien sont élaborés de façon à préciser le travail à exécuter par l'équipe de maintenance.

### 2. La maintenance corrective

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

### 3.2.3 Détermination des coûts

[4] La détermination des coûts revient à faire un bilan : coût d'entretien et coût de défaillance.

#### a) Coût de défaillance " $C_d(T)$ "

Il se compose des coûts suivants :

- *Perte de production*  $P_p(T)$  : connaissant le temps d'arrêt  $T$  et le coût horaire  $ch$  (ce que produit l'atelier en heure), la perte de production est estimée de la façon suivante :  $P_p = T.ch$
- *Perte d'amortissement*  $P_a(T)$  : c'est la perte de l'amortissement des matériels en panne.
- *Energie consommée*  $P_e(T)$  : c'est une pure perte.

D'où le coût de défaillance  $C_d(T)$  sera :  $C_d(T) = P_p(T) + P_a(T) + P_e(T)$

#### b) Coût du préventif " $C_p(T)$ " : il se compose des coûts suivants :

- *Coût des salaires*  $C_s(T)$  ;
- *Coût d'amortissement*  $C_a(T)$  : amortissement du matériel d'entretien ramené à l'heure ;
- *Coût des pièces et matières*  $C_m(T)$ . D'où le coût de défaillance  $C_p(T)$  sera :  $C_p(T) = C_s(T) + C_a(T) + C_m(T)$

## 3.3 Principaux modèles de la maintenance préventive

[12] Les modèles que nous décrivons sont centraux aux applications de la théorie de maintenance préventive. Nous décrirons la politique de maintenance préventive et dériverons une expression pour qu'un critère de coût (récompense) caractérise chaque modèle.

### 3.3.1 Remplacement Périodique (de Bloc) - Critère de Coût

Une nouvelle unité commence à fonctionner à  $t = 0$ . À chacun des instants,  $T, 2T, 3T \dots$  l'unité est remplacée par une neuve, de la même population. Ce remplacement, nommé la maintenance préventive (P.M.), coûte  $C$ , où  $C < 1$ . À chaque défaillance qui apparaît entre les PM, l'unité est également remplacée par une neuve. Ce remplacement lors d'une défaillance s'appelle une réparation minimale (ER) et coûte  $C_{ER} = 1$ . Tous les remplacements prennent un temps négligeable. L'information disponible est le c.d.f. de l'unité de bon fonctionnement  $F(t)$ .

La figure 3.2) explique le modèle de remplacement périodique (de bloc).

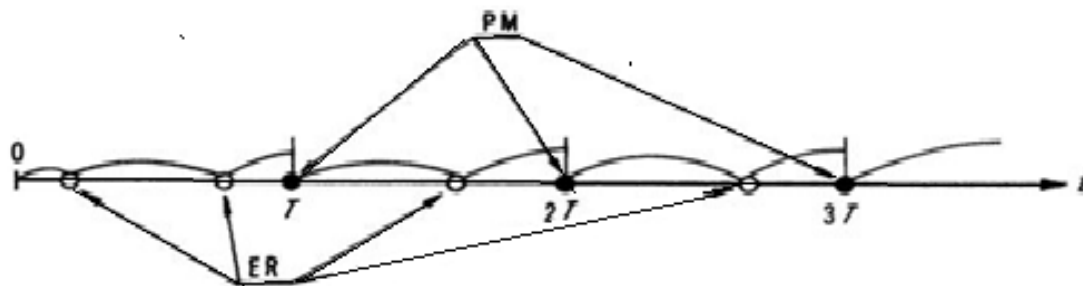


FIGURE 3.2 – Schéma de remplacement périodique

### 3.3.2 Remplacement périodique : Critère de disponibilité

Une nouvelle unité commence à fonctionner à  $t = 0$ . L'axe de temps est un temps de calendrier, qui inclut le fonctionnement et le temps libre. À chaque défaillance, un ER est effectué avec temps de bouts  $t_{ER}$ . Après que toute la recherche de temps opérationnel accumulé  $T$ , un PM est effectué, qui prend  $t_{PM}$ . Les deux politiques ER et PM remplacent complètement l'unité.

Après une PM. Le processus se répète, comme le montre la figure 3.3) . Typiquement,  $t_{PM} \ll t_{ER}$

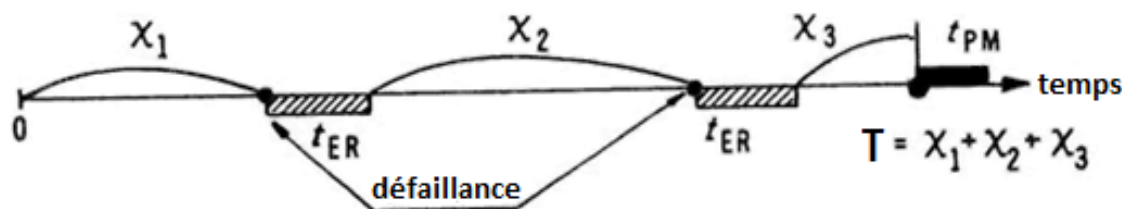


FIGURE 3.3 – Une PM est effectuée après chaque  $T$  unités de temps opérationnel.

Nous nous intéressons à maximiser la disponibilité stationnaire. Le temps moyen de renouvellement est  $T + m(T).t_{ER} + t_{PM}$ . Le temps de bon fonctionnement en cette période est égale à  $T$ . C'est la "récompense" dans notre situation. La moyenne des récompenses par unité de temps de calendrier donne la disponibilité stationnaire :

$$\eta\beta(T) = \frac{T}{T + m(T)t_{ER} + t_{PM}}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par  $T$ , l'expression prend la forme

$$\eta\beta(T) = \frac{1}{1 + t_{ER}\eta_A^*(T)}$$

où  $\eta_A^*(T)$  est le coût du remplacement périodique avec  $C = t_{PM}/t_{ER}$ . Ainsi, maximiser la disponibilité est équivalent à réduire les coûts correspondants.

### 3.3.3 Réparation Périodique de Groupe - Critère de base temps de bon fonctionnement

Un groupe de  $n$  machines de boissons froides situées dans le même bâtiment sont servis selon la règle suivante. A chaque unité de temps  $T$ , elles sont visitées par un technicien qui vérifie l'indisposition des machines, charge les et élimine tous les défauts de fonctionnement. Ce travail "remplace" complètement toutes les machines. Le coût de la visite du technicien est, en moyenne,  $C_p + nC_0$ . On assume que la durée du service est négligeable (la visite peut être faite par exemple la nuit quand les machines ne sont pas en service). Chaque machine fournit un revenu de  $r_i$  par unité de temps de bon fonctionnement et d'une perte, c.à.d un "revenu négatif",  $r_i$  pour chaque unité de son temps libre,  $r_2 < 0$ .

la figure 3.4) illustre le fonctionnement et l'entretien des machines. Nous avons supposé que

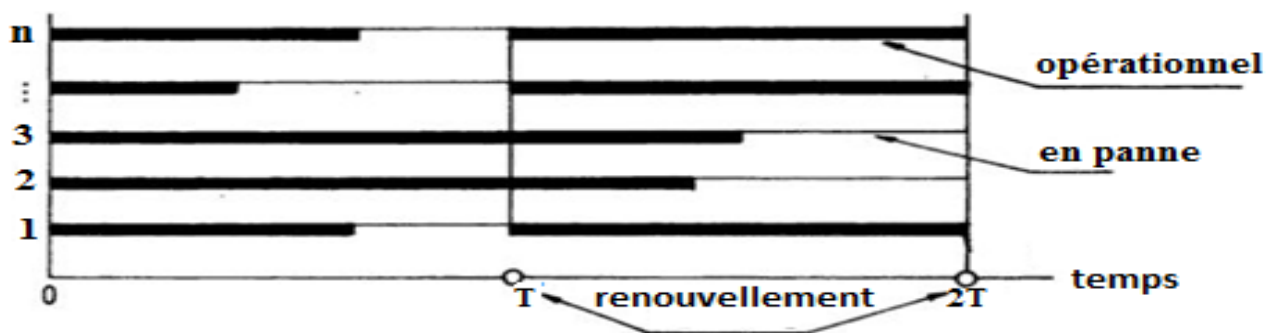


FIGURE 3.4 – Maintenance périodique de  $n$  machines

nous connaissons la distribution du temps de bon fonctionnement  $\tau$  pour chaque machine :  $\tau \sim F(t)$ . Soit  $f(t)$  la fonction de densité correspondante.

Trouvons l'expression pour la récompense moyenne par unité de temps. Notez que nous avons un processus de renouvellement avec la période de renouvellement fixe  $T$ . Une machine tombe en panne dans l'intervalle  $[x, x + dx]$ , avec la probabilité  $f(x)dx$ , pour  $X \in [0, t]$  et ne tombe pas en panne dans  $[0, t]$  avec la probabilité  $1 - F(t)$ . Ainsi la récompense moyenne d'une machine sur l'intervalle  $[0, T]$  est

$$r(T) = \int_0^T (r_1x + r_2(T - x))f(x)dx + r_1T(1 - F(T)) \tag{3.7}$$

Maintenant la récompense par unité de temps des  $n$  machines est évidemment

$$\eta_c(T) = \frac{nr(T) - c_p - nc_0}{T} \quad (3.8)$$

L'expression pour  $\eta_c(T)$  peut être plus simplifiée. Il est recommandé d'effectuer sa recherche numériquement. Il y a typiquement une période optimale  $T^*$  qui maximise la récompense, si  $r_2$  est négatif : si  $T$  est très petit, les visites fréquentes du technicien seront très coûteuses ; si  $T$  est très grand, alors la plupart du temps les machines seront libre. Il est possible d'établir que  $\lim_{T \rightarrow 0} \eta_c(T) = \infty$  et que  $\lim_{T \rightarrow \infty} \eta_c(T) = nr_2$ .

### 3.3.4 Maintenance Préventive périodique avec réparation minimale

#### 1. Réparation minimale avec renouvellement périodique complet

La faiblesse de tous les modèles de maintenance préventifs considérés précédemment était l'acceptation d'un renouvellement complet à la défaillance et à la PM. Le modèle actuel donne une prétention plus réaliste : le ER élimine la défaillance mais ne change pas le taux de défaillance.

Rappelons-nous que le taux de défaillance  $h(t)$  a la signification suivante :

$$h(t)\Delta t \approx P(\text{défaillance}(t, t + \Delta t) \setminus \tau > t).$$

La réparation minimale au temps  $t_0$  élimine (répare) la défaillance mais laisse  $h(t_0)$  sans changement.

Un fait important est le suivant :

**Theoreme :**

Sous la réparation minimale, le nombre moyen de défaillance sur  $[0, T]$  est égal à :

$$H(t) = \int_0^T h(t)dt. \quad (3.9)$$

Nous omettons la preuve, qui est basée sur le fait que pour la réparation minimale les instants de défaillance suivent un processus de Poisson avec le taux de défaillance  $\lambda(t) = h(t)$ . Particulièrement, la probabilité d'absence de défaillances sur  $[0, T]$  égale à  $e^{-H(t)}$ .

Si ER coûte  $C_{ER} = 1$  et PM coûte  $c_{PM} = c$ , donc le coût moyen par unité de temps est

$$\eta_D(T) = \frac{H(t) + c}{T}$$

#### 2. Réparation minimale avec renouvellement partiel

Le renouvellement complet, comme considéré ci-dessus, exige en termes pratiques le remplacement du composant entier (ou le système) par un nouveau, ou une série des actions de réparation qui apporteraient chaque partie du système "à un tout nouvel". Par exemple,



toutes les parties mécaniques seront remplacées par des nouvelles. Ceci n'est pas toujours techniquement faisable. Très souvent, l'activité de réparation périodique améliore le système, mais ne l'apporte pas à tout nouvel état (on appelle ça "Renouvellement partiel").

Il sera maintenant assumé que cette réparation partielle (par exemple la lubrification, le remplacement de parties mal portées, l'ajustement et le réglage d'accord d'entre autres) fait à l'instant  $t = T$  ne ramène pas le taux de défaillance du système  $h(t)$  à son niveau initial  $h(0)$ . Formellement, ce comportement du taux de défaillance sur l'intervalle  $[T, 2T]$  ne sera pas une copie du comportement du taux de défaillance sur l'intervalle  $[0, T]$ .

Dans la littérature, plusieurs modèles ont été proposés de renouvellement partiel Zhang et Jardine (1998) suggèrent que le renouvellement partiel rend le taux de défaillance du système entre "bad as old" et "good as new", qui signifie que le taux de défaillance du système à  $t = 0$  est  $h(0)$ ; avant que la réparation partielle qui est effectuée au temps  $t_0$ , le taux de défaillance du système est  $h(t_0)$ . Les moyennes de réparation partielle réduisant le taux de défaillance à la valeur  $h(t^*)$  qui lie entre  $h(0)$  et  $h(t_0)$ . L'article fait par le Usher et al (1998) considèrent un renouvellement partiel qui réduit l'âge actuel du système par une certaine fraction.

Nous suggérons le modèle de renouvellement partiel suivant. Dans chaque intervalle  $I_{k-1} = [T(k-1), Tk]$ , le taux de défaillance du système sera égal au taux de défaillance du système sur l'intervalle précédent  $I_{k-1}$  multiplié par un facteur "dégradation"  $e^\alpha$ , où  $\alpha > 0$  et  $\alpha$  est un paramètre inconnu. Par exemple, si le taux de défaillance dans  $I_1$  est  $h(t)$  et s'étend entre  $h(0)$  et  $h(T)$ , donc dans  $I_2$ , après le renouvellement partiel à  $t = T$  le taux de défaillance sera  $e^\alpha \cdot h(t)$  étendant entre  $h(0)e^\alpha$  et  $h(T)e^\alpha$ . Dans le troisième intervalle  $I_3$ , le taux de défaillance variera entre  $e^{2\alpha}h(0)$  et  $e^{2\alpha}h(T)$ , etc. Ceci implique que le nombre moyen de défaillance dans l'intervalle  $I_1$  est  $H_1 = H(T)$ , dans  $I_2$   $H_2 = e^\alpha H(T)$ , et ainsi de suite. Dans  $I_k$ , le nombre moyen de défaillance sera égal à  $H_k = e^{(k-1)\alpha} H(T)$ .

Dans nos calculs, seulement le nombre moyen de défaillances  $H_k$  dans les intervalles  $I_k, k \geq 1$ , joue un rôle et pas le taux de défaillance dans ces intervalles. Donc, nous pourrions dire que nous postulons la propriété suivante de renouvellement partiel : le nombre moyen de défaillance dans l'intervalle  $I_k$  après qu'un renouvellement partiel soit effectué à l'instant  $t_{k-1}$  égale le nombre moyen de défaillance dans l'intervalle  $I_{k-1}$  multiplié par le facteur de dégradation  $e^\alpha$ .

Nous assurons plus loin qu'après  $k$  renouvellements partiels le système subit un renouvellement complet. Dans les références ci-dessus, ceci est nommé "une révision". une révision apporte le taux de défaillance du système à son niveau initial  $h(0)$ , donc à un nouvel état.

Définissons le coût suivant :  $c_{min}$  est le coût de la réparation minimale;  $c_{pr}$  est le coût de renouvellement partiel;  $c_{ov}$  est le coût de révision. Un simple raisonnement mène à l'expression suivante pour le coût par unité de temps :

$$\eta(k) = \frac{c_{min}H(t)(1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(k-1)}) + (k-1)c_{pr} + c_{ov}}{kT} \quad (3.10)$$

On suppose que l'on donne  $T$ . on cherche un optimal  $k^*$  qui minimise  $\eta(k)$ . La formule ci-dessus ne peut être simplifiée que par

$$1 + e^\alpha + \dots + e^{\alpha(k-1)} = \frac{e^{\alpha k} - 1}{e^\alpha - 1}$$

Voici un algorithme qui définit la procédure décrite précédemment qui permet de calculer les périodes des révisions partielles  $T$  :

- Introduire  $e^\alpha$ ,  $k$ ,  $C_{min}$ ,  $C_p$ ,  $C_r$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ;
- Calcul du  $H(T) = \int_0^t h(t)dt$ ;
- Intégrer  $H(T)$  et  $C_p$ ,  $C_{min}$ ,  $C_p$ ,  $C_r$ ,  $e^\alpha$ ,  $k$  dans le modèle de Ilya Ghertsbakh;
- Calcul de la dérivé de  $\eta(T)$ ;
- Résoudre l'équation  $\frac{\partial \eta(T)}{\partial T} = 0$ ;
- Vérifier que  $\frac{\partial^2 \eta(T)}{\partial T^2} > 0$ ;
- Récupérer les périodicités et les coûts correspondant.

# Analyse de la fiabilité des équipements de manutention de BMT

## Introduction

Le parc d'engins de BMT est composé de plusieurs équipements, pour illustrer notre approche nous avons choisi en commun accord avec les responsables de la direction technique de BMT les équipements de manutention sur lesquels nous allons effectuer l'application.

Le présent chapitre a pour objectif la modélisation de la fiabilité des engins et des sous-systèmes de chaque type d'engin par les lois paramétriques (Weibull, Exponentiel, Gamma et Normale).

## 4.1 Les données de retour d'expérience au sein du service maintenance

Pour pouvoir effectuer un calcul de fiabilité, il est nécessaire de disposer de données historiques d'exploitation. La collecte des données a été faite au niveau de la direction technique (DT) ainsi qu'au niveau de la direction des finances et de comptabilité (DFC).

Notre étude porte sur une durée de 24 mois (01/01/2011 – 31/12/2012).

Les informations collectées concernent :

- ✓ Les instants de défaillance des équipements ;
- ✓ Les dates de remise en service ;
- ✓ Les coût des pièces de rechanges ;
- ✓ Le coût de la main-d'œuvre ;
- ✓ Les couts d'immobilisation(les coûts de perte de production) ne sont pas évalués.

Par ailleurs, les données que nous avons eu à traiter peuvent être considérées comme complètes car les instants de défaillance et les dates de mise en service des équipements sont connues.

## 4.2 Modélisation paramétrique des lois de fiabilité des sous-systèmes

Le niveau de finesse au quel peut être poussée une étude de fiabilité dépend de l'usage que l'on veut en faire. Si nous voudrions éclaircir les points suivants :

- Quels sont les points faibles d'un matériel ?
- Quelle est la politique de maintenance préventive optimale ?
- Quelle stratégie de gestion des pièces de rechange faudra-t-il adopter ?

Pour apporter des réponses à ces questions, il faudra décomposer le matériel en sous-systèmes et en étudier chacun.

Notre étude portera après l'accord avec les responsables de la direction technique de BMT sur les équipements de manutention suivants :

Type	Marque	Tonnage	Code
PORTIQUES GERBEUR SUR PNEUS (RTG)	LIEBHERR	36	<i>RTG6</i>
PORTIQUES GERBEUR SUR PNEUS (RTG)	LIEBHERR	36	<i>RTG7</i>
PORTIQUES GERBEUR SUR PNEUS (RTG)	KALMAR	36	<i>RTG8</i>
PORTIQUES DE QUAI SUR RAIL (QC)	REGGIANE	40	<i>QC1</i>
PORTIQUES DE QUAI SUR RAIL (QC)	IHI	70	<i>QC2</i>
GRUE MOBILE PORTUAIRE (MHC)	GOTT WALT	100	<i>MHC</i>

TABLE 4.1 – Engins étudiés

Les sous systèmes que nous avons déterminés pour faire notre analyse sont :

- Pour les types QC et MHC qui représentent respectivement des portiques de quai sur rail et la grue mobile portuaire, les sous systèmes sont similaires :
  - Sous-système groupe électrogène ;
  - Sous-système translation sur roues ;
  - Sous-système levage ;
  - Sous-système chariotage ;
  - Sous-système palonnier ;
  - Sous-système relevage.

- Pour le type RTG qui représente portiques gerbeurs sur pneus, les sous systèmes sont les mêmes que ceux des deux types d'engins précédents, avec la spécification qu'elle ne contient pas le sous système relevage.

Pour illustrer les caractéristiques de ces sous systèmes, on définit les principaux organes qui constituent un RTG.



FIGURE 4.1 – Aperçu général sur le RTG.

### 4.2.1 Spécifications sous-systèmes

#### 1. Groupe électrogène

La chambre du groupe électrogène est généralement installée sur une poutre en acier de l'ossature au milieu des deux pieds avant du RTG. Le groupe est composé de :

- Un moteur Diesel couplé à un alternateur AC ;
- Un radiateur de refroidissement du moteur ;
- Une armoire électrique de commande ;
- Un réservoir de carburant ;
- Un silencieux et un long tuyau d'échappement.



FIGURE 4.2 – Groupe électrogène.

#### 2. Sous-système translation sur roues

Le système est composé pour chaque coté du RTG d'un moteur électrique (DC) couplé à un frein à disque et à un réducteur de vitesse. Ce dernier transmet le mouvement à la roue par une chaîne ou par un arbre de transmission.



FIGURE 4.3 – Sous-système translation sur roues.

### 3. Sous-système levage

Le système de levage est constitué principalement d'un moteur électrique (DC) couplé à un réducteur de vitesse par un système de freinage à disque. Le réducteur transmet le mouvement à un tambour enrouleur de câbles de levage liés au palonnier.

Ce système permet donc de soulever ou de faire descendre le palonnier lors de la rotation du tambour.



FIGURE 4.4 – Sous-système levage.

### 4. Sous-système chariotage

Le mécanisme de ce système est installé sur le châssis de la plateforme du chariot. Il assure le mouvement avant et arrière du chariot sur rails le long des deux transversales du RTG.



FIGURE 4.5 – Sous-système chariotage.

## 5. Sous-système Palonnier (Spreader)

Le palonnier est la partie de l'RTG qui entre en contact avec le conteneur. Il est lié donc directement aux câbles du système de levage. Il possède un système de télescopiques qui le rend adaptable aux différentes longueurs standards des conteneurs.



FIGURE 4.6 – Sous-système palonnier.

### 4.2.2 Modélisation des lois de fiabilité des sous-systèmes

La détermination des modèles paramétriques des sous-systèmes, pouvant modéliser les lois de fiabilité des équipements a été faite par deux logiciels, le premier est "MATLAB" qui permet d'estimer les paramètres utilisant l'estimateur de maximum de vraisemblance et ce avec la fonction 'mle' sans prise en compte des censures car on dispose de données complètes et suffisantes, le second est le logiciel libre "R" qui nous a permis de valider les modèles en utilisant le test classique d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov.

Les résultats obtenus sont données dans les tableaux : (4.2),(4.3),(4.4),(4.5),(4.6),(4.7).

Avec

- $n$  : La taille de l'échantillon ;
- $\beta$  : Paramètre de forme de la loi Weibull ;
- $\eta$  : Paramètre d'échelle de la loi Weibull ;
- $m$  : La moyenne de l'échantillon ;
- $\sigma$  : L'écart-type de l'échantillon ;
- $\lambda$  : Paramètre de la loi Exponentiel ;
- $\alpha$  : paramètre de forme de la loi Gamma ;
- $D_n$  : statistique empirique du test de Kolmogorov-Smirnov ;
- $d_n$  : statistique tabulée du test de Kolmogorov-Smirnov ;
- $MUT$  : Le temps moyen de bon fonctionnement (en heures).



		QC1				
<i>S</i> /système	N	Loi ajustée	Paramètres de la loi	<i>K.S</i>		MUT
				$D_n$	$D_{(n, 0.05)}$	
Groupe Electrogène	36	Weibull	$\beta=1.92, \eta=8765.50$	0.2011	0.2212	7768.86
		Normale	$m= 7776.79, \sigma=4239.4$	0.2016		7776.79
		Exponentielle	$\lambda= 1/7776.79$	0.2743		7776.79
		Gamma	$\alpha= 2.83, \beta=2813.57$	0.1968		7962.40
Chariotage	51	Weibull	$\beta=1.2, \eta=7813.32$	0.1847	0.1866	7277.32
		Normale	$m= 7072.10, \sigma=4580.60$	0.1185		7072.10
		Exponentielle	$\lambda= 1/7072.10$	0.1807		7072.10
		Gamma	$\alpha= 1.07, \beta=6551.05$	0.167		7116.62
Levage	78	Weibull	$\beta=1.2, \eta=6805.38$	0.109	0.153	6338.50
		Normale	$m= 6352.243, \sigma=4525.07$	0.1143		6352.24
		Exponentielle	$\lambda= 1/6352.243$	0.1176		6352.24
		Gamma	$\alpha= 1.3, \beta=4814.02$	0.1228		6258.84
Palonnier (Spreader)	104	Weibull	$\beta=1.48, \eta=8766.62$	0.1252	0.133	7832.97
		Normale	$m= 7752.62, \sigma=4706.80$	0.1213		7752.62
		Exponentielle	$\lambda= 1/7752.62$	0.1554		7752.62
		Gamma	$\alpha= 1.5, \beta=5375.82$	0.1301		8063.73
Translation Sur roues	61	Weibull	$\beta=1.06, \eta=5988.74$	0.1362	0.1709	5759.97
		Normale	$m= 5853.37, \sigma=5086.58$	0.2344		5853.37
		Exponentielle	$\lambda= 1/5853.37$	0.1314		5853.37
		Gamma	$\alpha= 1.01, \beta=5195.12$	0.1605		5247.07
Relevage	24	Weibull	$\beta=1.94, \eta=9588.38$	0.1091	0.2693	8497.22
		Normale	$m= 8124.45, \sigma=8473.60$	0.1534		8124.45
		Exponentielle	$\lambda= 1/8124.45$	0.2272		8124.45
		Gamma	$\alpha= 3.12, \beta=2707.32$	0.1018		8446.83

TABLE 4.2 – Résultats de la modélisation paramétrique pour les *s*/systèmes de l'engin QC1

		QC2				
S/système	N	Loi ajustée	Paramètres de la loi	K.S		MUT
				$D_n$	$D_{(n, 0.05)}$	
Groupe Electrogène	33	Weibull	$\beta=2.3, \eta=10231.32$	0.2188	0.2308	9078.25
		Normale	$m= 8911.518, \sigma=4114.922$	0.2211		8911.51
		Exponentielle	$\lambda= 1/8911.518$	0.2355		8911.51
		Gamma	$\alpha= 3.2, \beta=2840.1$	0.2279		9088.32
Chariotage	58	Weibull	$\beta=1.46, \eta=9069.64$	0.1522	0.1752	8240.67
		Normale	$m= 8250.637, \sigma=5423.871$	0.1238		8250.63
		Exponentielle	$\lambda= 1/8250.637$	0.1806		8250.63
		Gamma	$\alpha= 1.65, \beta=4971.17$	0.1703		8202.43
Levage	83	Weibull	$\beta=1.2, \eta=9485.29$	0.1458	0.149	8834.59
		Normale	$m= 8389.692, \sigma=5908.719$	0.1578		8389.69
		Exponentielle	$\lambda= 1/8389.692$	0.1846		8389.69
		Gamma	$\alpha= 1.2, \beta=7597.83$	0.1474		9117.39
Palonnier (Spreader)	75	Weibull	$\beta=1.38, \eta=9318.38$	0.1556	0.1568	8466.68
		Normale	$m= 8608.014, \sigma=5538.755$	0.1349		8608.01
		Exponentielle	$\lambda= 1/8608.014$	0.1647		8608.01
		Gamma	$\alpha= 1.4, \beta=6202.31$	0.1542		8683.23
Translation Sur roues	90	Weibull	$\beta=1.64, \eta=10500.02$	0.1411	0.1431	9381.76
		Normale	$m= 9162.074, \sigma=5131.821$	0.2456		9162.07
		Exponentielle	$\lambda= 1/9162.074$	0.2028		9162.07
		Gamma	$\alpha= 1.74, \beta=5590.11$	0.1424		9726.79
Relevage	15	Weibull	$\beta=1.92, \eta=17275.52$	0.2333	0.3376	15309.56
		Normale	$m= 15407.39, \sigma=8352.657$	0.1793		15407.39
		Exponentielle	$\lambda= 1/ 15407.39$	0.3201		15407.39
		Gamma	$\alpha= 2.43, \beta=6325.88$	0.2742		15371.88

TABLE 4.3 – Résultats de la modélisation paramétrique pour les s/systèmes de l'engin QC2

		MHC				
<i>S/système</i>	N	Loi ajustée	Paramètres de la loi	<i>K.S</i>		MUT
				$D_n$	$D_{(n, 0.05)}$	
Groupe Electrogène	21	Weibull	$\beta=1.32, \eta=6407.01$	0.1968	0.2872	5821.40
		Normale	$m= 5834.55, \sigma=5054.06$	0.2823		5834.55
		Exponentielle	$\lambda= 1/5834.55$	0.2036		5834.55
		Gamma	$\alpha= 1.88, \beta=3092.04$	0.1867		5813.03
Chariotage	19	Weibull	$\beta=1.5, \eta=4764.84$	0.2493	0.3014	4437.97
		Normale	$m= 4783.21, \sigma=4385.47$	0.3886		4783.21
		Exponentielle	$\lambda= 1/4783.21$	0.2525		4783.21
		Gamma	$\alpha= 0.9, \beta=5304.49$	0.2779		4774.04
Levage	12	Weibull	$\beta=1.2, \eta=3317.46$	0.175	0.3754	3089.88
		Normale	$m= 3108.92, \sigma=2755.19$	0.2681		3108.92
		Exponentielle	$\lambda= 1/3108.92$	0.1554		3108.92
		Gamma	$\alpha= 1.4, \beta=2209.95$	0.1771		3093.93
Palonnier (Spreader)	59	Weibull	$\beta=1.89, \eta=5585.98$	0.0807	0.1737	4950.29
		Normale	$m= 4984.21, \sigma=2665.68$	0.0786		4984.21
		Exponentielle	$\lambda= 1/4984.21$	0.2225		4984.21
		Gamma	$\alpha= 2.41, \beta=2063.52$	0.1065		4973.30
Translation Sur roues	23	Weibull	$\beta=1.53, \eta=7452.19$	0.2699	0.2749	6654.80
		Normale	$m= 6888.58, \sigma=6540.04$	0.269		6888.58
		Exponentielle	$\lambda= 1/ 6888.58$	0.2699		6888.58
		Gamma	$\alpha= 2.4, \beta=2717.77$	0.2701		6522.64

TABLE 4.4 – Résultats de la modélisation paramétrique pour les s/systèmes de l’engin MHC

		RTG6				
S/système	N	Loi ajustée	Paramètres de la loi	K.S		MUT
				$D_n$	$D_{(n, 0.05)}$	
Groupe Electrogène	92	Weibull	$\beta=3, \eta=12762.38$	0.1399	0.1416	11454.23
		Normale	$m= 1088.41, \sigma=3837.324$	0.1399		11111.11
		Exponentielle	$\lambda= 1/1088.41$	0.3847		11111.11
		Gamma	$\alpha= 4.33, \beta=2559.13$	0.2431		11081.03
Chariotage	43	Weibull	$\beta=3.39, \eta=14990.38$	0.197	0.2028	13765.16
		Normale	$m= 12812.05, \sigma=5264.20$	0.1997		12812.05
		Exponentielle	$\lambda= 1/12812.05$	0.3374		12812.05
		Gamma	$\alpha= 2.61, \beta=4890.36$	0.2358		12763.83
Levage	15	Weibull	$\beta=1.88, \eta=8587.59$	0.1494	0.3376	7610.32
		Normale	$m= 7625.03, \sigma=4329.15$	0.1544		7625.03
		Exponentielle	$\lambda= 1/7625.03$	0.2624		7625.03
		Gamma	$\alpha= 2.65, \beta=2872.14$	0.1386		7611.17
Palonnier (Spreader)	15	Weibull	$\beta=1.88, \eta=10043.99$	0.1618	0.3375	8900.98
		Normale	$m= 8921.31, \sigma=5030.31$	0.1424		8921.31
		Exponentielle	$\lambda= 1/ 8921.31$	0.2481		8921.31
		Gamma	$\alpha= 2.53, \beta=3519.49$	0.1672		8904.30
Translation Sur roues	61	Weibull	$\beta=2.06, \eta=8270.45$	0.0938	0.094	7338.37
		Normale	$m= 7337.58, \sigma=3631.484$	0.0938		7337.58
		Exponentielle	$\lambda= 1/7337.58$	0.2974		7337.58
		Gamma	$\alpha= 2.93, \beta=2500.54$	0.1331		7326.58

TABLE 4.5 – Résultats de la modélisation paramétrique pour les s/systèmes de l'engin RTG6

		RTG7				
<i>S/système</i>	N	Loi ajustée	Paramètres de la loi	<i>K.S</i>		MUT
				$D_n$	$D_{(n, 0.05)}$	
Groupe Electrogène	51	Weibull	$\beta=1.7, \eta=6080.23$	0.1236	0.1866	5388.37
		Normale	$m= 5459.76, \sigma=3246.866$	0.175		5459.76
		Exponentielle	$\lambda= 1/ 5459.76$	0.2928		5459.76
		Gamma	$\alpha= 2.17, \beta=2511.50$	0.1447		5449.95
Chariotage	80	Weibull	$\beta=1.75, \eta=9451.75$	0.1253	0.1518	8187.10
		Normale	$m= 8413.625, \sigma=4951.397$	0.1381		8413.62
		Exponentielle	$\lambda= 1/8413.625$	0.1839		8413.62
		Gamma	$\alpha= 2.36, \beta=3558.8$	0.1282		8398.76
Levage	18	Weibull	$\beta=1.38, \eta=8075.095$	0.1639	0.3094	7337.02
		Normale	$m= 7385.393, \sigma=5249.648$	0.163		7385.39
		Exponentielle	$\lambda= 1/7385.393$	0.1719		7385.39
		Gamma	$\alpha= 1.58, \beta=4658.92$	0.1586		7361.09
Palonnier (Spreader)	20	Weibull	$\beta=2.08, \eta=9823.60$	0.1384	0.2941	8716.54
		Normale	$m= 8813.645, \sigma=4293.824$	0.1203		8813.64
		Exponentielle	$\lambda= 1/8813.645$	0.2505		8813.64
		Gamma	$\alpha= 2.5, \beta=3512.23$	0.1654		8780.05
Translation Sur roues	80	Weibull	$\beta=1.68, \eta=11446.51$	0.1502	0.1518	10143.89
		Normale	$m= 9847.755, \sigma=5701.547$	0.1433		9847.75
		Exponentielle	$\lambda= 1/9847.755$	0.2911		9847.75
		Gamma	$\alpha= 1.97, \beta=5524.64$	0.1508		10883.54

TABLE 4.6 – Résultats de la modélisation paramétrique pour les s/systèmes de l'engin RTG7

		RTG8				
S/système	N	Loi ajustée	Paramètres de la loi	K.S		MUT
				$D_n$	$D_{(n, 0.05)}$	
Chariotage	17	Weibull	$\beta=1.24, \eta=842.6$	0.2331	0.3094	784.79
		Normale	$m= 791.344, \sigma=619.285$	0.3346		791.34
		Exponentielle	$\lambda= 1/791.344$	0.2799		791.34
		Gamma	$\alpha= 1.29, \beta=612.9$	0.233		790.64
Levage	49	Weibull	$\beta=1.18, \eta=7284.69$	0.1889	0.1903	6784.96
		Normale	$m= 6662.076, \sigma=4071.141$	0.1487		6662.07
		Exponentielle	$\lambda=1/6662.076$	0.2176		6662.07
		Gamma	$\alpha= 1.02, \beta=7029.19$	0.1898		7169.77
Palonnier (Spreader)	46	Weibull	$\beta=1.74, \eta=6990.06$	0.1601	0.1737	6194.59
		Normale	$m= 6251.486, \sigma=3627.739$	0.1729		6251.48
		Exponentielle	$\lambda= 1/6251.486$	0.2126		6251.48
		Gamma	$\alpha= 2.23, \beta=2802.26$	0.1465		6249.03
Translation Sur roues	28	Weibull	$\beta=1.2, \eta=5126.61$	0.163	0.2499	4774.92
		Normale	$m= 4826.125, \sigma=3100.942$	0.1009		4826.12
		Exponentielle	$\lambda= 1/4826.125$	0.2699		4826.12
		Gamma	$\alpha= 1.18, \beta=4058.72$	0.19		4789.28

TABLE 4.7 – Résultats de la modélisation paramétrique pour les s/systèmes de l’engin RTG8

### 4.2.3 Interprétation des résultats

A partir des résultats précédentes, l'estimation du paramètre  $\beta$  (paramètre de forme de la loi Weibull) est supérieure à l'unité, ce qui signifie que l'intensité de défaillance est croissante dans le temps, donc les systèmes sortent de la période de jeunesse, ce qui signifie que la dégradation des systèmes commence à augmenter.

On peut comparer la fiabilité des sous-systèmes de chaque engin en comparant leurs temps moyens de bon fonctionnement (MUT) de la loi Weibull. Ainsi, on dira qu'un sous-système est en moyenne plus fiable qu'un autre si, son MUT est supérieur.

L'étude de fiabilité des sous-systèmes de chaque engin révèle, quand à elle, que :

✓ Le sous-système relevage de l'engin **QC1** est le plus fiable parmi les sous-systèmes étudiés, tandis que le sous-système translation sur roues est le moins fiable ;

✓ Le sous-système relevage de l'engin **QC2** est le plus fiable parmi les sous-systèmes étudiés, tandis que le sous-système Chariotage est le moins fiable ;

✓ Comme le sous-système relevage de l'engin **MHC** n'est tombé que deux fois en panne, on constate qu'il est le plus fiable parmi les sous-systèmes étudiés, tandis que le sous-système levage est le moins fiable ;

✓ Le sous-système chariotage de l'engin **RTG06** est le plus fiable parmi les sous-systèmes étudiés, tandis que le sous-système translation sur roues est le moins fiable ;

✓ Le sous-système translation sur roues de l'engin **RTG07** est le plus fiable parmi les sous-systèmes étudiés, tandis que le sous-système groupe électrogène est le moins fiable ;

✓ Comme le sous-système groupe électrogène de l'engin **RTG08** n'est tombé que deux fois en panne, on constate qu'il est le plus fiable parmi les sous-systèmes étudiés, tandis que le sous-système translation sur roues est le moins fiable.

## 4.3 Modélisation de la fiabilité des engins

La modélisation de la fiabilité des engins a été faite avec des deux logiciels cités précédemment.

Les modèles de fiabilité obtenus ont été validés par le test de Kolmogorov-Smirnov.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau (4.8), ainsi que les courbes de fiabilité des engins sont présentées respectivement sur les figures (4.7),(4.8),(4.9) (voir l'annexe).

Engin	N	Loi ajustée	Paramètres de la loi	K.S		MUT
				$D_n$	$D_{(n, 0.05)}$	
QC1	276	Weibull	$\beta=1.43, \eta=6993.97$	0.0805	0.0817	6245.61
		Normale	$m= 6212.003, \sigma=4429.102$	0.0810		6212.00
		Exponentielle	$\lambda= 1/6212.003$	0.129		6212.00
		Gamma	$\alpha= 1.95, \beta=3340.33$	0.0809		6513.64
QC2	245	Weibull	$\beta=1.67, \eta=8205.68$	0.0854	0.0867	7280.89
		Normale	$m= 7059.529, \sigma=4205.708$	0.0772		7059.52
		Exponentielle	$\lambda= 1/7059.529$	0.1422		7059.52
		Gamma	$\alpha= 1.73, \beta=4080.09$	0.1274		7058.55
MHC	259	Weibull	$\beta=1.51, \eta=6699.88$	0.0836	0.0843	5937.43
		Normale	$m= 6012.463, \sigma=3991.115$	0.0838		6012.46
		Exponentielle	$\lambda= 1/6012.463$	0.1556		6012.46
		Gamma	$\alpha= 1.71, \beta=3508.28$	0.0838		5999.15
RTG6	353	Weibull	$\beta=1.83, \eta=10521.72$	0.0696	0.072	9324.34
		Normale	$m= 9366.71, \sigma=5388.87$	0.0719		9366.71
		Exponentielle	$\lambda= 1/9366.71$	0.2277		9366.71
		Gamma	$\alpha= 3.43, \beta=2809.94$	0.0717		9638.09
RTG7	184	Weibull	$\beta=1.7, \eta=7870.7$	0.0981	0.100	6975.01
		Normale	$m= 7074.475, \sigma=3999.682$	0.094		7074.47
		Exponentielle	$\lambda= 1/7074.475$	0.1779		7074.47
		Gamma	$\alpha= 2.04, \beta=3460.16$	0.0982		7058.72
RTG8	161	Weibull	$\beta=2.12, \eta=13304.79$	0.0836,	0.107	11805.34
		Normale	$m= 11751.01, \sigma=5937.041$	0.1042		11751.01
		Exponentielle	$\lambda= 1/11751.01$	0.2244		11751.01
		Gamma	$\alpha= 3.36, \beta=3495.38$	0.083		11639.61

TABLE 4.8 – Résultats de la modélisation paramétrique pour les engins



### 4.3.1 Interprétation

D'après les résultats obtenus, nous constatons que le modèle de Weibull à deux paramètres est accepté pour tous les engins (le paramètre de position  $\gamma$  est pris égale à zéro) et que tous les engins présentent un paramètre de forme  $\beta$  supérieur à 1, ce qui nous permet de conclure que leurs pannes sont dues au vieillissement.

On peut comparer la fiabilité des engins en calculant leurs temps moyens de bon fonctionnement (MUT) :

- ✓ L'engin MHC est le moins fiable parmi les engins étudiés;
- ✓ L'engin RTG08 est le plus fiable parmi les engins étudiés.

## Conclusion

L'ajustement de lois de fiabilité des sous systèmes de chaque engin a révélé que le paramètre de forme  $\beta$  est supérieur à 1. Par conséquent, leurs taux de défaillance sont croissants.

L'analyse de fiabilité des engins a révélé que la majorité des équipements sortent de la période de jeunesse, ce qui signifie que la dégradation des systèmes commence à augmenter.

L'adoption d'un plan de maintenance optimal nous permet de réduire la vitesse de cette dégradation et d'augmenter l'âge du système. Ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

# Optimisation de la maintenance des sous-systèmes des engins

## Introduction

Un système est soumis à trois actions de maintenance : une réparation minimale, une révision partielle et une révision générale (renouvellement). Le système subit une réparation minimale après chaque défaillance et une révision générale après l'atteinte d'un certain âge  $kT$ .

Entre deux renouvellements consécutifs on effectue un nombre déterminé de remplacements (révisions partielles)  $k$ , avec un intervalle égal à  $T$ .

Chaque révision partielle améliore le système, tandis que les réparations minimales ramènent le système aux conditions justes avant la défaillance.

L'objectif de notre étude est de répondre à la question suivante :  
Qu'elle périodicité  $T$  faut-il choisir pour optimiser le coût global  $\eta(T)$  ?

Dans le but d'effectuer notre application, nous avons décomposé chaque équipement en sous systèmes (défini dans le chapitre 4).

## 5.1 Modélisation du problème

### 5.1.1 Notations

- $h(t)$  : Taux de défaillance du sous-système après avoir subi des révisions partielles ;
- $H(T) = \int_0^T h(t) dt$  : Le nombre moyen de défaillances sur  $[0, T]$  ;
- $T$  : Intervalle des révisions partielles ;

- $k$  : Nombre de révisions partielles ;
- $e^\alpha$  : Facteur de dégradation ;
- $C_{min}, C_{pr}, C_r$  : Coût de réparation minimale, de révision partielle et de révision générale respectivement.

### 5.1.2 Le modèle étudié

1. Un remplacement améliore le système avec un degré fixé  $e^\alpha$
2. Une réparation minimale ne change pas le taux de défaillance.
3. Tous les cycles de révision ont la même durée  $kT$ .
4.  $k, C_{min}, C_{pr}, C_r, h(t)$ , et  $e^\alpha$  sont connus ;  $C_{min} < C_{pr} < C_r$ ,

Le modèle est sous la forme suivante :

$$\eta(T) = \frac{C_{min}H(T)(e^{\alpha k} - 1)/(e^\alpha - 1) + (k - 1)C_{pr} + C_r}{kT} \quad (5.1)$$

En effet, les sous-systèmes de chaque équipement sont considérés en série, du point de vue fiabilité, d'où chaque sous-système doit être géré individuellement (c'est-à-dire chaque sous-système doit avoir sa propre périodicité de remplacement), car la défaillance de n'importe quel sous-système causerait la défaillance de l'équipement

Chaque sous-système est soumis à trois actions de maintenance : une réparation minimale, une révision partielle et une révision générale (renouvellement).

Ainsi, nous allons déterminer la période optimale  $T$  et l'âge  $kT$  pour chaque sous-système.

## 5.2 Justification du choix de la politique de maintenance

Vue la politique de maintenance suivie au sein de la BMT, nous avons trouvé plus adéquat d'appliquer le modèle cité précédemment. La politique consiste à effectuer des révisions partielles qui représentent des maintenances préventives programmées, à effectuer une réparation minimale après chaque défaillance et une révision générale après un certain nombre  $k$  de révision partielle.

### 5.2.1 Estimations des coûts

L'estimation des coûts de maintenance de l'équipement s'avère complexe, lors de l'estimation des coûts nous sommes basés sur un certain nombre d'hypothèses tout en essayant de se rapprocher le plus possible de la réalité.

- Les coûts qui n’ont pas d’incidences significatives sur cette étude sont négligeables ;
- Les coûts de perte de production ne sont pas pris en compte ;
- Le coût de chaque intervention comprend :
  - Le coût des pièces de rechange ;
  - Le coût de la main-d’oeuvre.

Le coût des maintenances préventives est tiré à partir des rapports d’interventions ; il comprend, le coût horaire de la main-d’oeuvre et le coût de la pièce de rechange.

S/système	QC1				
	Coûts de la maintenance préventive $C_{pr}$			coût de révision générale $C_r$	coût de réparation minimale $C_{min}$
	Coût de la main-d’oeuvre(DA)	Coût des pièces de rechange(DA)	Coût d’une intervention partiel $C_{pr}$ (DA)		
Groupe électrogène	318980	6966.7	325950	9338000	651.9
Translation sur roues	136560	8648.6	145208.6	8004000	290.41
Levage	373250	9121.0	382371	11339000	764.74
Chariotage	662300	8081.5	670381.5	18676000	1340.63
Palonnier (Spreader)	381040	9842.4	390882.4	12673000	781.76
Relevage	37749	5524.8	43273.8	6670000	86.54

TABLE 5.1 – Les coûts d’une maintenance des sous-systèmes de QC1

S/système	QC2				
	Coûts de la maintenance préventive $C_{pr}$			coût d’une révision generale $C_r$	coût d’une réparation minimale $C_{min}$
	Coût de la main-d’oeuvre(DA)	Coût des pièces de rechange(DA)	Coût d’une intervention partiel $C_{pr}$ (DA)		
Groupe électrogène	410260	5035.2	415295.2	12586000	593.27
Translation sur roues	202450	202450	209779.6	10788000	299.86
Levage	859500	7476	866976	25172000	1238.53
Chariotage	168340	6737.8	175077.8	8990000	250.11
Palonnier (Spreader)	527720	7684.8	535404.8	17081000	764.86
Relevage	444470	4088.4	448558.4	15283000	640.80

TABLE 5.2 – Les coûts d’une maintenance des sous-systèmes de QC2

S/système	<i>MHC</i>				
	<i>Coûts de la maintenance préventive <math>C_{pr}</math></i>			coût d'une révision generale $C_r$	coût d'une réparation minimale $C_{min}$
	Coût de la main- d'oeuvre(DA)	Coût des pièces de rechange(DA)	Coût d'une intervention partiel $C_{pr}(DA)$		
Groupe électrogène	292410	6122.4	298532.4	6902000	597.06
Translation sur roues	436340	7213.4	443553.4	11368000	887.06
Levage	364730	7498.8	372228.8	7714000	744.45
Chariotage	61373	3441.6	64814.6	4872000	129.6
Palonnier (Spreader)	203470	7923.6	211393.6	5684000	422.78
Relevage	14312	2822.0	17134	4060000	32.26

TABLE 5.3 – Les coûts d'une maintenance des sous-systèmes de MHC

S/système	<i>RTG06</i>				
	<i>Coûts de la maintenance préventive <math>C_{pr}</math></i>			coût d'une révision generale $C_r$	coût d'une réparation minimale $C_{min}$
	Coût de la main- d'oeuvre(DA)	Coût des pièces de rechange(DA)	Coût d'une intervention partiel $C_{pr}(DA)$		
Groupe électrogène	114240	6006.7	120246.7	3857000	240.50
Translation sur roues	68224	8672.6	76896.6	2639000	152.60
Levage	693900	8169.6	702069.6	4263000	1404.13
Chariotage	798600	9281.5	807881.5	6293000	1615.76
Palonnier (Spreader)	78019	7231.1	85250	3248000	170.50

TABLE 5.4 – Les coûts d'une maintenance des sous-systèmes de RTG06

	<i>RTG07</i>				
S/système	<i>Coûts de la maintenance préventive <math>C_{pr}</math></i>			coût d'une révision generale $C_r$	coût d'une réparation minimale $C_{min}$
	Coût de la la main- d'oeuvre(DA)	Coût des pièces de rechange(DA)	Coût d'une intervention partiel $C_{pr}$ (DA)		
Groupe électrogène	206770	5526.7	212296.7	4576000	424.60
Translation sur roues	131430	7952.6	139382.6	3455000	278.76
Levage	692300	7713.6	700013.6	6395000	1400.02
Chariotage	108550	8081.5	116631.5	3454020	233.26
Palonnier (Spreader)	66780	7923.6	74703.6	2749150	149.40

TABLE 5.5 – Les coûts d'une maintenance des sous-systèmes de RTG07

	<i>RTG08</i>				
S/système	<i>Coûts de la maintenance préventive <math>C_{pr}</math></i>			coût d'une révision generale $C_r$	coût d'une réparation minimale $C_{min}$
	Coût de la main- d'oeuvre(DA)	Coût des pièces de rechange(DA)	Coût d'une intervention partiel $C_{pr}$ (DA)		
Groupe électrogène	44069	5526.5	49595	4872000	99.19
Translation sur roues	34290	4978.3	39268	3712000	78.53
Levage	123610	5056.8	128666.8	7192000	257. 33
Chariotage	16837	5287.2	22124	3016000	44.24
Palonnier (Spreader)	36338	4332	40670	4408000	81.34

TABLE 5.6 – Les coûts d'une maintenance des sous-systèmes de RTG08

### 5.3 Résultats de l'optimisation

Afin d'optimiser la fonction du coût, nous avons construit un programme d'optimisation sous MATLAB. Les résultats obtenus sont portés sur les tableaux ci-dessous.

S/système	QC1						
	Facteur de dégradation $e^\alpha$	Le nombre de revisions partielles(k)	Les periodes(T) des révisions partielles (Heurs)	Périodes (kT) des révisions générales (années)	Coût total ( $\eta(T)$ ) de la maintenance	Après réaran-gement	
						T	(kT)
Groupe électrogène	1.2	50	8428.7 $\simeq$ 12 mois	50	125.33	12	50
Translation sur roues	1.2	68	5080.9 $\simeq$ 7 mois	45	906.73	6	34
Levage	1.2	58	7408.6 $\simeq$ 10 mois	48	462.66	12	58
Chariotage	1.2	58	8159.4 $\simeq$ 11 mois	53	703.98	12	58
Palonnier (Spreader)	1.2	54	8426.5 $\simeq$ 12 mois	54	226.25	12	54
Relevage	1.2	54	9478.7 $\simeq$ 13 mois	59	35.65	12	54

TABLE 5.7 – Temps optimums de remplacement des sous-systèmes de QC1

S/système	QC2						
	Facteur de dégradation $e^\alpha$	Le nombre de revisions partielles(k)	Les periodes(T) des révisions partielles (Heurs)	Périodes (kT) des révisions générales (années)	Coût total ( $\eta(T)$ ) de la maintenance	Après réaran-gement	
						T	(kT)
Groupe électrogène	1.2	53	7974.3 $\simeq$ 11 mois	49	143.08	12	53
Translation sur roues	1.2	57	8595.9 $\simeq$ 12 mois	57	117.86	12	57
Levage	1.2	64	5775.6 $\simeq$ 8 mois	43	1295.2	8	43
Chariotage	1.2	58	8066.7 $\simeq$ 11 mois	53	128.68	12	58
Palonnier (Spreader)	1.2	58	8191.6 $\simeq$ 12 mois	60	363.82	12	58
Relevage	1.2	56	12026 $\simeq$ 16 mois	74	123.81	12	56

TABLE 5.8 – Temps optimums de remplacement des sous-systèmes de QC2

S/système	MHC						
	Facteur de dégradation $e^\alpha$	Le nombre de revisions partielles(k)	Les periodes(T) des révisions partielles (Heurs)	Périodes (kT) des révisions générales (années)	Coût total ( $\eta(T)$ ) de la maintenance	Après réaran-gement	
						T	(kT)
Groupe électrogène	1.2	54	7835 .9 $\simeq$ 11 mois	49	227.33	11	49
Translation sur roues	1.2	51	88767 $\simeq$ 12 mois	51	213.90	11	47
Levage	1.19	54	80936 $\simeq$ 11 mois	50	371.93	11	50
Chariotage	1.2	52	7376.3 $\simeq$ 10 mois	43	63.95	11	47
Palonnier (Spreader)	1.18	50	9677.6 $\simeq$ 13 mois	54	70.40	11	46

TABLE 5.9 – Temps optimums de remplacement des sous-systèmes de MHC



<i>RTG06</i>							
S/système	Facteur de dégradation $e^\alpha$	Le nombre de revisions partielles(k)	Les periodes(T) des révisions partielles (Heurs)	Périodes (kT) des révisions générales (années)	Coût total ( $\eta(T)$ ) de la maintenance	Après réaran-gement	
						T	(kT)
Groupe électrogène	1.2	54	7767.2 $\simeq$ 11 mois	49	36.5857	11	49
Translation sur roues	1.18	56	7055.9 $\simeq$ 10 mois	47	33.7808	11	51
Levage	1.17	56	8101.6 $\simeq$ 11 mois	52	201.9002	11	52
Chariotage	1.2	57	7164.3 $\simeq$ 10 mois	47	178.9988	11	52
Palonnier (Spreader)	1.17	58	10148 $\simeq$ 14 mois	68	29.4276	11	53

TABLE 5.10 – Temps optimums de remplacement des sous-systèmes du RTG06

<i>RTG07</i>							
S/système	Facteur de dégradation $e^\alpha$	Le nombre de revisions partielles(k)	Les periodes(T) des révisions partielles (Heurs)	Périodes (kT) des révisions générales (années)	Coût total ( $\eta(T)$ ) de la maintenance	Après réaran-gement	
						T	(kT)
Groupe électrogène	1.17	54	8719.5 $\simeq$ 12 mois	54	80.02	10	45
Translation sur roues	1.2	56	6866.5 $\simeq$ 9 mois	42	70.12	10	46
Levage	1.2	54	7266.6 $\simeq$ 10 mois	45	401.60	10	54
Chariotage	1.2	53	7842.4 $\simeq$ 11 mois	48	55.69	10	44
Palonnier (Spreader)	1.2	50	9126.9 $\simeq$ 13 mois	54	26.58	10	42

TABLE 5.11 – Temps optimums de remplacement des sous-systèmes du RTG07

S/système	RTG08						
	Facteur de dégradation $e^\alpha$	Le nombre de revisions partielles(k)	Les périodes(T) des révisions partielles (Heurs)	Périodes (kT) des révisions générales (années)	Coût total ( $\eta(T)$ ) de la maintenance	Après réaran-gement	
						T	(kT)
Translation sur roues	1.2	57	10294 $\simeq$ 14mois	66	60.4437	12	57
Levage	1.2	60	8096.9 $\simeq$ 12mois	60	199.4852	12	60
Chariotage	1.18	50	8552.9 $\simeq$ 12mois	50	49.54	12	50
Palonnier (Spreader)	1.2	51	10291 $\simeq$ 14 mois	59	28.8588	12	51

TABLE 5.12 – Temps optimums de remplacement des sous-systèmes de du RTG08

### 5.3.1 Interprétation des résultats

D'après les résultats présentés dans les tableaux ( 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 ), nous constatons :

– **Pour le QC1**

- ✓ Le sous système le plus couteux est le sous système Translation sur roues, en revanche le sous système le moins couteux est le sous système Relevage ;
- ✓ On remarque aussi que les périodes de renouvellement optimales T des sous systèmes Levage, Chariotage, Groupe électrogène, Palonnier et Relevage sont proches, (avec 10, 11, 12, 12 et 13 mois respectivement), par contre le sous système Translation sur roues a une petite période (7 mois).

– **Pour le QC2**

- ✓ Le sous système le plus couteux est le sous système levage , en revanche le sous système le moins couteux est le sous système Relevage ;
- ✓ On remarque aussi que les périodes de renouvellement optimales T des sous systèmes Chariotage, Groupe électrogène et Translation sur roues et Palonnier sont proches (avec 11,11, 12 et 12 mois), par contre le sous système levage a une petite période (8 mois), et le sous système Relevage a la plus grande période de renouvellement ( 16 mois).

– **Pour MHC**

- ✓ Le sous système le plus couteux est le sous système Levage, en revanche le sous système le moins couteux est est Chariotage ;
- ✓ On remarque aussi que les périodes de renouvellement optimales T des sous systèmes Groupe électrogène, levage, Chariotage Palonnier et Translation sur roues, sont proches ( 11,11, 10, 12 et 13 mois ).

- **Pour RTG06**
  - ✓ Le sous système le plus couteux est le sous système Levage , en revanche le sous système le moins couteux est Palonnier ;
  - ✓ On remarque aussi que les périodes de renouvellement optimales T des sous systèmes Translation sur roues, Chariotage, Groupe électrogène et levage sont proches ( 10,10,11 et 11 mois ), par contre le sous systèm Palonnier a une plus grande période (14 mois).
- **Pour RTG07**
  - ✓ Le sous système le plus couteux est le sous système Levage , en revanche le sous système le moins couteux est est Translation sur roues ;
  - ✓ On remarque aussi que les périodes de renouvellement optimales T des sous systèmes Levage, Translation sur roues, Chariotage Groupe électrogène et Palonnier, sont proches ( 10,9, 11,12 et 13 mois ).
- **Pour RTG08**
  - ✓ Le sous système le plus couteux est le sous système Levage , en revanche le sous système le moins couteux est est Palonnier ;
  - ✓ On remarque aussi que les périodes de renouvellement optimales T de tous les sous systèmes sont proches : Levage,Chariotage, Translation sur roues et Palonnier avec (12, 12, 14 et 14 mois)

### 5.3.2 Optimisation des engins en entier

Si nous appliquons les résultats obtenus précédemment sur les engins, la disponibilité de chaque système serait pénalisée. En effet, les systèmes feront l'objet d'arrêts fréquents pour intervenir à chaque fois sur un sous-système. Par conséquent, les optimums relatifs aux sous-systèmes considérés individuellement ne sont plus des optimums relativement au système correspondant. C'est pour cela que nous introduisons une règle permettant de coordonner les révisions partielles de telle sorte à créer des occasions d'inclure les révisions partielles de plus d'un seul sous-système à la fois, ceci permettrait de gagner en temps d'arrêt pour maintenance et en coût des préparations des interventions.

### 5.3.3 Réarrangement des périodicités des révisions générales

- **Pour QC1**

Chaque 2 révisions du sous-système Translation et une seule révision des autres sous-systèmes coïncident avec une révision partielle de tous les sous-systèmes à la fois (au bout de 12 mois).
- **Pour QC2**

Chaque 3 révisions du sous-système Levage et 2 révisions des autres sous-systèmes coïncident avec une révision partielle de tous les sous-systèmes à la fois (au bout de 24 mois).
- **Pour MHC**

Chaque 11 mois nous effectuons une révision partielle pour tous les sous-systèmes.

– **Pour RTG06**

Chaque 11 mois nous effectuons une révision partielle pour tous les sous-systèmes.

– **Pour RTG07**

Chaque 10 mois nous effectuons une révision partielle pour tous les sous-systèmes.

– **Pour RTG08**

chaque 12 mois nous effectuons une révision partielle pour tous les sous-systèmes.

D'après les résultats de réarrangement présentés dans les tableaux (5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12), nous voyons bien que : approximativement tous les systèmes (engins) ont une même durée de vie, donc au bout de 50 ans, nous effectuerons un renouvellement complet de tous les systèmes.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons calculé les périodes optimales  $T$  de révisions partielles, ainsi que les périodicités des révisions générales  $kT$  de chaque sous-système de chaque engin pour déterminer le coût optimum (minimum) total de la maintenance.

Nous avons remarqué que les périodicités  $T$  de la plupart des sous-systèmes sont proches, à l'exception de quelques sous-système. Pour cela, nous avons introduit une procédure de réarrangement des périodicités permettant de regrouper les actions de maintenance pour l'optimisation des engins en entiers.

# Conclusion générale

Notre travail avait pour objectif de trouver les périodicités  $T$  au bout desquelles nous effectuerons des révisions partielles sur chaque sous-système des engins de manutention de l'entreprise BMT (Bejaia Mediteranean Terminal).

Le problème a été formulé sous forme d'un programme mathématique non linéaire sans contraintes. La fonction du coût total de maintenance est choisie comme fonction objectif.

La première étape de notre travail est consacrée à la modélisation de la fiabilité des sous-systèmes de chaque engin, en recourant à l'approche paramétrique en utilisant l'estimateur de maximum de vraisemblance pour l'estimation des paramètres des lois et le test de Kolmogorov Smirnov pour la validation des modèles.

La loi Weibull à deux paramètres est validée pour tous les sous-systèmes et elle a l'avantage de modéliser les trois phases de la vie d'un composant.

L'ajustement des lois a fait ressortir que la valeur de  $\beta$  de la loi Weibull, pour tous les sous-systèmes est supérieure à 1. Cela permet d'affirmer que ses sous-systèmes se dégradent par vieillissement (taux de défaillance croissant), d'où la justification de recours à la maintenance préventive.

Pour déterminer le sous-système le moins fiable, nous avons calculé pour chaque sous-système leurs temps moyens de bon fonctionnement **MUT**.

La deuxième étape est consacrée à la modélisation paramétrique des lois de fiabilité de chaque engin.

L'ajustement des lois de fiabilité de chaque engin a révélé que le paramètre  $\beta$  de la loi Weibull de chaque engin est supérieur à 1, ce qui signifie que la dégradation des systèmes commence à augmenter.

Nous avons opté pour une politique de maintenance préventive périodique avec réparation minimale à la défaillance, où nous avons considéré que les maintenances périodiques sont imparfaites, ce qui peut être assimilé à des révisions partielles. Cette politique est la plus utilisée dans l'industrie, vu que c'est l'une des politiques qui reflètent le mieux la réalité industrielle.

Nous avons supposé que chaque intervention préventive réduit le taux de défaillance et améliore l'état du système, en réduisant le taux de défaillance par un facteur de dégradation  $e^\alpha$  constant ; vue la qualité de la maintenance effectuée par l'entreprise, nous avons estimé que le facteur de dégradation varie dans l'intervalle [1.17, 1.2].

Le problème a été formulé sous forme d'un programme mathématique non linéaire sans contraintes, où la fonction de coût est choisie comme fonction objectif à minimiser. La résolution est faite sous Matlab et nous a permis l'obtention de la période  $T$  pour chaque sous-système, qui minimise le coût total de la maintenance.

Comme résultat de l'optimisation, nous avons trouvé qu'au bout de 50 ans, nous allons effectuer un renouvellement de tous les systèmes.

Les chiffres obtenus dans la présente étude, doivent être manipulés avec précaution et réserve. Ceci est dû principalement à la partialité et l'ambiguïté des informations contenues dans le retour d'expérience de la BMT.

En perspective, on peut dire que ce travail peut être complété en appliquant des méthodes d'optimisation pour trouver les périodicités  $T$  et le nombre  $k$  des révisions partielles au bout desquels nous effectuerons une révision générale, ainsi que sur les réarrangements pour l'optimisation du l'engin en entier.

Pour les systèmes ayant des arrêts rare on procède d'appliquer un modèle non paramétrique.

# Bibliographie

- [1] A. AISSANI, *Méthodes Statistiques en Fiabilité*, Cours polycopié, Post-graduation en Mathématique Appliquées, Institut des Sciences Exactes, Béjaia, Avril 1996.
- [2] A. AISSANI, *Modèles stochastiques de la théorie de fiabilité*, volume 1 Fondement théorique, O.P.U, 1992.
- [3] A. AISSANI, *Modèles stochastiques de la théorie de fiabilité*, O.P.U, édition 1991.
- [4] A. NOIRET, *Recherche de la Méthode la Plus Economique de Maintenance Par l'Utilisation du Modèle Graphique de Weibull*, L'Industrie Française/Achats et Entretien, N° 323-10-80, P.36-56 et num 326-01-81, P.23-34.
- [5] A. PAGÉS & M. GONDRAN, *Fiabilité des Systèmes*, Ed.Eyrolles.
- [6] A. RUUEGG, *Processus Stochastique*, Presses Polytechniques Romandes, Ed 1989.
- [7] C. MARCOVICI & CI LEGERON, *Utilisation des techniques de fiabilité en mécanique*, Techniques et documentation édition, 1974.
- [8] F. BOUHAMOU, N. OUKAOUR, D .AISSANI & S. ADJABI, *Analyse de Retour d'Expériences pour l'Optimisation de la Maintenance du Parc d'Engin de l'Entreprise Portuaire de Bejaia*, Mémoire de fin d'étude, Département Recherche Opérationnelle, Université de Béjaia, Septembre 1998.
- [9] G. ZWEINGELSTEIN, *Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Industriels Complexes*, Technique de l'ingénieur, 2009.
- [10] H. FERROUDJ, *Modélisation Stochastique pour l'Evaluation des Indicateurs de la Sûreté de Fonctionnement d'un système de Production*, Mémoire de magistère, Université de Batna, 2010.
- [11] H. PROCACCIA & L. PIEPSZOWNIK, *Fiabilité des équipements et théorie de la décision statistique fréquentielle et bayésienne*, Eyrolles, 1992.
- [12] I. GERTSBAKH, *Reliability Thoery With Applications to Preventive Maintenance*, Department de mathématique, Université de Ben Gurion Edition, 2000.
- [13] J. BON, *La Fiabilité des systèmes -méthodes mathématiques*, Ed.Masson, 1995.
- [14] J. MICHEL, *la fiabilité au service de l'entretien de l'inspection de matériel*, Ed. technip, 1962.

- 
- [15] Le site de BMT, *www.bejaiamed.com*, 2013.
- [16] M. ALEM, M. MOLI & D. AISSANI, *Influence des RTG et du "call Center" dans l'évaluation des performances du terminal à conteneurs BMT*, Mémoire de fin d'étude, Département de Recherche Opérationnelle, Université de Béjaia, 2011.
- [17] M. KEFI GAZDAR, *Optimisation Heuristique Distribuée du Problème de Stockage de Conteneurs dans un Port*, Thèse de Doctorat, Laboratoire LAGIS, Ecole Centrale de Lille, 2009.
- [18] N. ARZOUZ, F. TOUAHRI, D. AISSANI & S. ADJABI, *Influence de l'Opération Livraison sur l'Evaluation des Performances du Terminal à Conteneurs BMT*, Mémoire de fin d'étude, Département Recherche Opérationnelle, Université de Béjaia, juin 2012.
- [19] N. AYACHE, R. HIDJA, D. AISSANI & S. ADJABI, *Evaluations des Performances du parc à conteneurs de l'E.P.B*, Mémoire d'ingénieur, Département Recherche Opérationnelle, Université de Bejaia, 2007.
- [20] N. DINKER, P. BREUT & G. SERVESTRE, *Aspects modernes de fiabilité*. Les Presses de l'Université Modernes, Montréal, 2004.
- [21] O. TEBBI, *Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés*, Thèse de Doctorat, Ecole doctorale d'angers, édition 2005.
- [22] P. LYONNET, *La Maintenance Mathématique et Méthode*, Tec et doc édition, 2000.
- [23] P. LYONNET, *Optimisation d'une politique de maintenance*, Ed Techniques et documentation (Lavoisier), Paris, 1986.
- [24] R. FAURE & LAUVIERE. J. L, *Recherche opérationnelle appliqué : fiabilité et renouvellement des équipements*, Gauthier Villars, paris, 1974.
- [25] R. LAGGOUNE, *Analyse de Retour d'Expérience pour l'Optimisation de la Maintenance dans la Raffinerie de Pétrole. Cas du Compresseur du Magnaforming de le Raffinerie de Skikda*, Thèse de Magister, Institut des Hydrocarbure et de la Chimie, Novembre 1998.
- [26] S. ADJABI, *Statistique Mathématique*, Edition LAMOS, Université de Béjaia, 1998.
- [27] S. HOCINE, N. ZAREB, D. AISSANI & M. CHERFAOUI, *Détermination du Nombre Optimal de Camions Remorqueurs au Niveau du Terminal à Conteneurs BMT*, Mémoire de fin d'étude, Département Recherche Opérationnelle, Université de Béjaia, juin 2009.
- [28] T. BENKHELLAT, N. MEDJKOUNE, D. AISSANI & S. ADJABI, *Prévision du trafic et Evaluation des performances du Terminal à Conteneurs BMT*, Mémoire d'ingénieur, Département Recherche Opérationnelle, Université de Béjaia, 2008.
- [29] Y. MORTUREUX, *La sûreté de Fonctionnement : Méthodes Pour maitriser les Risques*, Technique de l'Ingénieur, 2001.



# Annexe

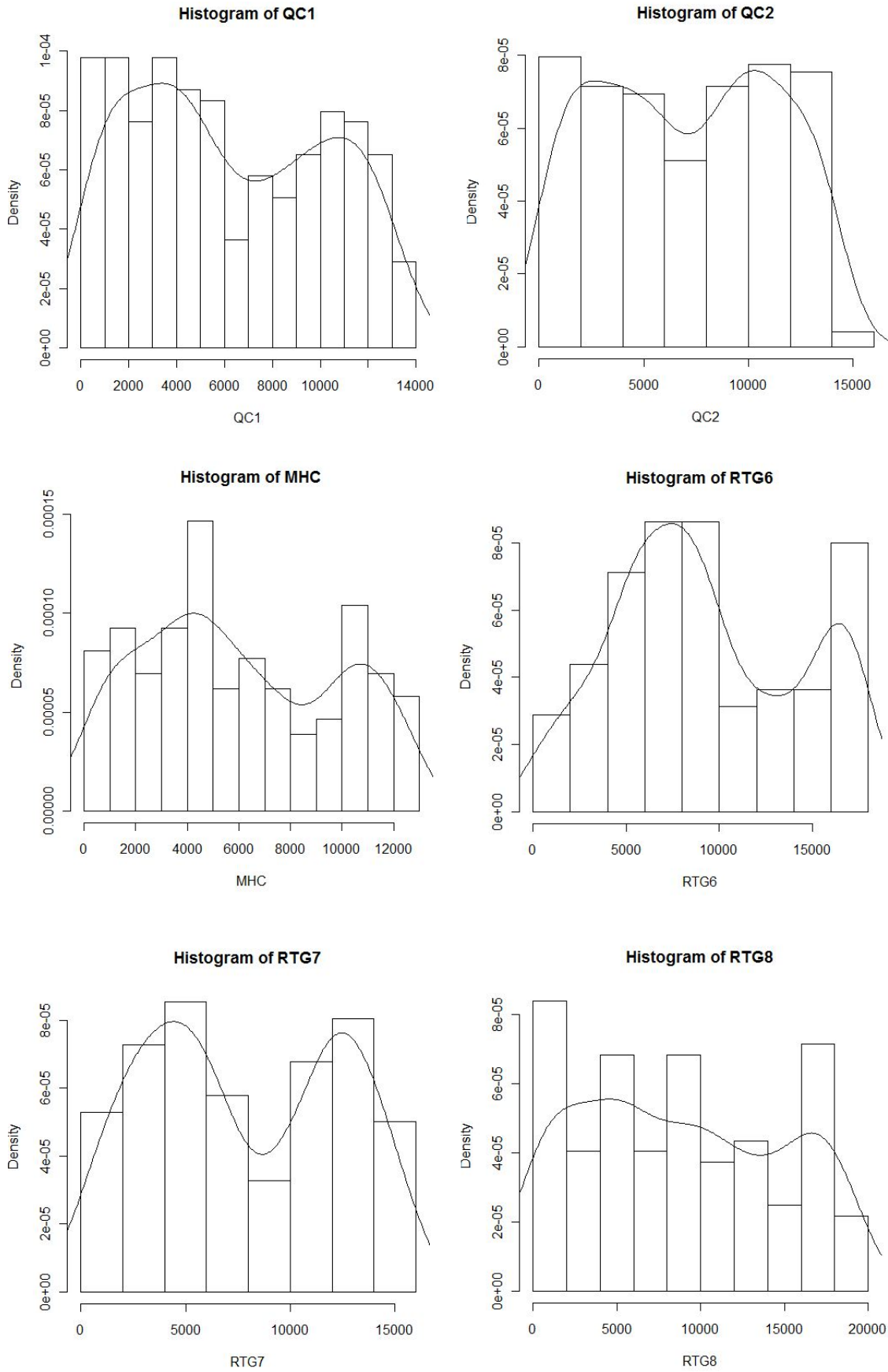
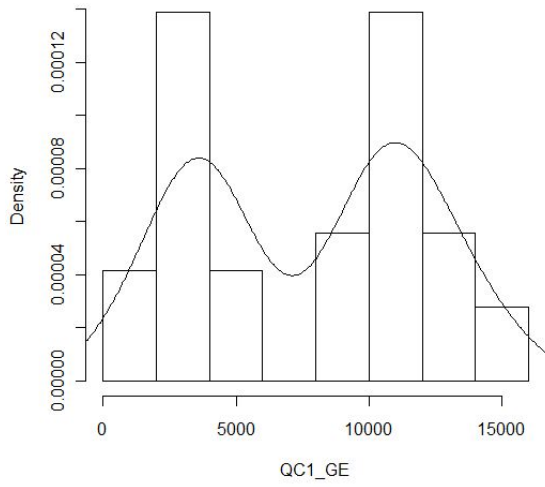
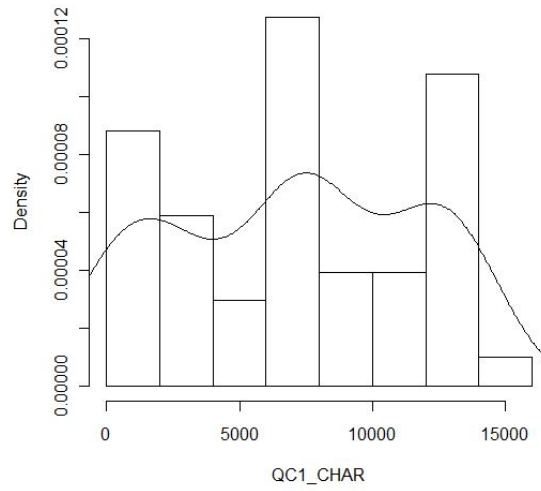


FIGURE 5.1 – Histogrammes représentant les densités des engins étudiés

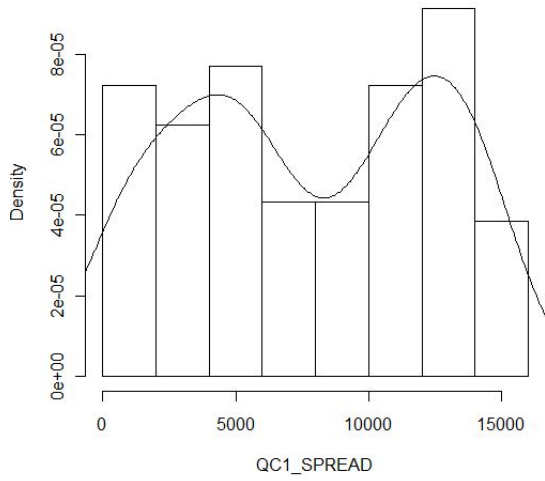
Histogram of QC1\_GE



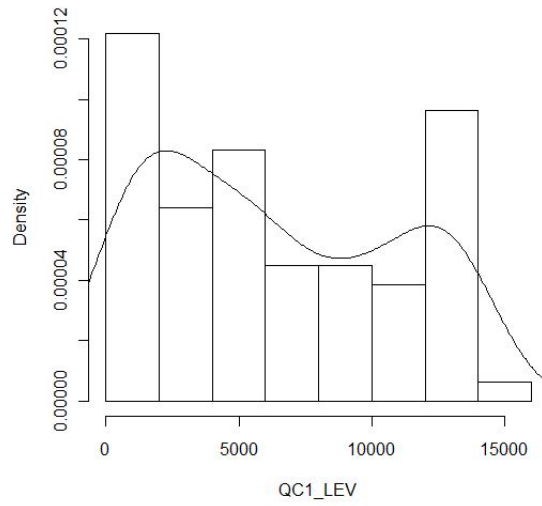
Histogram of QC1\_CHAR



Histogram of QC1\_SPREAD



Histogram of QC1\_LEV



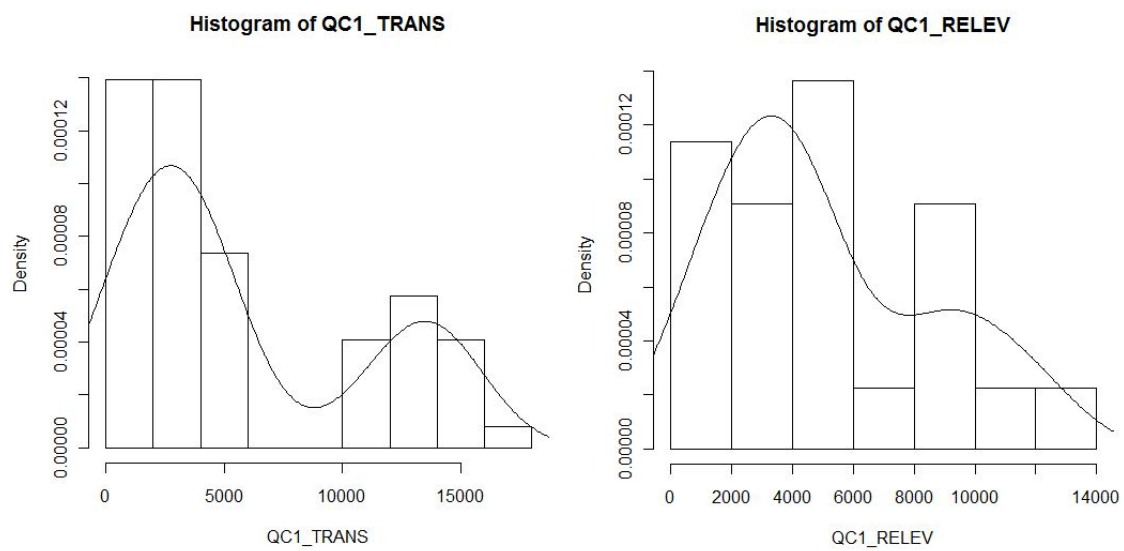


FIGURE 5.2 – Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l’engin QC1

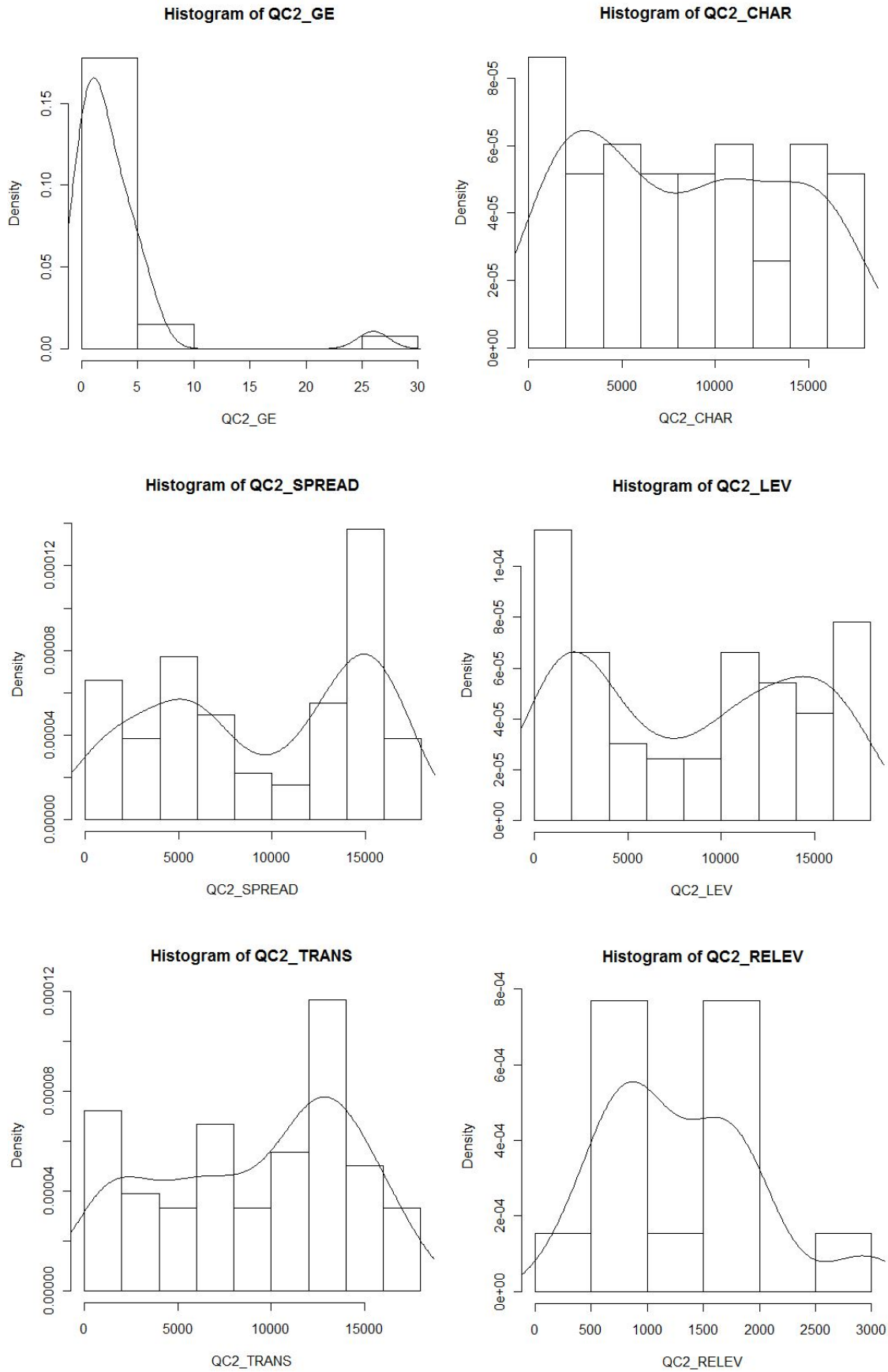


FIGURE 5.3 – Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l'engin QC2

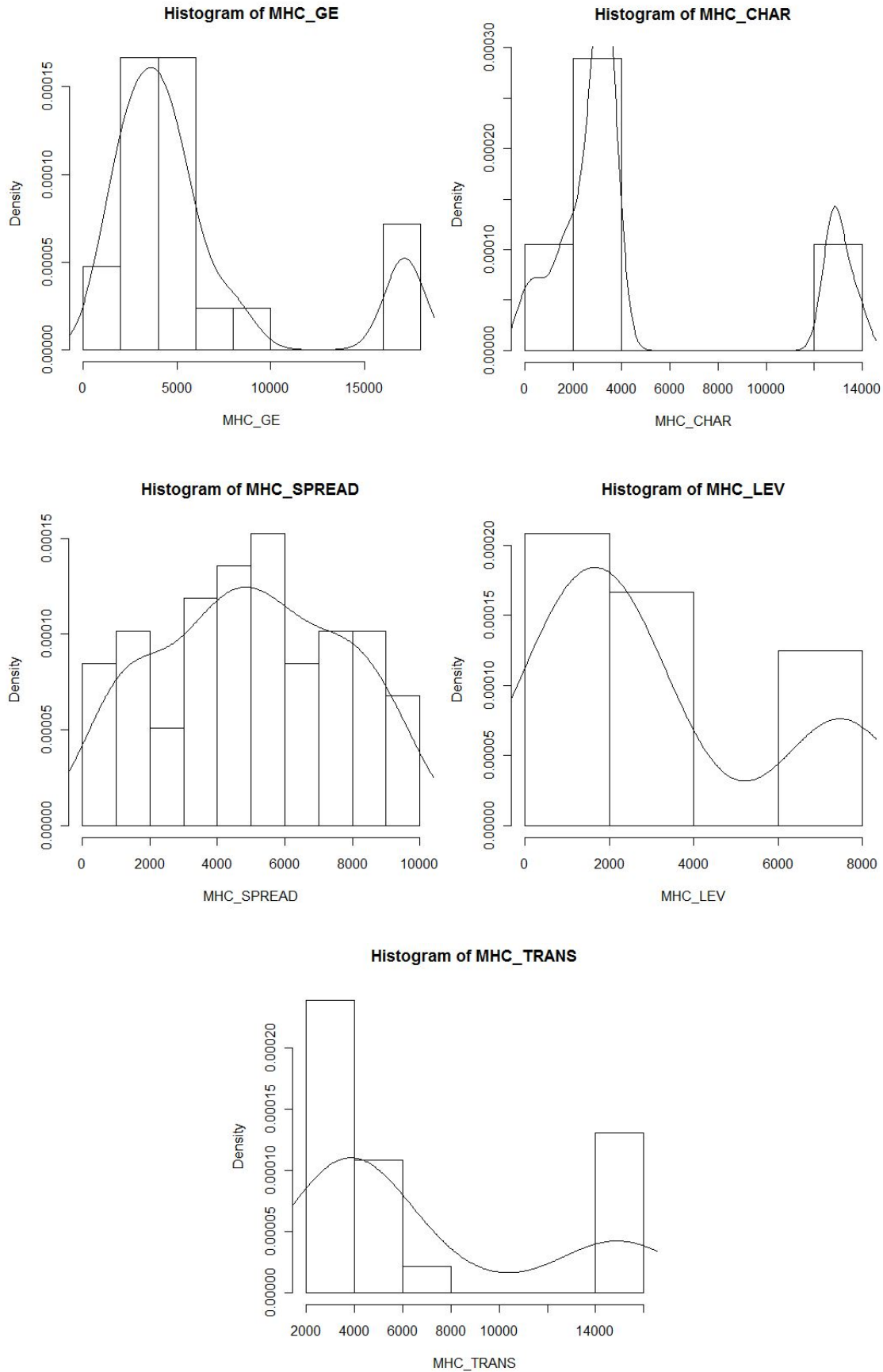


FIGURE 5.4 – Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l'engin MHC

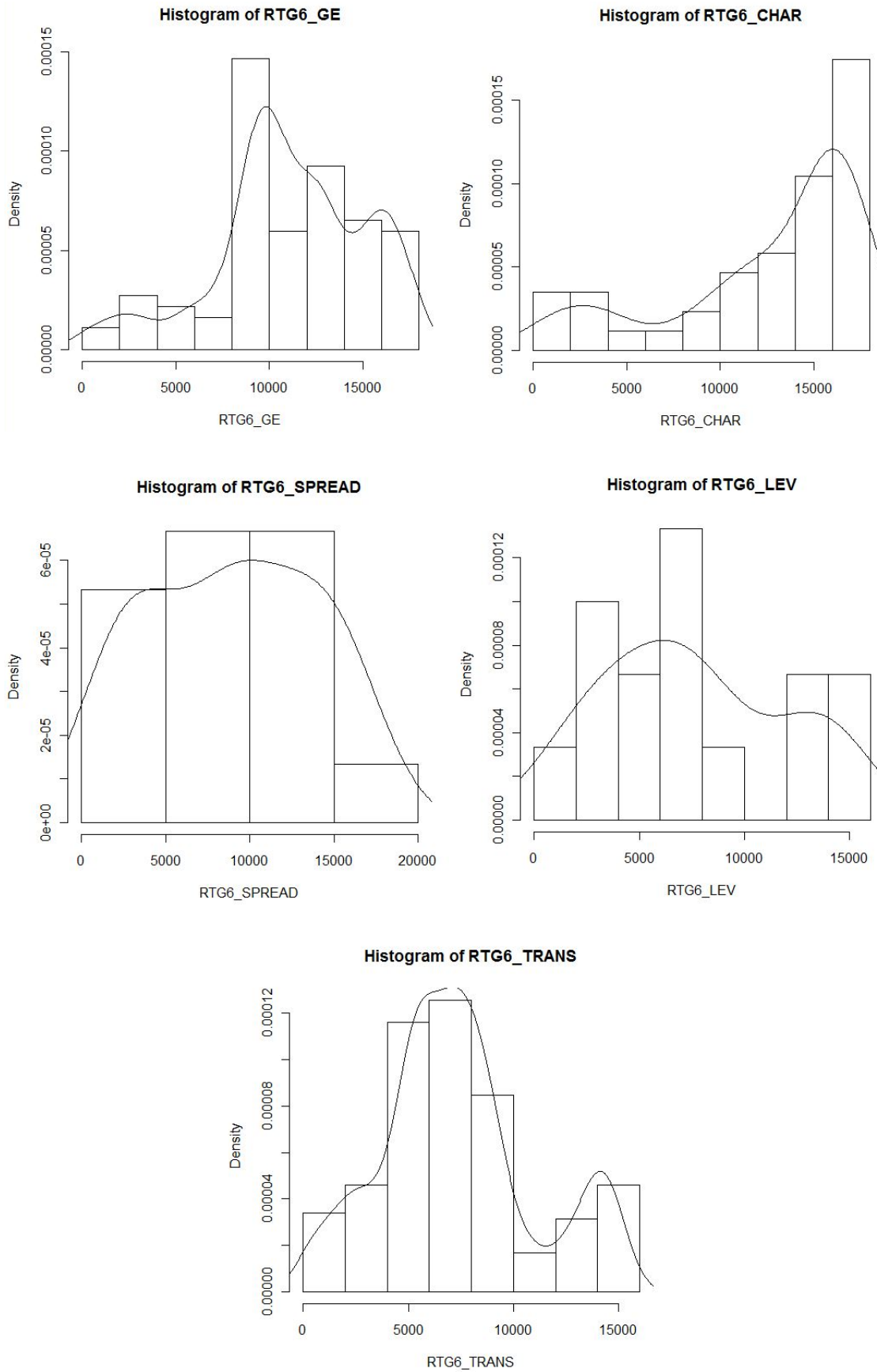


FIGURE 5.5 – Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l'engin RTG06

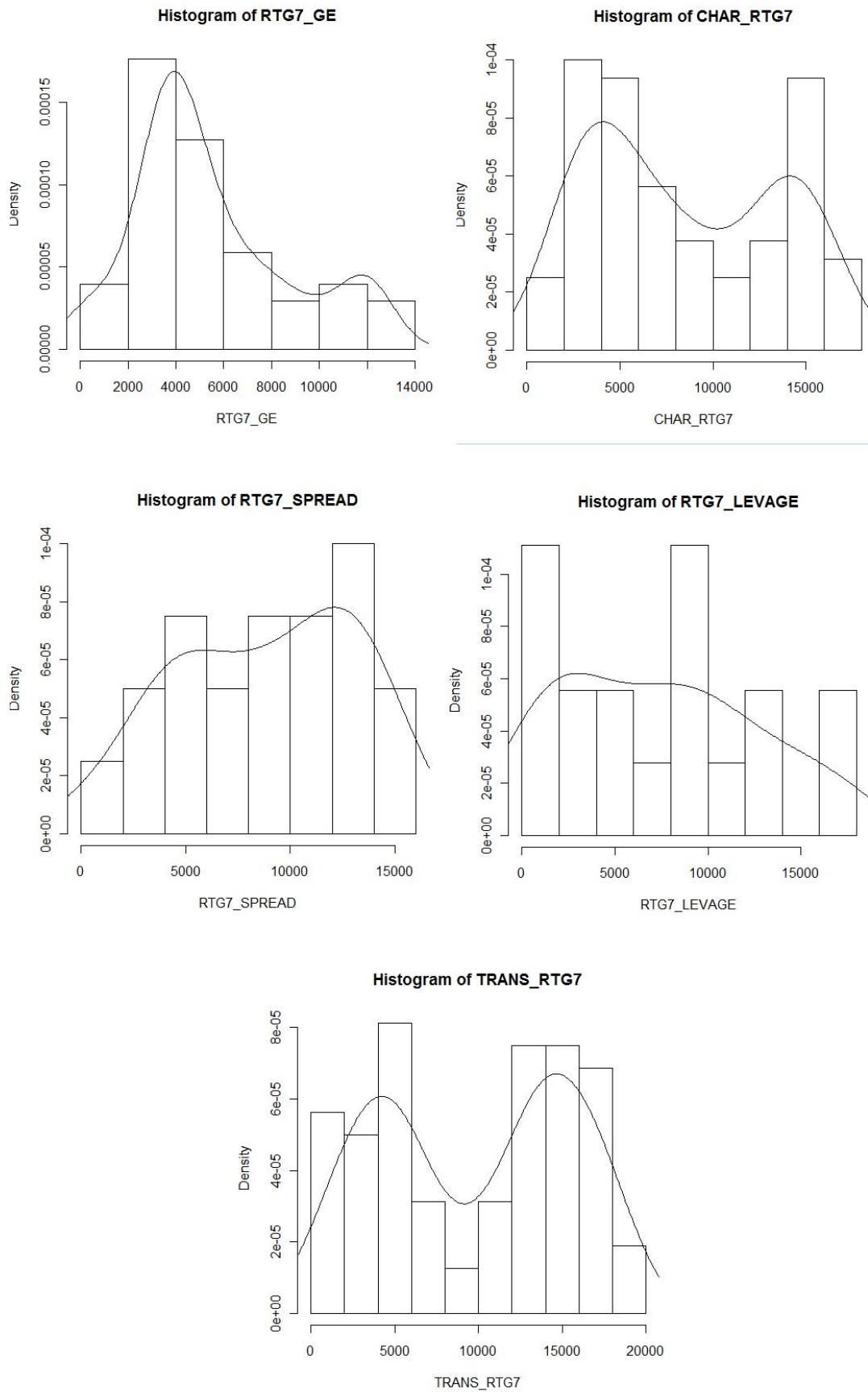


FIGURE 5.6 – Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l'engin RTG07



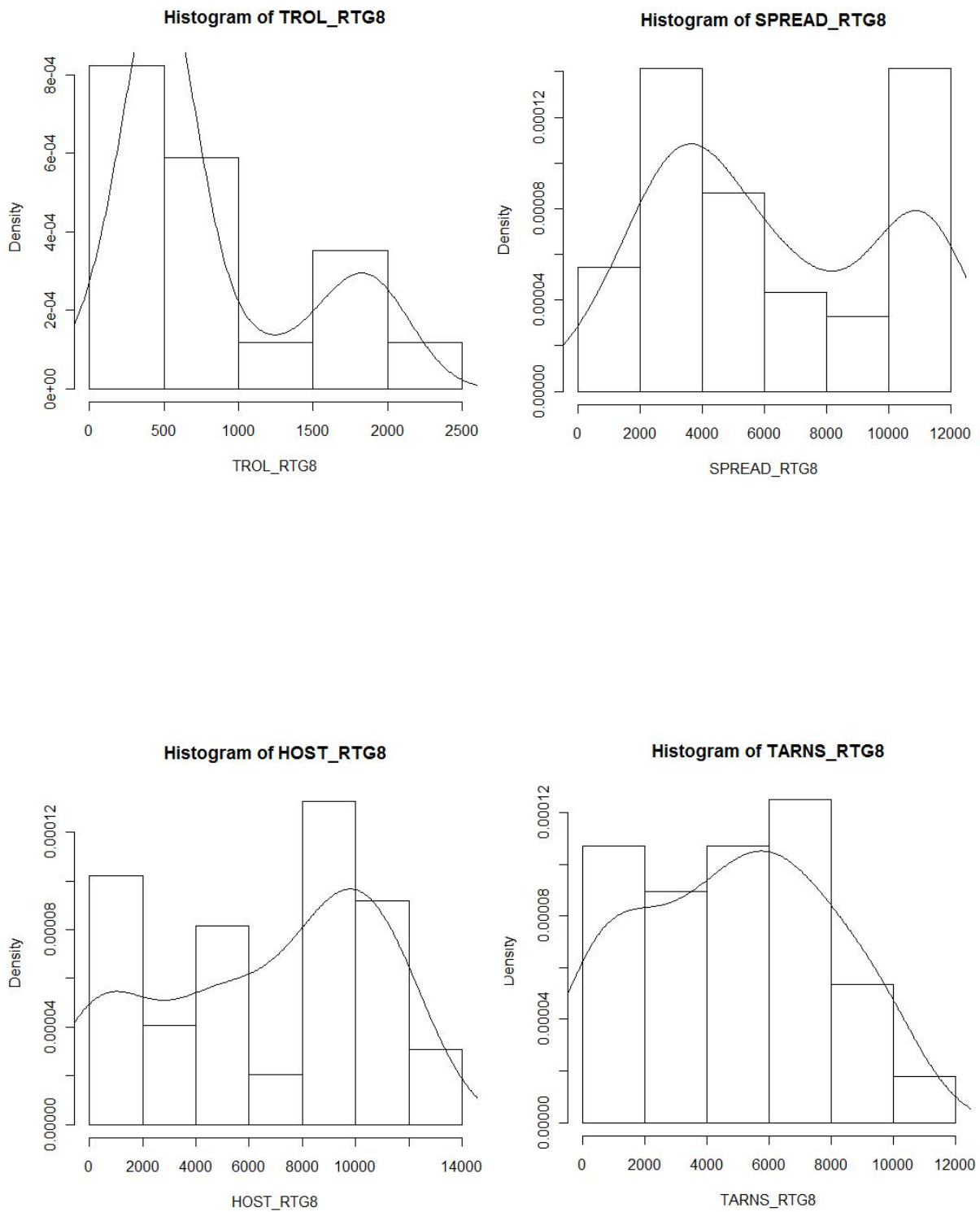


FIGURE 5.7 – Histogrammes représentant les densités des sous systèmes de l'engin RTG08

## Résumé

---

L'objet de cette étude est l'analyse du retour d'expérience des équipements de manutention de l'entreprise **BMT** (**B**ejaia **M**editerranean **T**erminal) et ce, afin d'estimer les indices de fiabilité, d'évaluer leur disponibilité. L'analyse de fiabilité des sous-systèmes de ces engins a été effectuée avec les modèles paramétriques.

La connaissance du comportement de ces sous-systèmes permet de déterminer les sous-systèmes les moins fiables. Le calcul de la période optimale  $T$  de révision partielle, ainsi que les périodicités des révisions générales  $kT$  de chaque sous-système de chaque engin ont permis de déterminer le coût optimum (minimum) total de la maintenance.

**Mots clés** : Parc à conteneurs, Fiabilité, retour d'expérience, estimation, Modèles paramétriques, taux de défaillance, maintenance préventive, renouvellement périodique.

## Abstract

---

The object of this study is the feedback experience analysis of the park of machines of **BMT** (**B**ejaia **M**editerranean **T**erminal), this, in order to estimate the indices of reliability, and to evaluate their availability. The analysis of reliability of the subsystems of these machines was carried out with parametric models.

The knowledge of the behavior of these subsystems makes it possible to determine the least reliable subsystems. Calculates optimal period  $T$  of revision partial, as well as the periodicities of the general revisions  $kT$  of each subsystem of each machine have makes it possible to determine the optimum cost (minimum) total of maintenance.

**Keywords** : Park with containers, Reliability, experience feedback, estimate, Models parametric, failure rate, preventive maintenance, periodic renewal.