



Titre: Fiabilité et maintenabilité du groupe motopropulseur d'autobus
Title: urbains

Auteur: Charles Daniel Prud'homme
Author:

Date: 1997

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Prud'homme, C. D. (1997). Fiabilité et maintenabilité du groupe motopropulseur d'autobus urbains [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/6736/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6736/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Michel Gou, & Zdzislaw Klim
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

NOTE TO USERS

The original manuscript received by UMI contains pages with indistinct print. Pages were microfilmed as received.

This reproduction is the best copy available

UMI

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

FIABILITÉ ET MAINTENABILITÉ DU
GROUPE MOTOPROPULSEUR D'AUTOBUS URBAINS

CHARLES DANIEL PRUD'HOMME
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

JUIN 97



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-33181-4

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

FIABILITÉ ET MAINTENABILITÉ DU
GROUPE MOTOPROPULSEUR D'AUTOBUS URBAINS

présenté par: PRUD'HOMME Charles Daniel

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. YELLE Henri, Ph.D., président

M. GOU Michel, M.Sc.A., membre et directeur de recherche

M. KLIM Zdislaw, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. VINET Robert, D.Sc.A., membre

Remerciements

Je tiens à remercier spécialement mon directeur de recherche Michel Gou, mon codirecteur de recherche Zdislaw Klim ainsi que Louis-Michel Lanoie de la STCUM pour leur implication dans les nombreuses phases de ce projet. J'aimerais aussi remercier tous les membres de la sécurité routière pour m'avoir appuyé tout au long de ces trois années.

Résumé

L'objectif de ce projet consiste à évaluer et optimiser le programme de maintenance du groupe motopropulseur d'une flotte d'autobus urbains. Pour ce faire, la théorie de la fiabilité et de la maintenabilité a été appliquée sur des données réelles de défaillances des composantes du groupe recueillies par les employés de la STCUM dans une banque de données informatiques.

Premièrement, il a été nécessaire de définir ce qu'était une défaillance dans le cadre de ce projet. Il a aussi été nécessaire de procéder à une reconnaissance du système et des composantes qui font partie du groupe motopropulseur. Ensuite, il a fallu établir un processus de filtrage des données brutes afin d'éliminer les données aberrantes ainsi que les erreurs de codification à l'intérieur de la banque de données. Par la suite, les lois de Weibull et de Hastings ont été utilisées afin de modéliser la durée de vie des composantes d'après les échantillons de défaillances.

Dans l'étape suivante, nous avons procédé à l'optimisation de la période de maintenance préventive sous deux volets différents. Nous avons utilisé une méthode où le critère d'optimisation était la fiabilité de la composante. Nous avons donc analysé l'influence du resserrement des périodes de maintenance sur la fiabilité. Simultanément, afin de faire un choix optimal, une méthode basée sur l'optimisation du coût a été utilisée afin de valider les différentes options offertes. L'interprétation des résultats obtenus avec les méthodes combinées a permis de procéder à une analyse et de faire des recommandations. Finalement, il a été possible de rencontrer l'objectif principal et de proposer une grille de maintenance optimale pour le groupe motopropulseur.

Pour certaines composantes, les informations sur les défaillances n'étaient pas suffisantes pour appliquer le traitement statistique des données. Le projet a cependant permis d'établir une procédure efficace d'analyse et d'optimisation qui pourra être appliquée sur de nouveaux échantillons de défaillance de composante du même groupe, une fois que les données nécessaires seront disponibles.

Abstract

The objective of this project was to evaluate and optimize a maintenance program for the power train group of a large urban bus fleet. The principles of reliability and maintainability were applied to real failure data obtained from the STCUM computerized database.

At the beginning, it was critical to define the meaning of a component failure all along the project. It was also required to recognize the function of each components which were part of the power train group. Then, we established a filtering method of the raw data in order to eliminate the aberrations as well as the codification errors found in the database. The reliability laws of Weibull and Hastings were then used to model the component life according to the failure samples gathered in the database.

The next step consisted in a two way optimization of the preventive replacement period based on both reliability and cost. First, the maintenance intervals were optimized accordingly to reliability. Then, in order to make an optimal decision, they were optimized with the cost factor. The results provided by both methods offered a good way to analyze and make recommendations. Finally, it was possible to meet the principal objective of this project which consisted in an optimal maintenance grid for the power train group.

On the other hand, we encountered some problems related to data collection and some samples that were too small. These impeded the calculation of a model for some components. To conclude, this project established an effective procedure to analyze and optimize maintenance intervals on mechanical components. The procedure can now be used on other components of the power train group in the future.

Table des matières

Remerciements	iv
Résumé	v
Abstract	vii
Liste des tableaux	xv
Liste des figures	xviii
Liste des annexes	xxii
 Chapitre 1 : Introduction	 1
1.1 Fiabilité du groupe selon sa capacité à remplir une mission	3
1.2 Programme de maintenance de la STCUM	4
1.3 Banque de données de la STCUM	5
1.4 Description de la flotte d'autobus de la STCUM	6
1.5 Composantes suivies via la banque de données	8
1.6 Durée de vie d'une composante	11
1.7 Objectif: optimisation de la maintenance préventive	13
 Chapitre 2 : Description du groupe motopropulseur	 14
2.1 Moteurs	14
2.1.1 Description	14
2.1.1.1 Moteur diesel à deux temps	14
2.1.1.2 Principe du moteur à deux temps	15
2.1.1.3 Différences entre 6V71 et 6V92	16
2.1.2 Bloc-cylindres	17
2.1.3 Vilebrequin	18
2.1.4 Culasse	19

2.1.4.1 Mécanismes de commande	19
2.1.5 Pistons	20
2.1.5.1 Bielle	21
2.1.5.2 Chemise de cylindre	22
2.1.6 Arbres à cames et paliers	22
2.1.7 Couvercle de culbuteurs	22
2.1.8 Échappement	23
2.1.9 Volant moteur	24
2.1.10 Équilibrage du moteur et masses d'équilibre	24
2.1.11 Engrenages de distribution	24
2.1.12 Équipements accessoires	25
2.1.13 Circuit d'admission d'air	26
2.1.13.1 Soufflante	27
2.1.13.2 Turbo-compresseur (6V92)	27
2.1.13.3 Post-refroidisseur du turbo	28
2.2 Accessoires	29
2.2.1 Système d'alimentation	30
2.2.1.1 Injecteurs	30
2.2.1.2 Pompe à combustible	31
2.2.1.3 Régulateurs	31
2.2.1.4 Régulateur de limitation de vitesse mécanique (6V71)	31
2.2.1.5 DDEC (6V92)	32
2.2.2 Circuit de graissage	32
2.2.2.1 Pompe à huile	33
2.2.2.2 Soupapes régulatrices de pression	34
2.2.2.3 Refroidisseur d'huile de graissage	34
2.2.3 Circuit de refroidissement	35
2.2.3.1 Pompe à eau	36
2.2.3.2 Boyaux d'eau du moteur	36

2.2.3.3 Thermostat	36
2.2.3.4 Radiateur	36
2.2.3.5 Ventilateur	37
2.2.4 Équipements électriques	38
2.4.4.1 Alternateur	38
2.4.4.2 Batterie	38
2.4.4.3 Démarreur	38
2.2.5 Transmission automatique	39
2.2.5.1 Refroidisseur d'huile	39
2.2.6 Compresseur d'air	40
2.2.7 Pompe de servodirection	40
 Chapitre 3 : Théories relatives à l'analyse de fiabilité	 41
3.1 Tests de valeurs extrêmes	41
3.1.1 Test B4 et test de Gruber	42
3.2 Modèles de fiabilité	43
3.2.1 Densité de probabilité	43
3.2.2 Fonction de répartition	45
3.2.3 Fonction de fiabilité	46
3.2.4 Taux de défaillance	46
3.2.5 Durée moyenne de bon fonctionnement	47
3.3 Lois de probabilité utilisées en fiabilité	48
3.3.1 Distribution exponentielle	48
3.3.2 Distributions normales et lognormales	49
3.3.3 Distribution de Weibull	54
3.3.4 Distribution de Weibull déphasée	55
3.3.5 Distribution de Hastings	56
3.4 Méthodes d'estimation des paramètres	58

3.4.1 Méthodes graphiques et régression linéaire	58
3.4.2 Maximum de vraisemblance	58
3.4.3 Méthode de précision maximale	62
3.5 Tests de validation des modèles	65
3.5.1 Test de Kolmogorov-Smirnov	66
3.5.2 Test de précision maximale	67
 Chapitre 4 : Analyse des modèles générés	 68
4.1 Méthode de filtrage des données	68
4.1.1 Composantes contrôlées	68
4.1.1.1 Interprétation des données préventives	68
4.1.1.2 Valeurs extrêmes	69
4.1.1.3 Codes spécifiques attribués pour le compresseur d'air	69
4.1.2 Composantes suivies	70
4.1.2.1 Interprétation des données préventives	70
4.2 Élaboration des modèles pour chaque unité	71
4.3 Logiciel d'analyse RELCODE	71
4.3.1 Distributions de Weibull et de Hastings	76
4.3.2 Méthodes d'estimation de paramètres	77
4.3.3 Test de validation de modèle	77
4.3.4 Analyse de chaque modèle	78
4.4 Tableaux d'analyse	79
4.4.1 Unités contrôlées	80
4.4.1.1 Boyaux du moteur 1	80
4.4.1.2 Boyaux du moteur 2	82
4.4.1.3 Compresseur d'air 1	85
4.4.1.4 Compresseur d'air 2	87
4.4.1.5 Démarreur 1	89

4.4.1.6 Démarreur 2	91
4.4.1.7 Pompe à eau 1	93
4.4.1.8 Pompe à eau 2	95
4.4.2 Unités suivies	97
4.4.2.1 Alternateur 1	97
4.4.2.2 Alternateur 2	99
4.4.2.3 Alternateur 3	101
4.4.2.4 Culasse 1	103
4.4.2.5 Culasse 2	105
4.4.2.6 Injecteurs 1	106
4.4.2.7 Injecteurs 2	109
4.4.2.8 Soufflante 1	110
4.4.2.9 Soufflante 2	112
4.4.2.10 Transmission 1	115
4.4.2.11 Transmission 2	117
4.4.2.12 Transmission 3	118
4.4.2.13 Turbo-compresseur	120
4.5 Sommaire de l'analyse	122
 Chapitre 5 : Optimisation des périodes de maintenance	125
 5.1 Optimisation de la maintenance basée sur les coûts d'exploitation	125
5.2 Optimisation des périodes de maintenance basée sur la fiabilité	129
5.2.1 Théorie d'analyse	130
5.2.2 Effet de la maintenance sur la fiabilité des composantes	134
5.3 Obtention des coûts du correctif, préventif et de la main d'oeuvre	137
5.4 Utilisation du logiciel RELCODE pour l'optimisation	138
5.5 Analyse de résultats	142
5.5.1 Unités suivies	143

5.5.1.1	Alternateur 1	143
5.5.1.2	Alternateur 2	143
5.5.1.3	Alternateur 3	144
5.5.1.4	Culasse 1	144
5.5.1.5	Culasse 2	144
5.5.1.6	Injecteurs 1	144
5.5.1.7	Injecteurs 2	145
5.5.1.8	Soufflante 1	145
5.5.1.9	Soufflante 2	145
5.5.1.10	Transmission 1	145
5.5.1.11	Transmission 2	145
5.5.1.12	Transmission 3	146
5.5.1.13	Turbo-compresseur	146
5.5.2	Unités contrôlées	146
5.5.2.1	Boyaux du moteur 1	146
5.5.2.2	Boyaux du moteur 2	146
5.5.2.3	Compresseur d'air 1	146
5.5.2.4	Compresseur d'air 2	147
5.5.2.5	Démarrreur 1	147
5.5.2.6	Démarrreur 2	147
5.5.2.7	Pompe à eau 1	147
5.5.2.8	Pompe à eau 2	147
5.6	Recommandations	148
Chapitre 6 : Conclusion		150
Références		153

Annexes	154
---------------	-----

Liste des tableaux

1.1 : Classifications et spécifications des autobus	7
1.2 : Répartition par classe d'autobus dans la flotte	8
1.3 : Modèles de composantes	10
1.4 : Kilométrage limite des unités contrôlées	11
4.1 : Résultats du MV pour les boyaux du moteur 1	80
4.2 : Résultats du MV pour les boyaux du moteur 2	82
4.3 : Résultats du MV pour le compresseur d'air 1	85
4.4 : Résultats du MV pour le compresseur d'air 2	87
4.5 : Résultats du MV pour le démarreur 1	89
4.6 : Résultats du MV pour le démarreur 2	91
4.7 : Résultats du MV pour la pompe à eau 1	93
4.8 : Résultats du MV pour la pompe à eau 2	95
4.9 : Résultats du MV pour l'alternateur 1	97
4.10 : Résultats du MV pour l'alternateur 2	99
4.11 : Résultats du MV pour l'alternateur 3	101
4.12 : Résultats du MV pour la culasse 1	103
4.13 : Résultats du MV pour la culasse 2	105
4.14 : Résultats du MV pour les injecteurs 1	106
4.15 : Résultats du MV pour les injecteurs 2	109
4.16 : Résultats du MV pour la soufflante 1	110
4.17 : Résultats du MV pour la soufflante 2	112
4.18 : Résultats du MV pour la transmission 1	115
4.19 : Résultats du MV pour la transmission 2	117
4.20 : Résultats du MV pour la transmission 3	118
4.21 : Résultats du MV pour le turbocompresseur	120
4.22 : Paramètres de la loi de Weibull pour les composantes suivies	123

4.23 : Paramètres de la loi de Weibull pour les composantes contrôlées	124
5.1 : Variation de la fiabilité (ALTE1)	136
5.2 : Variation de la fiabilité (COMPI)	137
5.3 : Coût du remplacement préventif et correctif	138
5.4 : Période optimale de remplacement préventif	141
5.5 : Recommandations pour les composantes suivies	148
5.6 : Recommandations pour les composantes contrôlées	149
6.1 : Sommaire des recommandations	151
C.1 : Résultats du MV pour l'alternateur 1	201
C.2 : Résultats du MV pour l'alternateur 2	202
C.3 : Résultats du MV pour l'alternateur 3	203
C.4 : Résultats du MV pour la culasse 1	204
C.5 : Résultats du MV pour la culasse 2	205
C.6 : Résultats du MV pour les injecteurs 1	206
C.7 : Résultats du MV pour les injecteurs 2	207
C.8 : Résultats du MV pour la soufflante 1	208
C.9 : Résultats du MV pour la soufflante 2	209
C.10 : Résultats du MV pour la transmission 1	210
C.11 : Résultats du MV pour la transmission 2	211
C.12 : Résultats du MV pour la transmission 3	212
C.13 : Résultats du MV pour le turbocompresseur	213
C.14 : Résultats du MV pour les boyaux du moteur 1	214
C.15 : Résultats du MV pour les boyaux du moteur 2	215
C.16 : Résultats du MV pour le compresseur d'air 1	216
C.17 : Résultats du MV pour le compresseur d'air 2	217
C.18 : Résultats du MV pour le démarreur 1	218

C.19 : Résultats du MV pour le démarreur 2	219
C.20 : Résultats du MV pour la pompe à eau 1	220
C.21 : Résultats du MV pour la pompe à eau 2	221

Listes des figures

1.1 : Périodes de vie d'une composante	12
2.1 : Cycle du moteur à deux temps	16
2.2 : Le moteur et ses composantes	17
2.3 : Bloc-cylindres	18
2.4 : Vilebrequin	19
2.5 : Mécanisme de commande	20
2.6 : Piston	21
2.7 : Bielle	22
2.8 : Couvercle de culbuteur	23
2.9 : Engrenages de distribution	25
2.10 : Circuit d'admission d'air	26
2.11 : Turbocompresseur	28
2.12 : Accessoires du moteur	29
2.13 : Système d'alimentation	30
2.14 : Régulateur de vitesse	32
2.15 : Circuit de graissage	33
2.16 : Refroidisseur d'huile	34
2.17 : Circuit de refroidissement	35
2.18 : Radiateur	37
2.19 : Refroidisseur d'huile à transmission	39
3.1 : Histogramme de la densité de fréquence relative et densité de probabilité	44
3.2 : Courbe en baignoire	47
3.3 : Densité de probabilité et fonction de répartition de la loi exponentielle	48
3.4 : Effet de la loi centrée réduite	52
3.5 : Loi de Weibull à trois paramètres	55
4.1 : Courbe de fiabilité obtenue avec RELCODE	76

5.1 : Optimisation par le coût	126
5.2 : Durée moyenne de vie	133
5.3 : Fiabilité en fonction de la période de maintenance (Alternateur 1)	135
5.4 : Fiabilité en fonction de la période de maintenance (Compresseur d'air 1)	136
5.5 : Optimisation par le coût (Alternateur 1)	139
A.1 : Fiabilité de la composante	155
A.2 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	156
A.3 : Fiabilité de la composante	157
A.4 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	158
A.5 : Fiabilité de la composante	159
A.6 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	160
A.7 : Fiabilité de la composante	161
A.8 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	162
A.9 : Fiabilité de la composante	163
A.10 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	164
A.11 : Fiabilité de la composante	165
A.12 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	166
A.13 : Fiabilité de la composante	167
A.14 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	168
A.15 : Fiabilité de la composante	169
A.16 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	170
A.17 : Fiabilité de la composante	171
A.18 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	172
A.19 : Fiabilité de la composante	173
A.20 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	174
A.21 : Fiabilité de la composante	175
A.22 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	176
A.23 : Fiabilité de la composante	177

A.24 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	178
A.25 : Fiabilité de la composante	179
A.26 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	180
A.27 : Fiabilité de la composante	181
A.28 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	182
A.29 : Fiabilité de la composante	183
A.30 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	184
A.31 : Fiabilité de la composante	185
A.32 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	186
A.33 : Fiabilité de la composante	187
A.34 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	188
A.35 : Fiabilité de la composante	189
A.36 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	190
A.37 : Fiabilité de la composante	191
A.38 : Mainteanbilité en fonction de la période de remplacement	192
A.39 : Fiabilité de la composante	193
A.40 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	194
A.41 : Fiabilité de la composante	195
A.42 : Maintenabilité en fonction de la période de remplacement	196
C.1 : Variation de la fiabilité (alternateur 1)	201
C.2 : Variation de la fiabilité (alternateur 2)	202
C.3 : Variation de la fiabilité (alternateur 3)	203
C.4 : Variation de la fiabilité (culasse 1)	204
C.5 : Variation de la fiabilité (culasse 2)	205
C.6 : Variation de la fiabilité (injecteurs 1)	206
C.7 : Variation de la fiabilité (injecteurs 2)	207
C.8 : Variation de la fiabilité (soufflante 1)	208
C.9 : Variation de la fiabilité (soufflante 2)	209

C.10 : Variation de la fiabilité (transmission 1)	210
C.11 : Variation de la fiabilité (transmission 2)	211
C.12 : Variation de la fiabilité (transmission 3)	212
C.13 : Variation de la fiabilité (turbocompresseur)	213
C.14 : Variation de la fiabilité (boyaux du moteur 1)	214
C.15 : Variation de la fiabilité (boyaux du moteur 2)	215
C.16 : Variation de la fiabilité (compresseur d'air 1)	216
C.17 : Variation de la fiabilité (compresseur d'air 2)	217
C.18 : Variation de la fiabilité (démarrreur 1)	218
C.19 : Variation de la fiabilité (démarrreur 2)	219
C.20 : Variation de la fiabilité (pompe à eau 1)	220
C.21 : Variation de la fiabilité (pompe à eau 2)	221
D.1 : Optimisation par le coût (Alternateur 1)	223
D.2 : Optimisation par le coût (Culasse 2)	225
D.3 : Optimisation par le coût (Injecteurs 1)	226
D.4 : Optimisation par le coût (Injecteurs 2)	227
D.5 : Optimisation par le coût (Soufflante 1)	228
D.6 : Optimisation par le coût (Soufflante 2)	229
D.7 : Optimisation par le coût (Compresseur d'air 1)	232
D.8 : Optimisation par le coût (Compresseur d'air 2)	233
D.9 : Optimisation par le coût (Démarrreur 1)	234
D.10 : Optimisation par le coût (Pompe à eau 1)	235

Liste des annexes

Annexe A : Modèles de fiabilité	154
Annexe B : Programme de calcul des périodes de remplacement préventif	197
Annexe C : Variation de la fiabilité en fonction de la période T_p	200
Annexe D : Optimisation des périodes de remplacement préventif selon le coût	222

Chapitre 1- Introduction

Le projet consiste à évaluer et optimiser le programme d'entretien du groupe motopropulseur d'une flotte d'autobus urbain. La flotte est composée de plus de 1600 autobus répartis dans sept centres de transport urbains de la ville de Montréal. L'âge maximal des autobus est de 16 ans, période au bout de laquelle ils sont automatiquement mis au rancart. Les autobus peuvent être propulsés par deux types de moteurs et trois types de transmission. Le groupe est complété par diverses sous-composantes qui utilisent l'énergie fournie par le moteur. De plus, les groupes sont montés sur 6 types de châssis différents.

Au commencement d'un tel projet, il est nécessaire de bien définir les variables impliquées et préciser l'objectif le plus clairement possible. Pour évaluer la fiabilité du groupe motopropulseur (GMP), il faut d'abord en déterminer les limites physiques. Il faut définir en quoi consiste une défaillance du groupe et pour ce faire, il faut connaître la mission de ce dernier ; S'agit-il d'éviter les pannes à tout prix ou bien d'être le plus économique possible? Voilà deux principes totalement opposés puisque chacun exige une gestion diamétralement différente. Ce dernier point met en évidence l'importance de la gestion au sein des projets de fiabilité et de maintenance.

Les budgets consacrés à la maintenance sont inévitablement liés à la fiabilité du groupe. En effet, il est toujours possible de maintenir une fiabilité voisinant l'unité en y allouant des sommes considérables. Le vrai défi consiste à équilibrer le niveau de fiabilité et les dépenses afin d'optimiser le rendement global du groupe. Ceci dit, l'évaluation de la fiabilité du groupe n'en est pas moins importante puisqu'elle permet de visualiser la situation et de prendre une décision sur le type de gestion à employer pour rencontrer les objectifs. Cette gestion précise alors quels seront les travaux de maintenance sur le groupe et à quelles fréquences ils seront exécutés.

Dans le cas présent, on désire optimiser un programme de maintenance qui est actuellement en place. Certaines interventions sont de type systématique, c'est-à-dire qu'elles consistent en un remplacement de certaines composantes par des composantes neuves après une période prédéterminée, indépendamment de leurs conditions. Les autres interventions sont de nature corrective. Elles sont donc initiées par une défaillance de la composante. Il s'agit donc de minimiser les défaillances et, par conséquent, réduire le recours aux remplacements correctifs. Cela peut être accompli avec la mise en oeuvre d'un programme de maintenance préventive ou systématique.

Il est rare que la durée de vie du groupe motopropulseur continue au delà de 700 000 km, ce qui correspond à la moitié de la vie d'un autobus. Souvent, il est nécessaire de procéder à une grande révision du moteur (GRMO). Cette grande révision consiste à dépouiller le moteur de ces composantes et de le démonter pièces par pièces. Les pièces et les composantes sont alors envoyées dans des ateliers de reconditionnement et sont remplacées par des composantes préalablement réusinées. Il arrive donc que des pièces presque neuves installées récemment soient envoyées à l'atelier parce que le groupe est en grande révision.

Il existe aussi un programme d'inspection régulier dont la période varie entre 5000 et 7500 km dépendant du centre de transport. Ce programme comporte une inspection visuelle et une inspection complète. Un système d'alternance est employé entre les deux inspections. Ces inspections permettent d'évaluer les performances du groupe et de certaines composantes. Les résultats obtenus servent de critères quant à la pertinence d'une grande révision ou au remplacement correctif des composantes. Il faut cependant noter que le principal critère de décision en ce qui a trait à une grande révision est le kilométrage du groupe au moment de l'inspection.

La première étape consiste en la mise en place d'un système d'acquisition de données qui permettra d'obtenir les informations pour le calcul de la fiabilité des diverses composantes et du système global. Les activités qui touchent cette sphère sont éparpillées parmi les différents ateliers et les centres de transport.

Des modèles simulant la durée de vie de chaque composante du système pourront ensuite être élaborés. Il devient donc important de bien répertorier les composantes car chacune d'elle peut avoir un effet non négligeable sur la maintenabilité du système. Les modèles permettront de bien visualiser et de calculer les coûts globaux d'opérations de façon précise. Cela pourra servir d'outil d'optimisation pour l'élaboration d'un programme de maintenance préventive.

1.1 Fiabilité du groupe motopropulseur selon sa capacité à remplir une mission

Le concept de fiabilité doit toujours être accompagné d'une définition précise de ce qui est considérée comme étant une défaillance du système. En effet, la fiabilité représente la probabilité que l'événement 'défaillance' ne se produise pas sur une certaine période de temps. Il est donc possible de définir plusieurs modèles de fiabilité pour une même composante et chacun représentera la probabilité de non-occurrence d'une défaillance. Il est important de définir ce que signifie une défaillance pour le groupe car cette définition sera conservée et accompagnera les modèles de fiabilité tout au long du projet.

Le terme défaillance peut avoir plusieurs significations. Par exemple, lorsqu'un ouvrier fait l'inspection d'une composante, il peut en apprécier le degré d'usure, ce qui peut ensuite le motiver à remplacer la composante si la dégradation est jugée appréciable. La pièce a donc été jugée inapte à poursuivre sa fonction. S'agit-il d'une défaillance pour autant ? C'est ici que la définition de la défaillance entre en jeu. Au sens strict du mot, il ne s'agit pas d'une défaillance puisque la pièce a performé adéquatement sans panne jusqu'au moment du

remplacement. On peut donc déduire qu'il s'agit d'un remplacement préventif puisque l'ouvrier a entrevu une défaillance imminente, ce qui a entraîné sa décision.

Pour cette étude, nous avons décidé que la défaillance d'une pièce signifie que cette dernière n'est plus apte à poursuivre sa mission. Ainsi, le cas décrit dans le paragraphe précédent représente donc une défaillance tout autant qu'une panne ou un bris mécanique. Alternativement, le remplacement préventif est employé dans le cadre de limites de contrôle précises.

1.2 Programme de maintenance de la STCUM

La STCUM a établi un programme de maintenance préventive sur plusieurs composantes dont certaines font partie du groupe motopropulseur étudié dans le cadre de cette étude. Pour ces composantes, un remplacement systématique est effectué après une période active déterminée. Cette période sera désignée par le terme 'Limite de contrôle' tout au long de ce projet. À titre d'exemple, la limite de contrôle d'un compresseur d'air de modèle 1 est de 180 000 km. Cela signifie que tous les compresseurs d'air du même modèle seront remplacés, indépendamment de leur état, par un neuf lorsqu'ils auront atteint ce kilométrage.

Pour les autres composantes, qui ne sont pas soumises à une limite de contrôle, le remplacement sera effectué lors d'une défaillance tel que décrit plus haut; c'est-à-dire lors d'une panne ou lorsque le degré d'usure sera jugé inacceptable par un ouvrier lors d'une inspection visuelle.

1.3 Banque de données de la STCUM

En date du premier janvier 1995, la STCUM a instauré une banque de donnée dans le but de suivre le comportement de certaines composantes dont une dizaine font partie du groupe motopropulseur. C'est sur ces composantes que l'analyse de fiabilité a été dirigée. Pour chacune d'elle, on retrouve dans la banque de données, la durée de vie et le mode de remplacement (défaillance ou remplacement préventif), de même que la provenance (centre de transport, unité). Les analyses ont été effectuées à partir de données recueillies durant la période de janvier 1995 à février 1996, soit pendant un an. Hormis les données de période de vie, il a aussi été possible de recueillir les coûts relatifs aux réusinages et aux remplacements des composantes grâce à la banque de données et au personnel de la STCUM.

Théoriquement, pour procéder à une analyse complète de la fiabilité, il faudrait générer des modèles pour chacune des composantes et sous-composantes du groupe motopropulseur. Évidemment, la banque de données disponible ne contient pas toutes les composantes du groupe. On pouvait cependant isoler les composantes qui avait la plus grande influence sur le groupe, c'est-à-dire celles qui présentent le plus grand nombre de défaillances. Un sondage a été effectué auprès des contremaîtres des centres de transport afin de connaître leur opinion à ce sujet. Il en est ressorti que l'ajout des composantes suivantes à la banque de données serait justifié:

- radiateur,
- ventilateur,
- pompe à carburant,
- pompe de servodirection,
- cylindre d'arrêt,
- refroidisseur d'huile à transmission,
- boîte de vitesse.

1.4 Description de la flotte d'autobus de la STCUM

Tel que mentionné précédemment, la flotte d'autobus est composée de plus de 1600 unités réparties dans sept centres de transports. Pour les besoins de la banque de données, chaque centre de transport est associé à un chiffre compris entre 54 et 60 sauf l'atelier de réparation Crémazie qui est désigné par le chiffre 82:

- 54- Anjou,
- 55- St-Denis,
- 56- Lasalle,
- 57- Mont-Royal,
- 58- Legendre,
- 59- Frontenac,
- 60- Saint-Laurent,
- 82- Crémazie.

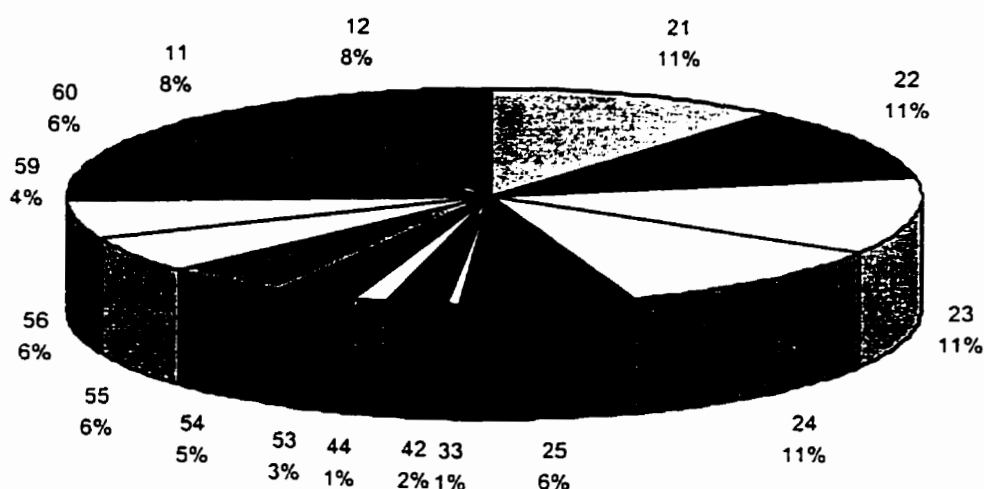
Parmi les 1600 autobus, on compte une dizaine de modèles classifiés par des chiffres de 11 à 60 et qui représentent la classe de l'autobus. Le terme 'classe' est employé pour associer les autobus qui ont été achetés lors d'une même période. Chaque classe représente donc une quantité d'autobus qui ont les mêmes caractéristiques et les mêmes composantes. Le tableau suivant permet d'associer les classes et leurs composantes:

Tableau 1.1 : Classifications et spécifications des autobus

Classe	Dates	Quantité	Modèle	Moteur	Transmission
21	Nov 78 - Jan 79	146	T6H-5307N	6V-71N	V730-D
22	Jan 79 - Déc 79	148	T6H-5307N	6V-71N	V730-D
23	Jan 80 - Déc 80	148	T6H-5307N	6V-71N	V730-D
24	Jan 81 - Nov 81	147	T6H-5307N	6V-71N	V730-D
25	Sep 82 - Nov 82	85	T6H-5307N	6V-71N	V730-D
33	Avr 83	8	T6H-5307N	6V-71N	V730-D
42	Jan 80 - Jun 80	30	T6H-5307N	6V-71N	V730-D
44	Oct 81 - Nov 81	18	T6H-5307N	6V-71N	V730-D
53	Mai 83 - Jan 84	40	TC 40102N	6V-71N	V730-D
54	Mai 84 - Aoû 84	60	TC 40102N	6V-71N	V730-D
55	Aoû 85 - Nov 85	75	TC 40102N	6V-71N	V731-D
56	Avr 86 - Nov 86	75	TC 40102N	6V-71N	V731-D
59	Oct 89 - Déc 89	59	TC 40102N	6V-92TA	V731-D
60	Jan 90 - Mar 90	79	TC 40102N	6V-92TA	V731-D
11	Aoû 91 -Oct 91	100	TC 40102N	6V-92TA	VR731-D
12	Mar 92 - Dec 92	100	TC 40102N	6V-92TA	VR731-D
13	Jan 93	100	TC 40102N	6V-92TA	VR731-D
14	Jan 94	180	TC 40102N	6V-92TA	VR731-D
15	Jan 95	140	TC 40102N	6V-92TA	VR731-D

Le graphique suivant permet de visualiser la proportion de chacune des classes d'autobus dans la flotte:

Tableau 1.2 : Repartition par classe d'autobus dans la flotte



1.5 Composantes suivies par la banque de données

Plusieurs composantes sont suivies par la banque de données informatique. Pour chacune d'elle, on enregistre le moment de mise au rancart, c'est-à-dire le kilométrage où elle est remplacée par une pièce réusinée ou une pièce neuve. Les composantes sont désignées dans la banque par le numéro d'identification du véhicule sur lequel elles sont utilisées (44-001 : premier autobus de la classe 44). Le kilométrage des autobus ainsi que chaque composante suivie est mis à jour deux fois par semaine. La liste suivante énumère les composantes suivies:

- alternateur,
- boyaux du moteur,
- compresseur d'air,
- culasse,
- démarreur,
- injecteurs,
- pompe à eau,
- soufflante,
- transmission,
- turbocompresseur.

Tel que mentionné plus haut et illustré dans le tableau 1.1, les composantes des groupes motopropulseurs peuvent différer selon la classe d'autobus. Il existe donc différents modèles pour chacune des composantes suivies. Le tableau suivant désigne les différents modèles de composantes et les classes auxquelles ils sont associés:

Tableau 1.3 : Modèles de composantes

Composante - Modèle #	Classe d'autobus	Désignation
Alternateur - mod 1	21-44	6V71
Alternateur - mod 2	53-56	6V71
Alternateur - mod 3	59-60, 11-15	6V92
Boyaux du moteur - mod 1	21-56	6V71
Boyaux du moteur - mod 2	59-60, 11-15	6V92
Culasse - mod 1	21-56	6V71
Culasse - mod 2	59-60, 11-15	6V92
Compresseur d'air - mod 1	21-60	Tuflo - 700
Compresseur d'air - mod 2	11-15	Tuflo - 750
Démarrreur - mod 1	21-56	6V71
Démarrreur - mod 2	59-60, 11-15	6V92
Injecteurs - mod 1	21-56	6V71
Injecteurs - mod 2	59-60, 11-15	6V92
Pompe à eau - mod 1	21-56	6V71
Pompe à eau - mod 2	59-60, 11-15	6V92
Soufflante - mod 1	21-56	6V71
Soufflante - mod 2	59-60, 11-15	6V92
Transmission - mod1	21-54	V730 - D
Transmission - mod2	55-60	V731 - D
Transmission - mod 3	11-15	VR731 - D
Turbocompresseur	59-60, 11-15	6V92

Parmi les composantes suivies, on compte quatre composantes contrôlées. Cela signifie que lorsqu'elles ont atteint un kilométrage limite, elles sont automatiquement remplacées dans le cadre d'un programme de maintenance préventive systématique. Le tableau 1.4 présente les composantes contrôlées ainsi que la limite de contrôle:

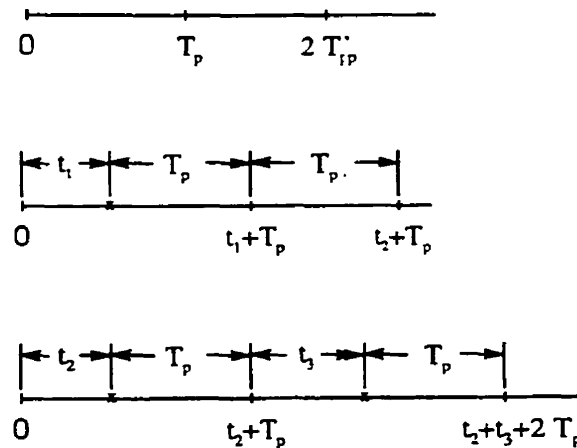
Tableau 1.4 : Kilométrage limite des composantes contrôlées

Composantes - Modèle #	Limite de contrôle
Boyaux du moteur - mod 1 et 2	240 000 km
Compresseur d'air - mod 1	180 000 km
Compresseur d'air - mod 2	240 000 km
Démarrreur - mod 1	300 000 km
Démarrreur - mod 2	240 000 km
Pompe à eau - mod 1 et 2	240 000 km

1.6 Durée de vie des composantes

Chaque composante a une durée de vie qui lui est propre. Dans le cadre d'un programme de fiabilité et de maintenance préventive d'un système, on désire déterminer cette variable pour chacune des pièces qui le compose. Cela peut être accompli par des théories de probabilité et de statistique. À l'aide de l'historique de pièces identiques utilisées dans des conditions similaires, on peut établir un modèle qui correspond au comportement des pièces. On peut alors estimer leurs durées de vie avec un modèle valide.

La durée de vie d'une composante est définie par la période entre le temps zéro où elle est installée jusqu'à t_f , le temps de défaillance ou T_p , le temps de remplacement préventif (figure 1.1). Il arrive parfois que certaines pièces soient envoyées dans un atelier de réusinage à la suite d'une défaillance. La composante est alors réusinée et peut entreprendre une nouvelle vie. L'espérance de vie n'est pas nécessairement équivalente à celle d'une pièce neuve. Elle dépend, entre autres, de la qualité du réusinage. Habituellement, elle peut être estimée à l'aide d'un facteur de reconditionnement. Évidemment, ce facteur doit être estimé avec un modèle statistique basé sur l'historique de composantes ayant reçues le même traitement.



Les 'x' représentent des défaillances

Figure 1.1 : Périodes de vie d'une composante

Le réusinage des pièces ajoute une option intéressante au niveau de l'optimisation du programme de maintenance. Encore une fois, il s'agit d'évaluer le niveau de reconditionnement qui permet d'accroître le rendement économique des composantes tout en gardant un niveau de fiabilité acceptable. Il soulève cependant une problématique pour le suivi des pièces. En effet, il est difficile de retracer les composantes réusinées parmi les autres. Ainsi, il peut s'avérer ardu d'évaluer la fiabilité dans les situations où l'on pratique le réusinage multiple d'une même pièce. Il est donc très important d'avoir un suivi qui permet de connaître l'historique de chacune afin de pouvoir les distinguer des autres.

Dans le cas présent, il était difficile de tenir compte de cette particularité pour évaluer le facteur de reconditionnement. Cependant, une visite des ateliers de réusinage a permis de constater l'efficacité de ces dernières ainsi que le budget et les moyens disponibles. Nous avons constaté que la revitalisation des composantes ramenait leur condition à un état presque neuf, ce qui équivaut à un facteur de reconditionnement voisin de l'unité.

1.7 Objectif : optimisation de la maintenance préventive

L'objectif principal du projet consiste à élaborer une stratégie de maintenance basée sur l'analyse de la fiabilité des composantes du groupe motopropulseur. Tel que mentionné plus haut, plusieurs activités de maintenance sont actuellement réalisées sur le groupe motopropulseur. Cependant, il existe un manque de coordination entre elles, ce qui entraîne des dépenses inutiles. Les limites de contrôle des composantes ont été déterminées avec l'historique et l'expérience des opérateurs. De plus, un grand nombre de composantes n'est soumis à aucune limite de contrôle.

Pour les unités suivies par la banque de données, il est possible d'entamer des calculs d'optimisation basés sur les modèles de fiabilité obtenus à partir du retour d'expérience. L'optimisation comporte deux volets. On recherche d'abord l'effet de la période de remplacement préventif T_p sur la fiabilité. Ensuite, on évalue la période optimale selon les coûts d'opérations. Finalement, on opte pour des périodes de maintenance qui satisfont aux deux volets de l'optimisation. Il est aussi favorable de coordonner les périodes afin de les regrouper, ce qui entraîne à nouveau des réductions de coûts.

L'objectif global du projet sera donc de minimiser les coûts de maintenance sur le groupe motopropulseur en se servant de modèles de fiabilité élaborés pour les composantes.

Chapitre 2 : Description du groupe motopropulseur

Le but de ce chapitre est de définir et clarifier ce que l'on désignera par la suite comme groupe motopropulseur. On tentera aussi de définir le rôle et la relation de chacune des composantes par rapport au groupe. Le coeur du groupe est le moteur en tant que tel ainsi que ses multiples composantes. Ensuite sont greffés les différents systèmes nécessaires à un fonctionnement adéquat, c'est-à-dire les systèmes suivants: le circuit électrique, le circuit d'alimentation en carburant, le circuit de refroidissement, le circuit de lubrification, le circuit d'alimentation d'air et finalement la transmission. Chacun de ces système est composé d'une ou plusieurs composantes qui, à leur tour, se divisent en plusieurs sous-composantes.

2.1 Moteurs

Deux moteurs différents sont analysés dans le cadre de ce projet, soit les 6V71 et 6V92 de la compagnie Detroit Diesel [4]. Les deux moteurs fonctionnent sur des cycles à deux temps et sont alimentés en carburant diesel par un système d'injection. Comme l'indique leur désignation, ils sont composés de 6 cylindres positionnés en V. Les deux derniers chiffres 71 et 92 indiquent la cylindrée respective d'un cylindre. On note aussi que dans la plupart des cas, ils requièrent l'apport d'unités différentes.

2.1.1 Description

2.1.1.1 Moteur diesel à deux temps

Les moteurs sont constitués d'un ensemble de pièces assemblées selon un ordre bien déterminé pour transformer l'énergie du carburant en travail utile [11]. Dans notre cas, il s'agit de moteurs à combustion interne. Un (ou plusieurs) cylindre est rempli d'un mélange de carburant et d'air qui est comprimé sans apport ni retrait de chaleur. La combustion du carburant ajoute une certaine quantité de chaleur à volume constant pour augmenter la

pression. Cette augmentation de pression est suivie d'une détente sans apport ni retrait de chaleur jusqu'à ce que les gaz brûlés s'échappent dans l'atmosphère à volume constant.

Les moteurs diesel sont semblables aux moteurs à essence mais sont généralement plus lourds puisqu'ils doivent supporter les pressions élevées résultant des taux de compression plus élevés. Un moteur diesel n'a pas de carburateur. Seul l'air pénètre dans le cylindre durant le temps d'admission et est comprimé durant le temps de compression. Il y a alors injection de carburant dans l'air chauffé sous pression à l'instant opportun. Le carburant diesel étant peu volatil, il s'évapore moins rapidement. Il faut donc le briser en fines gouttelettes ou l'atomiser et l'injecter dans le cylindre sous la forme d'un brouillard. L'air est amené de force dans le cylindre et les gaz d'échappement sont expulsés de force par une soufflante et parfois un turbocompresseur.

2.1.1.2 Principe du moteur à deux temps

Le type le plus courant de gros moteur à deux temps est le moteur diesel. Dans le moteur à deux temps, un cycle complet ne prend que deux courses de piston et un seul tour de vilebrequin. Pour effectuer les quatre opérations (admission, compression, combustion et échappement) durant seulement deux courses du piston, on utilise la base et la tête du piston. Chaque cylindre compte sur des soupapes d'échappements disposées dans la culasse pour permettre l'évacuation des gaz brûlés (voir la figure 2.1).

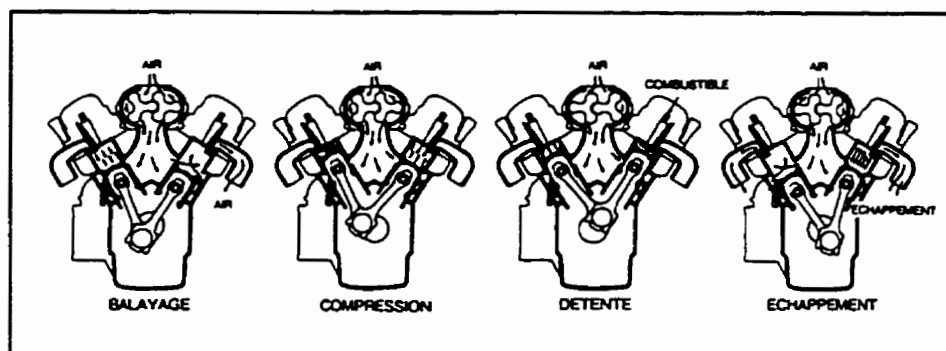


Figure 2.1: Cycle du moteur à deux temps

2.1.1.3 Différences entre 6V71 et 6V92

Les différences majeures entre les deux moteurs relèvent du type d'alimentation en air ainsi que des systèmes d'injection et de contrôle. Pour le 6V71, qui est le prédécesseur du 6V92, l'alimentation en air se fait de façon traditionnelle par le biais d'une soufflante. L'injection du carburant de même que la synchronisation et le contrôle du mélange se font à l'aide de mécanismes mécaniques. Le 6V92 est quant à lui équipé d'un système de turbocompression et mise sur des systèmes électroniques pour gérer les paramètres du moteur dans les différentes phases de son utilisation. La figure 2.2 illustre le moteur et ses sous-composantes principales.

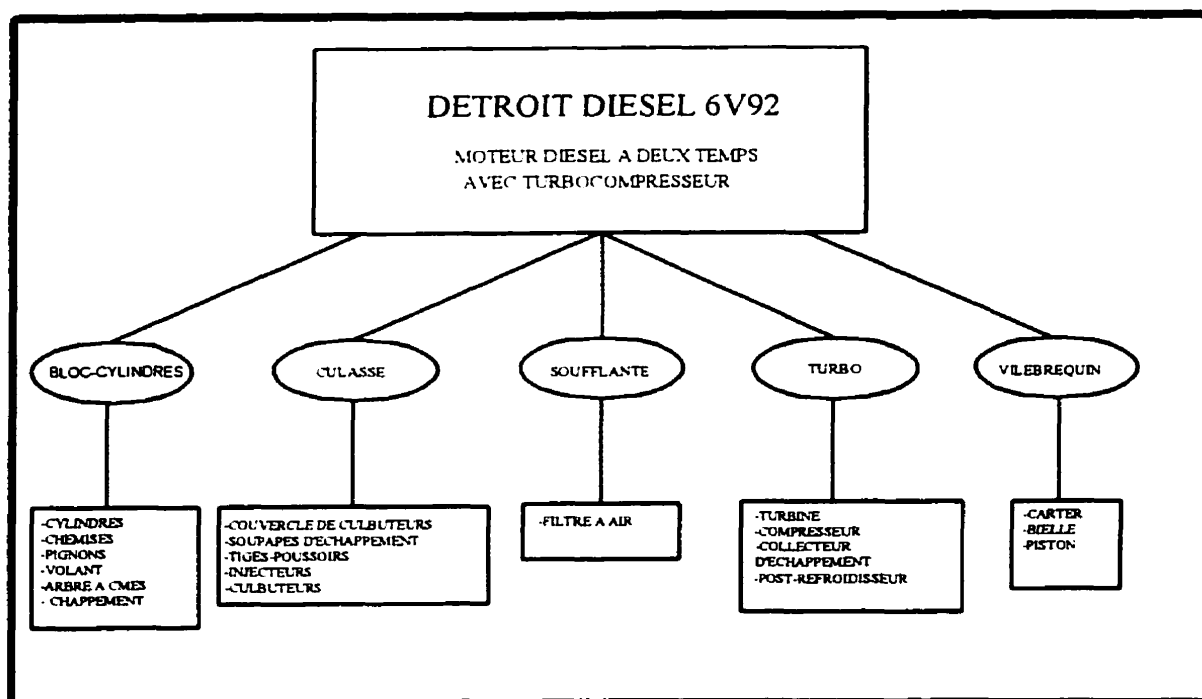


Figure 2.2 : Le moteur et ses composantes

2.1.2 Bloc-cylindres

Le bloc-cylindres (figure 2.3) constitue la pièce principale du moteur. Il s'agit d'une pièce de fonte moulée en un seul morceau et qui, comme son nom l'indique, contient les cylindres. Il est percé par différents alésages, un pour le vilebrequin et deux pour les arbres à cames. Il y a plusieurs canalisations, galeries et orifices qui permettent le passage de l'air, du liquide de refroidissement et de l'huile. Le bloc-cylindres doit être robuste pour ne pas céder sous les forces engendrées par la compression et résistant aux hautes températures générées par la combustion. Des plaques en acier sont fixées aux extrémités avant et arrière du bloc-cylindres. La plaque avant permet le support du couvercle des masses d'équilibrage alors que celle à l'arrière sert de support à la cloche du volant moteur.

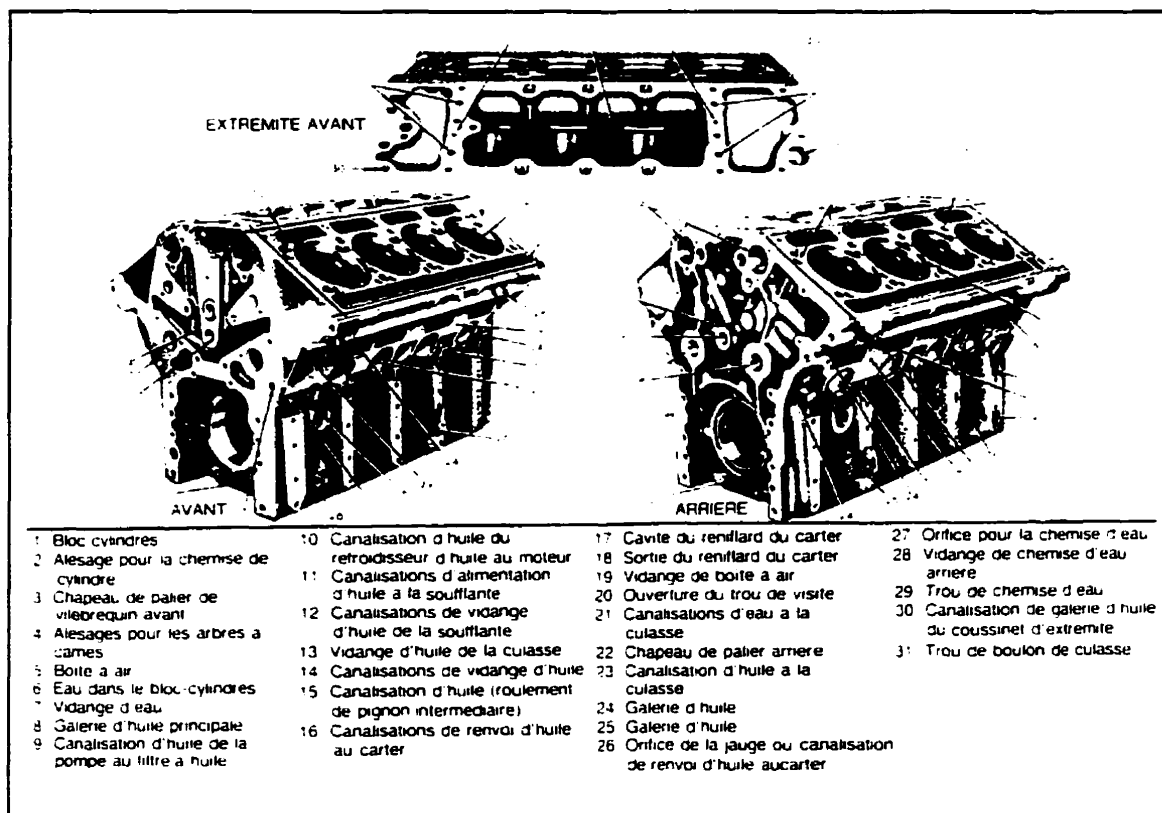


Figure 2.3 : Bloc-cylindres

2.1.3 Vilebrequin

Le vilebrequin est le levier sur lequel les pistons sont fixés par l'intermédiaire des bielles. Il s'agit d'une pièce d'acier très résistante à la flexion et la torsion causée par le couple transmis lors de la combustion. Des contrepoids sont répartis sur sa longueur afin d'en assurer l'équilibre statique et dynamique. Des joints d'étanchéité sont fixés à chacune de ses extrémités pour empêcher les fuites d'huile.

Un couvercle est monté à l'extrémité avant du vilebrequin sous la plaque de fermeture avant du bloc-cylindres. Il a la double fonction de retenir le joint d'étanchéité avant du vilebrequin

et de servir de carter à la pompe d'huile de graissage. La poulie de la pompe d'huile est aussi montée à cette extrémité du vilebrequin.

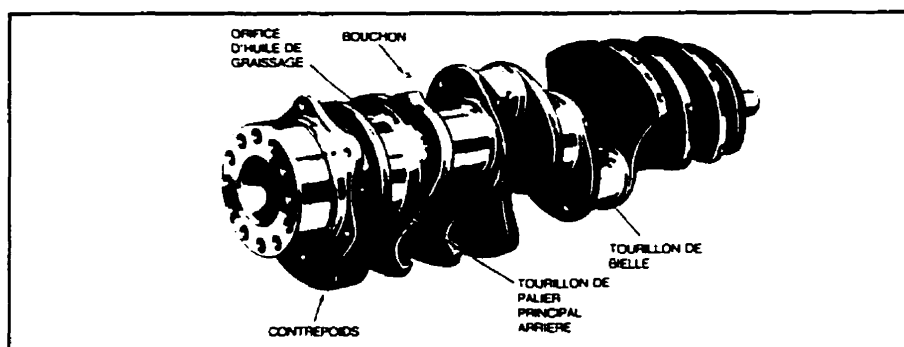


Figure 2.4 : Vilebrequin

2.1.4 Culasse

Les culasses sont des pièces de métal percées en plusieurs endroits afin de permettre l'installation et le fonctionnement des soupapes d'échappement, des injecteurs de carburants et des tiges-poussoirs ainsi que de leurs mécanismes de commande respectifs. Il y a aussi des passages à eau situés à des endroits stratégiques et qui permettent le contrôle de la température dans la culasse. Pour ce qui est des injecteurs, ils sont insérés dans un tube à paroi mince qui permet l'accès et l'évacuation du liquide à refroidissement. On retrouve deux culasses montées sur les deux rangées de cylindres.

2.1.4.1 Mécanismes de commande

Chaque cylindre compte trois culbuteurs, deux d'entre eux actionnent les quatre soupapes d'échappement tandis que l'autre actionne l'injecteur de carburant. Chacun des trios de culbuteur monté sur une rangée de cylindre est actionné par l'arbre à cames par l'entremise d'un ressort hélicoïdal et d'une tige-poussoir qui traverse la culasse.

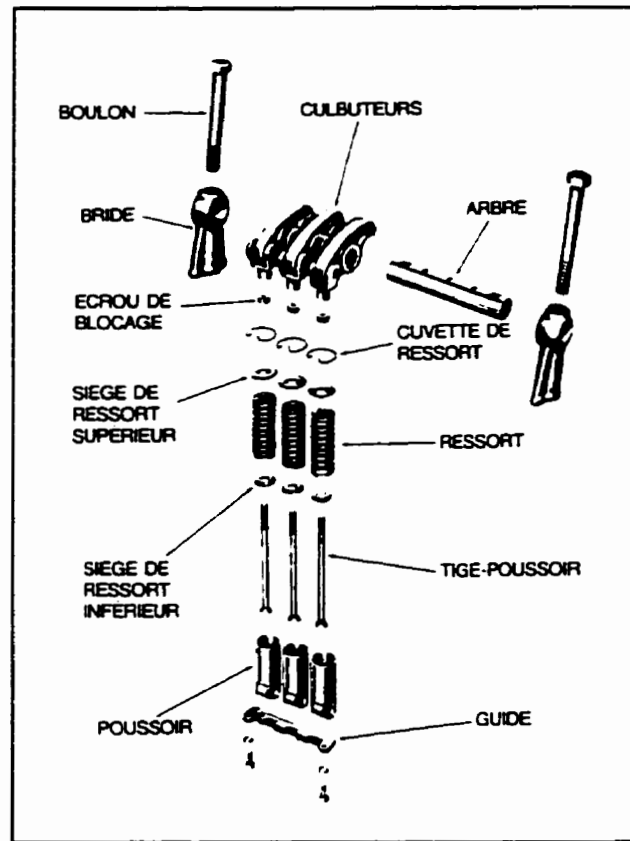


Figure 2.5: Mécanisme de commande

2.1.5 Pistons

Le piston peut être divisé en quelques sous-composantes, les principales étant la tête et la jupe. Les deux parties sont jointes l'une à l'autre pour faire un ensemble rigide et l'axe peut alors être inséré latéralement. C'est le piston qui, par son mouvement de va-et-vient dans le cylindre, transforme l'énergie de la combustion en travail utile. Une variété de segments sont employés entre la paroi extérieure de la jupe et la paroi intérieure des chemises des cylindres. Les segments sont utilisés pour assurer l'étanchéité de la chambre de combustion et empêcher l'huile moteur d'y pénétrer.

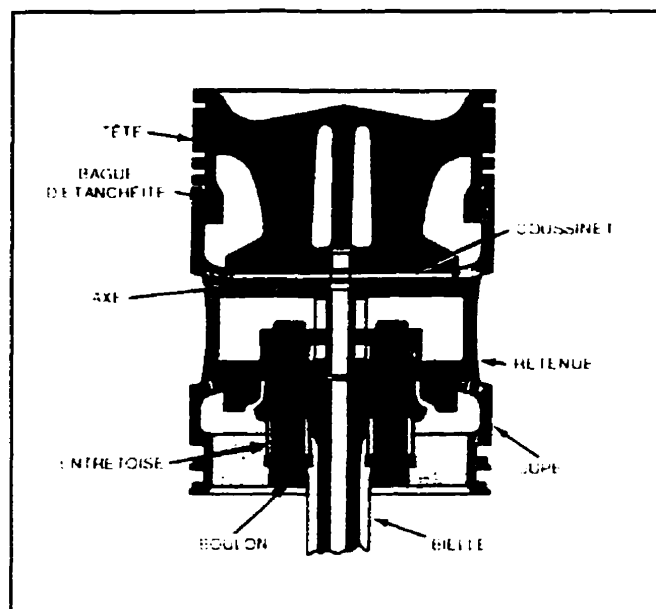


Figure 2.6: Piston

2.1.5.1 Bielle

La bielle relie le piston au vilebrequin. Elle consiste en une pièce de métal forgé en forme de 'Y'. Son extrémité supérieure se fixe à l'axe du piston tandis que l'autre se rattache au tourillon sur le vilebrequin au moyen du chapeau de bielle.

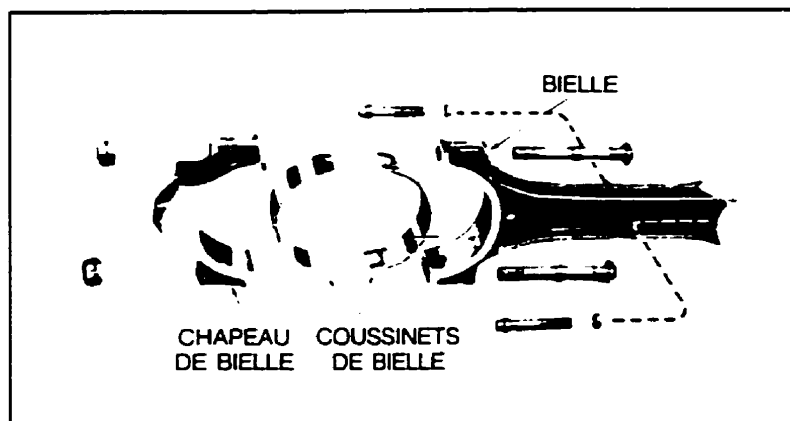


Figure 2.7 : Bielle

2.1.5.2 Chemise de cylindre

Les chemises sont glissées dans les alésages des cylindres. Dans le cas des chemises humides, la moitié supérieure est refroidie par l'eau qui l'entoure. Un peu plus bas, il y a les lumières d'admission qui laissent entrer l'air de combustion. La partie inférieure est gardée à température adéquate par l'eau située à l'intérieur de la chambre à eau du bloc-cylindres.

2.1.6 Arbres à cames et paliers

Les arbres à cames sont disposés dans leurs alésages au-dessus de chaque rangée de cylindre dans le bloc-cylindres. Ils servent à coordonner l'action des injecteurs et des soupapes d'échappement par le biais des tiges-poussoirs tel que vu précédemment.

2.1.7 Couvercle de culbuteurs

Le couvercle de culbuteurs est installé sur la culasse et sert à isoler les culbuteurs, les injecteurs et les soupapes dans un compartiment étanche. L'étanchéité est assurée par un joint

situé dans la rainure du rebord inférieur du couvercle. On retrouve aussi sur le couvercle des orifices permettant le remplissage d'huile de même que le reniflard ainsi que leur joint d'étanchéité respectif.

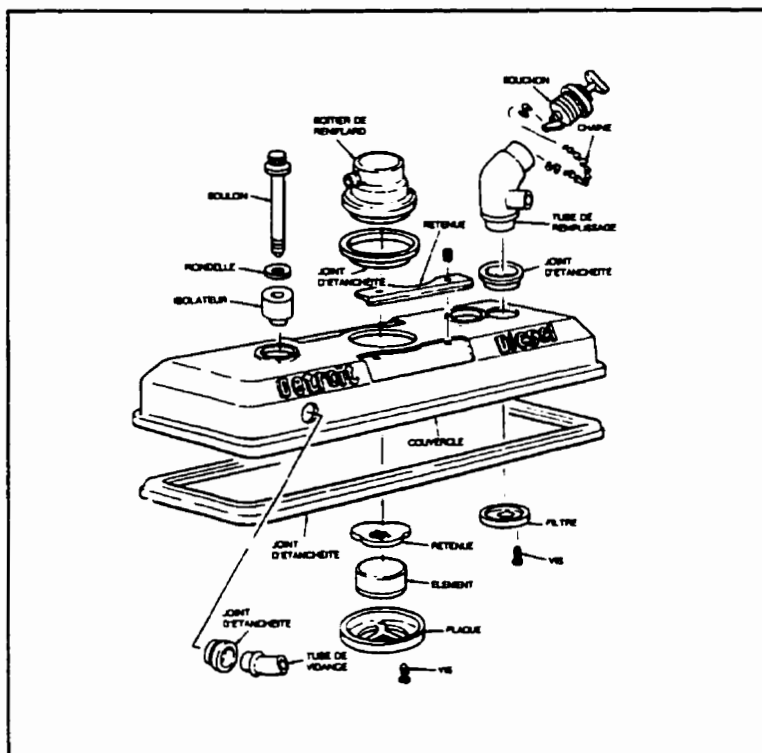


Figure 2.8 : Couvercle de culbuteur

2.1.8 Échappement

Le système d'échappement dessert chaque cylindre et achemine les gaz brûlés vers l'atmosphère. Les collecteurs d'échappement sont disposés sur chacune des rangées de cylindres. Il s'agit d'une pièce circulaire en fonte qui est refroidie par l'air.

2.1.9 Volant moteur

Le volant moteur consiste en une grosse roue munie d'une couronne dentelée qui s'engage avec le pignon du démarreur. Le volant est fixé à l'extrémité arrière du vilebrequin à l'aide de six boulons. Un accouplement flexible est utilisé sur l'arbre de transmission afin d'amortir les fluctuations de couple entre le moteur et la transmission. Un carter monobloc en fonte servant de couvercle au train d'engrenage et au volant est fixé contre la paroi arrière du moteur. Ce carter sert aussi de support au démarreur et à la boîte de vitesse.

2.1.10 Équilibrage du moteur et masses d'équilibre

Dans les moteurs à deux temps (et aussi à quatre temps), il faut un système d'équilibrage pour contrer les forces et les couples générés par des perturbations dues au mouvement asynchronisé des pistons. Le couple résultant de ce mouvement tend à déplacer le moteur selon une trajectoire elliptique. Il faut donc le contrer par le biais de masses d'équilibrage installées aux extrémités extérieures des arbres à cames et sur le pignon d'entraînement de la pompe à eau. Le dispositif d'équilibrage crée un couple qui est égal et opposé au couple engendré par le mouvement des pistons.

Les masses d'équilibrages sont recouvertes par un couvercle qui renferme aussi le pignon d'entraînement de la pompe à eau situé à l'avant de l'arbre à cames de droite. Par ailleurs, le couvercle sert de support à la pompe à eau.

2.1.11 Engrenages de distribution

Les engrenages de distribution consistent en une série de pignons hélicoïdaux situés dans un espace réservé entre la paroi arrière du bloc-cylindres et le carter du volant moteur. Il comprend le pignon du vilebrequin, les deux pignons d'arbres à cames, un pignon de renvoi et, dans le cas des moteurs non turbocompressés, un pignon superposé et le pignon

d'entraînement de la soufflante. Le vilebrequin entraîne les pignons d'arbres à cames via le pignon de renvoi. Le pignon de renvoi repose sur un moyeu qui est fixé directement sur le bloc-cylindres.

Comme il s'agit d'un moteur deux temps, les trois engrenages (vilebrequin et arbres à cames) doivent tourner au même régime pour assurer le bon fonctionnement du moteur. De son côté, le pignon de soufflante tourne deux fois plus vite et a donc la moitié des dents du pignon d'entraînement (pignon superposé).

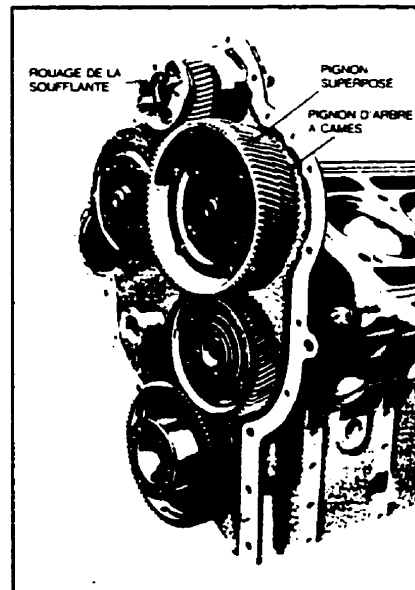


Figure 2.9 : Engrenages de distribution

2.1.12 Équipements accessoires

Les accessoires comme le compresseur d'air sont entraînés par des poulies fixées à l'avant du moteur au niveau de l'arbre à cames de droite. L'alternateur est entraîné par une poulie fixée au pignon d'entraînement de la pompe à eau.

2.1.13 Circuit d'alimentation en air

La combustion nécessite l'apport d'une certaine quantité d'air frais qui, une fois comprimée et mélangée avec le carburant, permet la combustion (référence [10]). Cet air est acheminé dans les cylindres par une soufflante via les lumières d'admission situées dans les chemises. L'entrée de ce volume d'air frais projeté par les lobes des rotors de la soufflante provoque la sortie des gaz brûlés et refroidit les soupapes d'échappement ainsi que d'autres pièces internes. L'angle des orifices d'admission provoque un mouvement tourbillonnant de l'air alors qu'il pénètre dans les cylindres, ce qui facilite la sortie des gaz brûlés et favorise la combustion. Un filtre à air de type sec est utilisé à l'entrée de la soufflante afin d'assurer l'élimination des particules susceptibles de nuire à la combustion et endommager les pièces internes du moteur.

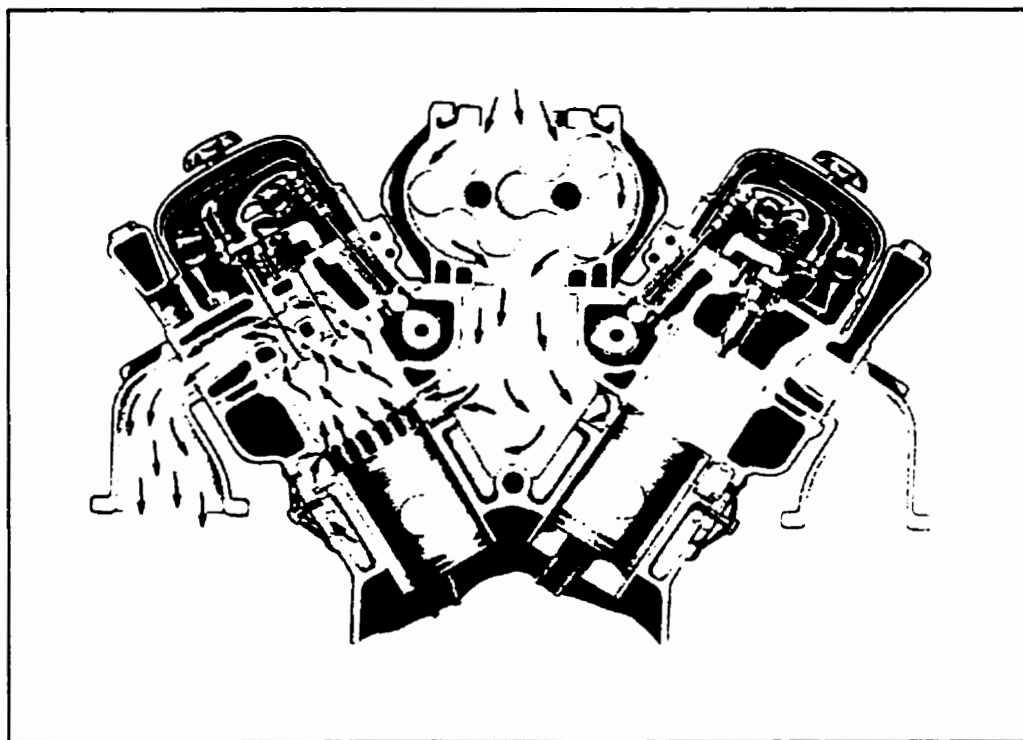


Figure 2.10 : Circuit d'admission d'air

2.1.13.1 Soufflante

Les moteurs diesel étudiés nécessitent un grand volume d'air pour alimenter et nettoyer adéquatement les cylindres. Cet air est fourni par une soufflante standard. Un autre type de soufflante est utilisée dans les moteurs qui ont un turbocompresseur. Cette dernière est dotée d'orifices extérieurs supplémentaires qui permettent le montage de l'adapteur du turbocompresseur. Les deux types de soufflante comptent sur deux rotors à trois lobes qui représentent une forme hélicoïdale, ce qui permet le déplacement de l'air de façon uniforme et continue.

2.1.13.2 Turbocompresseur (6V92)

Un turbocompresseur est utilisé pour les moteurs 6V92. L'apport de cette composante permet d'améliorer le rendement total du moteur. Le turbocompresseur utilise l'énergie résiduelle des gaz d'échappement pour augmenter la pression de l'air fourni aux cylindres. Les gaz d'échappement entraînent la turbine alors que le compresseur fournit un volume d'air comprimé à la soufflante et aux cylindres. Durant le fonctionnement, il répond aux exigences du moteur en fournissant l'apport nécessaire, selon que le débit des gaz d'échappement soit plus ou moins élevé.

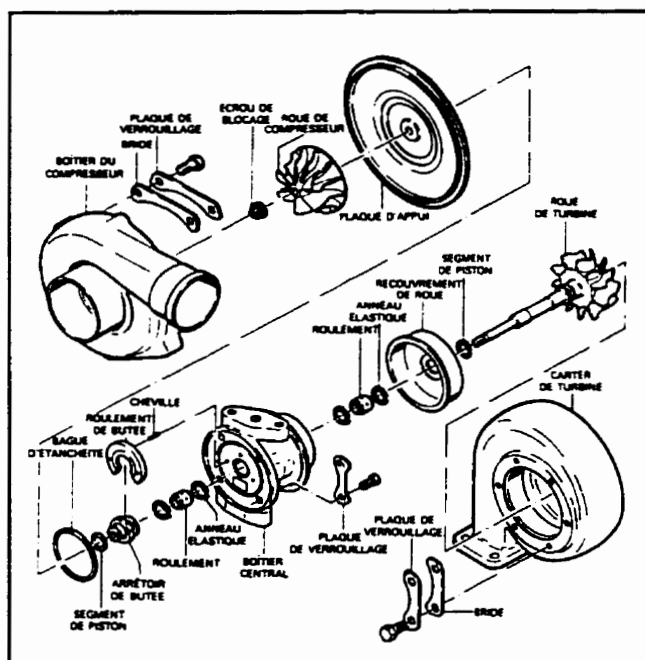


Figure 2.11 : Turbocompresseur

2.1.13.3 Post-refroidisseur du turbo

Un post-refroidisseur d'air est utilisé pour réduire la température de l'air acheminé vers les cylindres. Ce dernier est monté entre la soufflante et les rangées de cylindres. Il s'agit d'un échangeur de chaleur qui utilise le liquide du circuit de refroidissement.

2.2 Accessoires

On entend ici par accessoires les systèmes et composantes qui sont directement ou indirectement nécessaires au fonctionnement du moteur. Le mauvais fonctionnement de ces systèmes entraîne la plupart du temps une panne du moteur. On peut donc dire du point de vue de la fiabilité que ces systèmes sont en 'série'. La figure 2.12 représente cet aspect du moteur et de ses systèmes sous-jacents. Chacun d'eux utilise une portion de l'énergie générée par le moteur pour accomplir sa tâche nécessaire au fonctionnement adéquat du groupe motopropulseur. Dans la figure, on observe que chacun de ces systèmes se décompose en plusieurs pièces. Les prochaines pages permettront de familiariser le lecteur avec ces systèmes et de mieux visualiser le rôle de chacun.

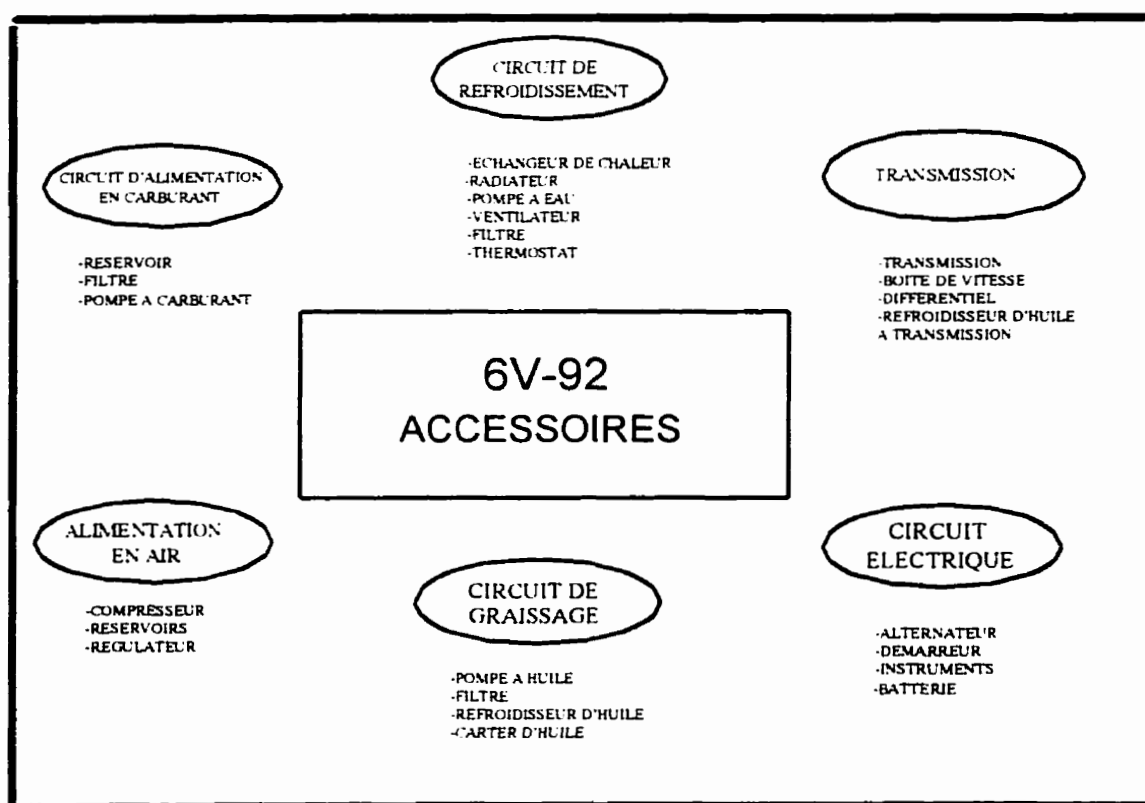


Figure 2.12 : Accessoires du moteur

2.2.1 Système d'alimentation

Le système d'alimentation est principalement un réseau de canalisation qui permet d'acheminer le carburant du réservoir jusqu'aux cylindres. Cela est accompli avec une pompe qui aspire le carburant dans le réservoir et l'envoie à travers une série de filtres jusqu'aux collecteurs situés dans les culasses et, finalement, aux injecteurs. Une canalisation de renvoi permet de retourner le carburant en excès des injecteurs vers le réservoir. Des étranglers permettent le maintien de la pression générée par la pompe.

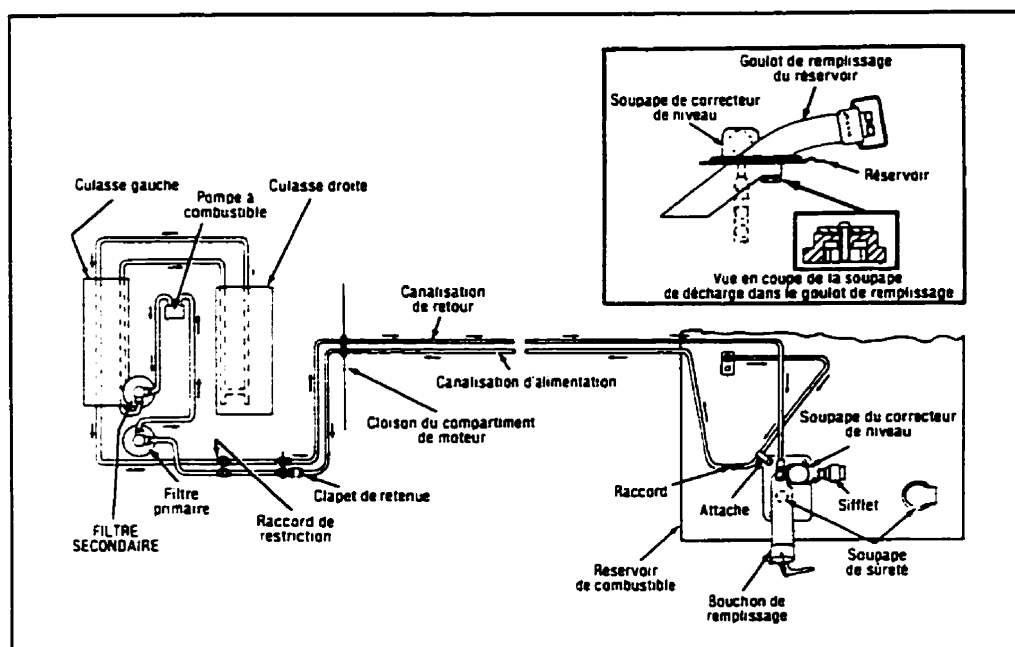


Figure 2.13 : Circuit d'alimentation

2.2.1.1 Injecteurs

Les injecteurs sont essentiels au bon déroulement de la combustion. Ils remplissent quatre fonctions différentes toutes autant nécessaires au fonctionnement du moteur. Premièrement, ils dosent la quantité appropriée de carburant nécessaire pour le régime et la charge actuelle du moteur. Ensuite, ils génèrent la pression exigée pour obtenir une injection convenable et

ils règlent avec précision le moment propice de l'injection. Finalement, ils pulvérisent le carburant diesel dans la chambre du cylindre

2.2.1.2 Pompe à combustible

La pompe à carburant aspire le carburant situé dans le réservoir et l'achemine vers les injecteurs. Elle est fixée au carter du régulateur de vitesse et est entraînée par l'extrémité du rotor de la soufflante. Le cycle continu de la pompe envoie le carburant sous pression dans les canalisations. Des filtres sont utilisés en aval et en amont de la pompe pour réduire les particules qui pourraient entraîner l'usure rapide de la pompe et des injecteurs.

2.2.1.3 Régulateurs

Les régulateurs sont utilisés pour contrôler la quantité de carburant requise pour maintenir un régime constant pendant les fluctuations de charge. Cela est accompli par un système mécanique dans le 6V71 alors qu'il s'agit d'un système électronique pour le 6V92.

2.2.1.4 Régulateur de limitation de vitesse de type mécanique (6V71)

Ce type de régulateur est utilisé sur les véhicules long parcours qui nécessitent un régime ralenti accéléré pendant le fonctionnement des équipements accessoires. Le fonctionnement de cette composante est accompli par l'entremise de solénoïdes et de cylindres pneumatiques. Un solénoïde d'arrêt est utilisé pour l'arrêt normal du moteur. Lorsqu'activé par l'opérateur, il admet l'air au cylindre d'arrêt du moteur. Lorsqu'un arrêt d'urgence est requis, le solénoïde d'arrêt d'urgence relâche un volet au niveau de la soufflante, ce qui coupe l'admission d'air et étouffe le moteur. L'opérateur peut aussi activer une commande de ralenti accéléré qui transmet un volume d'air au cylindre de ralenti accéléré. Les différents cylindres sont installés dans le régulateur où ils peuvent modifier la quantité d'air disponible pour la combustion.

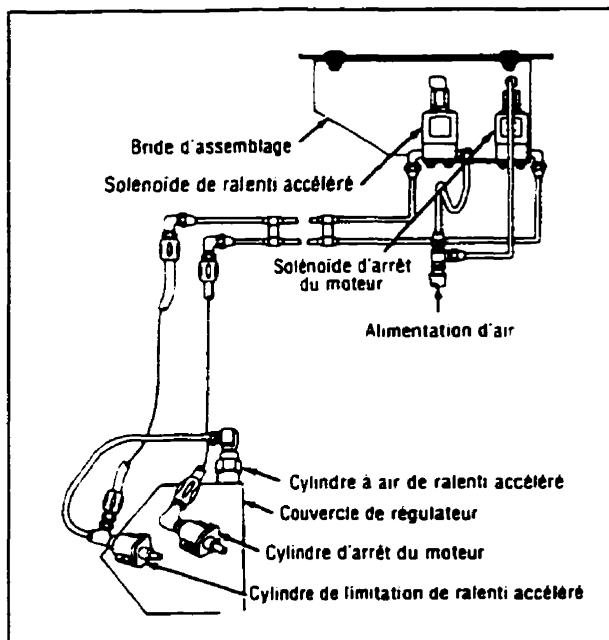


Figure 2.14 : Régulateur de vitesse

2.2.1.5 Dispositif de contrôle électronique du moteur (6V92)

Dans les moteurs 6V92, les différents régimes sont contrôlés par une composante électronique. Le Détroit Diesel Electronic Control (DDEC) obtient les données par l'intermédiaire des capteurs et ajuste ensuite les commandes en conséquence.

2.2.2 Circuit de graissage

Le circuit de graissage du moteur consiste en divers éléments tels la pompe, les filtres ainsi que le refroidisseur et les soupapes de régulation de pression et de sûreté. L'huile est acheminée dans les canalisations prévues à cet effet dans le bloc-cylindres. Elle est d'abord aspirée du carter à travers le tamis et le tuyau d'admission jusque dans la pompe où elle est mise sous pression. Elle passe ensuite dans le filtre pour atteindre le refroidisseur. Elle

revient finalement dans le bloc-cylindres par les galeries d'huile pour aller lubrifier les composantes internes.

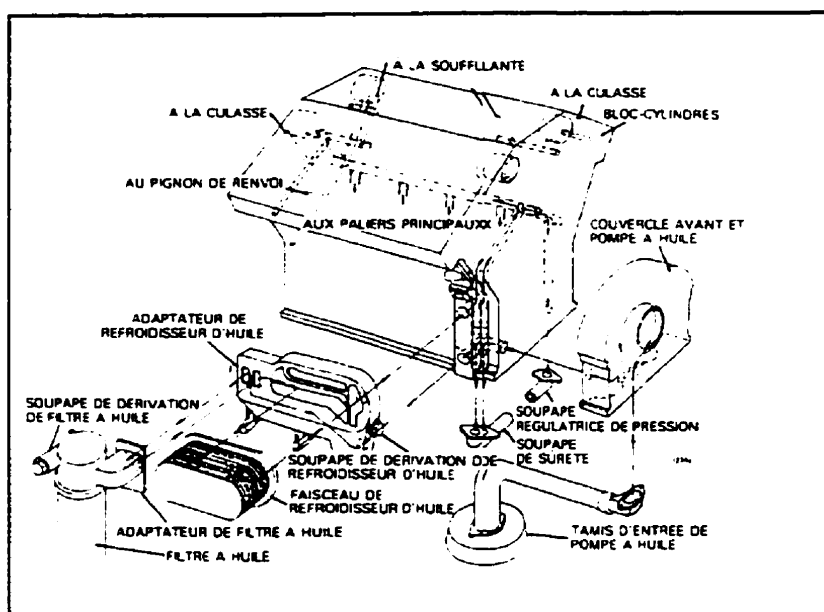


Figure 2.15 : Circuit de graissage

2.2.2.1 Pompe à huile

La pompe de graissage est montée sur le couvercle avant du vilebrequin, lequel lui sert également de corps. Il s'agit d'une pompe à engrenage qui tourne dans une cavité à l'intérieur du couvercle. La rotation des engrenages crée un vide à l'admission de la pompe, ce qui a pour effet d'aspirer l'huile dans le carter. Cette dernière est alors mise sous pression et expulsée vers le filtre et le refroidisseur via une courte galerie pratiquée dans le bloc-cylindres.

2.2.2.2 Soupapes régulatrices de pression

Des soupapes régulatrices de pression sont installées à l'extrémité de la galerie d'huile près de l'avant du bloc pour maintenir la pression de l'huile indépendamment de sa température et du régime du moteur. Une autre soupape de décharge de pression est utilisée pour éviter que la pression ne dépasse une certaine limite. Elle dirige l'excédent de pression vers le carter d'huile.

2.2.2.3 Refroidisseur d'huile de graissage

Un refroidisseur est utilisé pour maintenir l'huile à une température convenable au bon fonctionnement du moteur. Il sert donc à dissiper la chaleur absorbée par l'huile pendant la marche du moteur. En effet, si la température de l'huile est trop élevée, cela peut entraîner une diminution de la viscosité et causer un défaut de lubrification. Le refroidisseur est monté sur le côté droit dans le coin inférieur avant du bloc-cylindres.

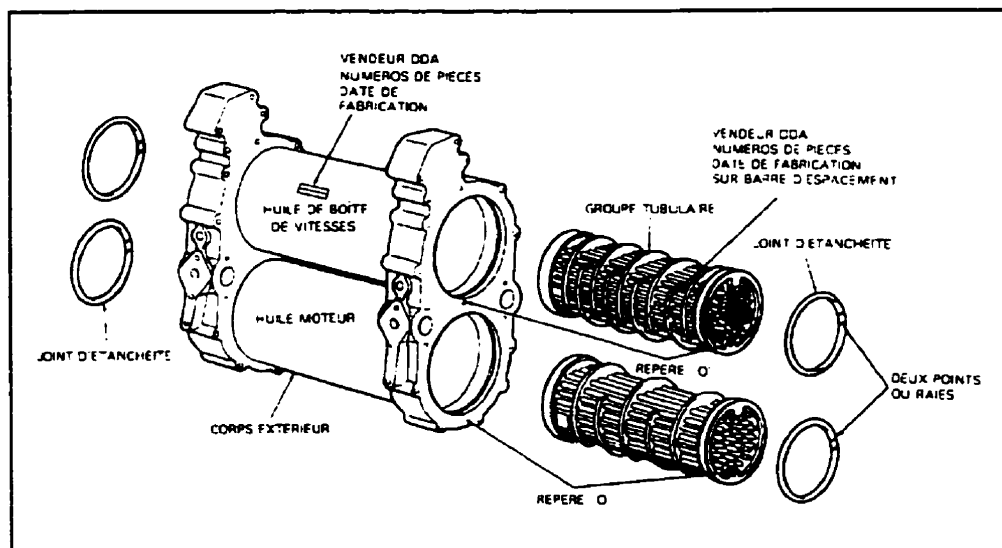


Figure 2.16 : Refroidisseur d'huile

2.2.3 Circuit de refroidissement

Afin de dissiper la chaleur générée par le moteur, il est nécessaire d'employer un circuit de refroidissement dont les composantes principales sont le ventilateur et le radiateur. Une pompe à eau est utilisée pour permettre la circulation du liquide dans le circuit et des thermostats servent à délimiter les températures d'opération du système. Typiquement, la pompe aspire le liquide refroidisseur de la partie inférieure du radiateur (région froide) et l'achemine vers le refroidisseur d'huile et ensuite dans le bloc-cylindres, les culasses, le post-refroidisseur de turbocompresseur (6V92) et le refroidisseur d'huile à transmission. Éventuellement, le liquide refroidisseur traverse les thermostats et revient dans la partie supérieure du radiateur (région chaude) où il est refroidi par le ventilateur. Les thermostats règlent le débit du liquide refroidisseur vers le radiateur et le fonctionnement du ventilateur selon la température de ce dernier.

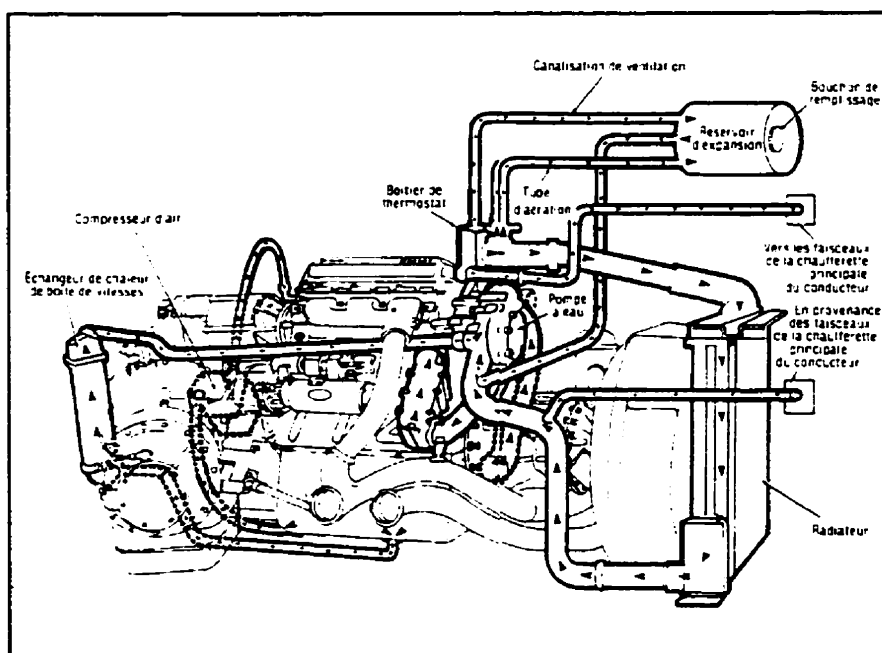


Figure 2.17 : Circuit de refroidissement

2.2.3.1 Pompe à eau

La pompe à eau est montée sur le couvercle de distribution et est entraînée par le pignon d'arbre à cames avant. Elle est de type centrifuge et sert à faire circuler le liquide du radiateur jusqu'au bloc-cylindres.

2.2.3.2 Boyaux d'eau du moteur

Des boyaux de circulation en Téflon sont utilisés en raison de leur résistance aux hautes températures. Ils sont recouverts par une couche protectrice en acier inoxydable.

2.2.3.3 Thermostats

La température de refroidissement est réglée automatiquement par le biais des thermostats. Ils sont situés dans des boîtiers fixés sur la sortie d'eau de chacune des culasses. Lorsque la température est trop basse, les clapets du thermostat restent fermés et empêchent l'écoulement du liquide vers le radiateur. Le liquide est refoulé vers l'admission de la pompe via le circuit de dérivation et cela a pour effet de favoriser le réchauffement du moteur. Lorsque la température atteint la valeur limite, les clapets s'ouvrent graduellement et permettent le passage vers le radiateur alors qu'ils bloquent le passage vers le circuit de dérivation.

2.2.3.4 Radiateur

Le radiateur est placé devant le moteur de sorte que le ventilateur aspire l'air à travers lui, ce qui a pour effet d'abaisser la température du liquide qu'il contient. Un auvent métallique est placé autour du ventilateur afin d'augmenter la capacité de refroidissement du radiateur. Un bouchon comportant une soupape de pression est utilisé sur le radiateur afin de créer une pression positive, ce qui a pour effet d'augmenter la température du point d'ébullition du

liquide. Cela permet des températures d'opération plus élevées sans qu'il y ait de pertes de liquide par évaporation.

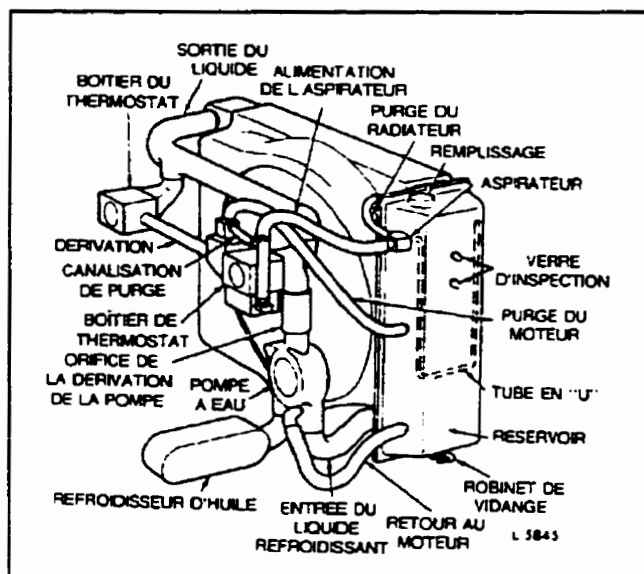


Figure 2.18 : Radiateur

2.2.3.5 Ventilateur

Le ventilateur et sa commande sont reliés au vilebrequin par l'intermédiaire d'un accouplement. La commande hydraulique est activée lorsque la température atteint une valeur prédéterminée. Le système est déclenché par les thermostats aux moments appropriés afin de réduire la température du liquide de refroidissement. Alternativement, le ventilateur est désactivé lorsque la température atteint une valeur basse prédéterminée.

2.2.4 Équipements électriques

Le circuit électrique du moteur comprend le démarreur, l'alternateur ainsi que la batterie. L'énergie électrique requise pour le démarrage initial est fournie au démarreur par la batterie. En cours de marche, l'alternateur transforme une portion de l'énergie rotative du moteur et la transforme en énergie électrique pour alimenter tous les accessoires électriques.

2.2.4.1 Alternateur

L'alternateur fait partie du circuit de charge de la batterie, c'est-à-dire qu'il produit le courant nécessaire pour maintenir l'état de charge de la batterie et pour alimenter tous les accessoires électriques. Sa poulie d'entraînement est accouplée au pignon d'entraînement de la soufflante situé à l'arrière du moteur.

2.2.4.2 Batterie

La batterie est un dispositif électrochimique qui permet de transformer l'énergie chimique en énergie électrique. Sa fonction principale consiste à fournir le courant nécessaire au démarrage du moteur. Dans le circuit, elle agit comme stabilisateur de tension. Elle peut parfois fournir du courant au circuit lorsque la demande électrique des accessoires dépasse la quantité fournie par l'alternateur.

2.2.4.3 Démarreur

Le démarreur imprime une rotation initiale au moteur pour le mettre en marche. Il est monté sur le carter du volant moteur et est muni d'un petit pignon d'attaque qui s'engage sur la couronne du volant. Au démarrage, ce petit pignon entraîne le volant et par conséquent le vilebrequin, ce qui contribue à la mise en marche du moteur.

2.2.5 Transmission automatique

La transmission automatique a trois rapports avant ainsi qu'un rapport arrière. Elle est munie d'un convertisseur de couple qui sert à la fois d'accouplement hydraulique et de multiplicateur de couple. La transmission est montée à l'arrière du moteur sur le carter du volant. L'autre extrémité consiste en l'arbre de transmission qui transmet le couple au différentiel.

2.2.5.1 Refroidisseur d'huile à transmission

Un refroidisseur d'huile est utilisé pour refroidir l'huile de transmission à l'aide du liquide refroidisseur provenant du circuit de refroidissement. L'huile du convertisseur de couple est refroidie progressivement alors qu'elle circule autour de tubes remplis de liquide froid avant de revenir dans la transmission. Le liquide de refroidissement retourne ensuite vers le bloc-cylindres du moteur.

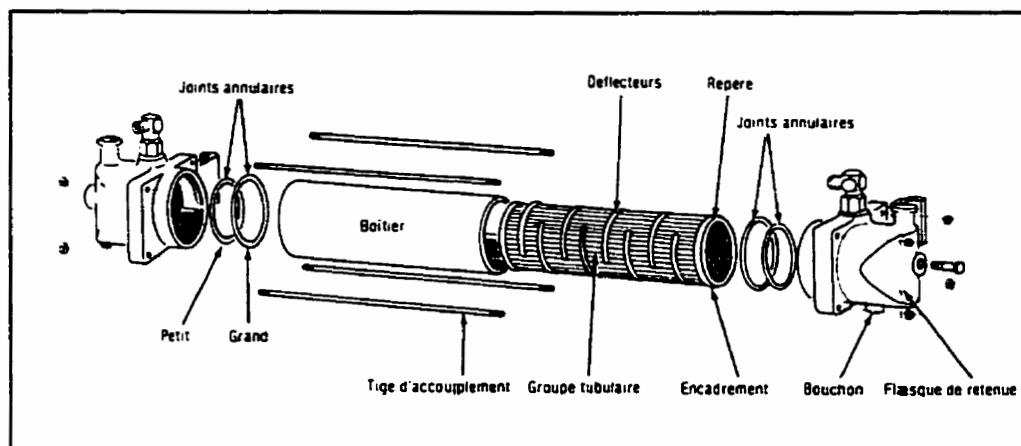


Figure 2.19 : Refroidisseur d'huile à transmission

2.2.6 Compresseur d'air

Le compresseur d'air à deux cylindres est monté à l'arrière du moteur. Il est directement entraîné par l'arbre à cames et lubrifié par le circuit de graissage. Le refroidissement est aussi fourni par le circuit de refroidissement du moteur. L'orifice d'admission du compresseur est relié à un collecteur situé sur le moteur et son air est nettoyé par les filtres du moteur.

2.2.7 Pompe de servodirection

La pompe de servodirection de type hydraulique fournit la puissance requise pour le mécanisme de direction du train avant. Elle est montée à l'arrière du moteur et est entraînée par l'arbre d'entraînement de la soufflante, par l'intermédiaire d'un engrenage.

Chapitre 3 - Théories relatives à l'analyse de fiabilité

Dans ce chapitre, il sera question des différents concepts qui sont à la base des analyses de fiabilité effectuées dans le cadre du projet [9]. Premièrement, nous décrivons les tests de valeurs extrêmes qui sont utilisés afin de détecter les valeurs qui n'appartiennent pas statistiquement à un échantillon donné. Ensuite, on définira quelques notions de statistique et de fiabilité comme la densité de probabilité, la fonction de répartition et la fonction de hasard. Par la suite, les diverses distributions statistiques servant à modéliser les échantillons seront présentées. Une revue des méthodes d'estimation sera effectuée et on conclura avec une discussion des tests d'hypothèse.

3.1 Tests de valeurs extrêmes

L'interprétation des données et l'application de modèles statistiques qui représentent le plus adéquatement possible la situation de vie des composantes étudiées constituent la base de ce chapitre. À cette fin, les échantillons obtenus à partir de la banque de données ont été vérifiés et soumis à des tests statistiques visant à détecter les valeurs extrêmes [2]. Par valeurs extrêmes, on entend les valeurs enregistrées qui semblent vraiment différentes, inconsistantes avec le reste de l'échantillon. À prime abord, la première solution envisagée est la suppression de ces données erronées. Il faut cependant considérer la mince probabilité que ces valeurs soient exactes car cela peut affecter les modèles générés par la suite. Il est donc préférable de bien connaître leurs significations et de justifier leur suppression par une explication tangible.

Par exemple, on sait qu'un alternateur ne peut avoir une vie active supérieure à 1 000 000 de kilomètres. On peut donc justifier le retrait de cette donnée car il existe alors une explication rationnelle pour le faire. De plus, on peut attribuer cette aberrance à une erreur humaine, notamment l'omission par un ouvrier de déclarer le remplacement de la dite composante. L'erreur humaine est d'ailleurs un des facteurs déviants les plus fréquemment rencontrés dans

ce type d'expérimentation. Il faut donc bien connaître l'environnement dans lequel sont recueillies les données pour mieux connaître les limitations et les causes d'erreur possibles. La suppression de valeur doit être effectuée avec minutie car, dans certains cas, lorsque l'échantillon est petit, elle peut avoir une influence importante sur les valeurs du modèle généré.

3.1.1 Test B4 et test de Gruber

L'application des tests de valeurs extrêmes [2] se fait aisément à l'aide d'un chiffrier. Les méthodes se résument à estimer la différence des valeurs relativement à la moyenne et à l'écart-type pour ensuite la comparer avec des critères qui dépendent du nombre d'éléments que contient l'échantillon et du niveau de confiance désiré. Le test B4 consiste donc en l'application de l'équation suivante sur les données de l'échantillon :

$$[x(i) - \mu] / \sigma \quad (3.1)$$

Le test de Gruber est un peu différent puisqu'il utilise une formule logarithmique pour déterminer les valeurs qui seront comparées aux critères générés. Voici la formule utilisée pour ce test :

$$[\ln x(i) - \ln \mu] / \ln \sigma \quad (3.2)$$

Dans les deux cas :

$x(i)$: donnée i de l'échantillon

μ : moyenne de l'échantillon

σ : écart-type de l'échantillon

Les deux tests ont été rigoureusement utilisés sur tous les échantillons pour déterminer les valeurs susceptibles d'être mises de côté. Quand on parle de valeurs extrêmes, cela peut aussi bien vouloir dire excessivement élevée qu'excessivement basse. C'est pourquoi dans certaines expérimentations, il faut aussi se méfier des valeurs basses car elles peuvent aussi modifier les valeurs des modèles. Dans l'étude réalisée ici, les valeurs basses doivent être conservées car elles définissent la période de jeunesse durant laquelle la composante est sujette à une défaillance précoce et est donc une valeur utile à l'analyse.

3.2 Modèles de fiabilité

Par le calcul de la fiabilité, on désire prédire la durée de vie des composantes pour mieux gérer les stocks et la maintenance. La fiabilité représente donc la probabilité que la composante ait une durée de vie donnée [5][12]. En observant les moments de défaillance des composantes d'une population, on peut déterminer la probabilité d'une durée de vie donnée. On peut aussi tenter de caractériser le comportement de la population à l'aide d'une fonction mathématique. De cette façon, on peut analyser le comportement de la population et développer un programme de maintenance adéquat.

Plusieurs distributions peuvent être utilisées pour caractériser le comportement des populations. Selon le cas, on peut appliquer la distribution qui représente le plus précisément le comportement des composantes. Les distributions continues sont adéquates lorsque l'on désire étudier la durée de vie de pièces mécaniques. Parmi celles-ci on compte, entre autre, les distributions exponentielles, normales, lognormales, de Weibull et de Hastings.

3.2.1 Densité de probabilité

Lorsqu'on travaille avec des variables aléatoires continues, il faut tenir compte du concept de la densité de probabilité [12]. Il s'agit de la possibilité d'attribuer une valeur numérique

finie à la probabilité sur un intervalle donné. Elle peut donc être calculée en trouvant la limite infinitésimale de probabilité sur l'intervalle à l'aide de l'équation suivante:

$$f(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + dt)}{dt} \quad (3.3)$$

$f(t)$: densité de probabilité

t : temps

T : variable aléatoire continue

dt : intervalle infinitésimal

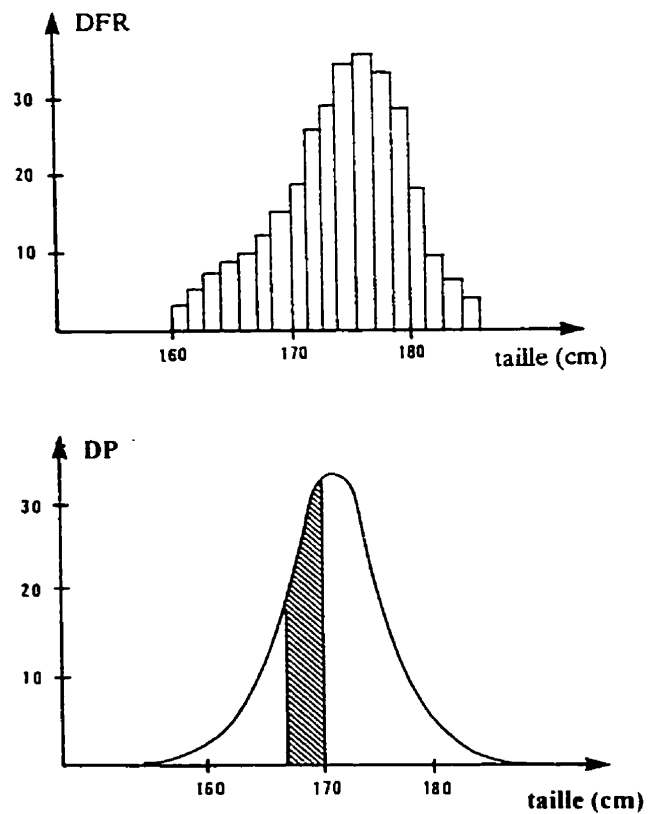


Figure 3.1 - Histogramme de la densité de fréquence relative de l'échantillon, et densité de probabilité.

On peut donc définir la densité de probabilité comme étant la fréquence relative d'un intervalle dans la population. Chacune des fréquences doit être supérieure à zéro et la somme des valeurs additionnées doit être égale à l'unité. On peut illustrer le concept à l'aide d'un histogramme (figure 3.1) dont chacune des barres équivaut à une valeur de densité et dont la largeur représente l'intervalle.

3.2.2 Fonction de répartition

La fonction de répartition [12] d'une distribution continue est calculée à partir de la densité de probabilité. Elle est la somme des intervalles compris entre zéro et t . Elle représente donc la probabilité de défaillance au temps t et est exprimée par l'équation suivante:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (3.4)$$

$F(t)$: fonction de répartition

En manipulant cette formule, on obtient la probabilité de non-défaillance, que l'on définira plus tard comme étant la fiabilité, ainsi que la probabilité de défaillance entre deux valeurs t distinctes.

$$P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (3.5)$$

$$P(t_1 < T < t_2) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (3.6)$$

On peut donc évaluer la probabilité de défaillance à chaque instant après le temps zéro. Alternativement, il est possible de déterminer la densité de probabilité en dérivant la fonction de répartition par rapport au temps en utilisant l'équation suivante:

$$f(t) = d F(t) / dt \quad (3.7)$$

3.2.3 Fonction de fiabilité

Ainsi donc, la fiabilité consiste en la probabilité de bon fonctionnement et est déterminée à l'aide de l'équation suivante [12]:

$$R(t) = P (T > t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (3.8)$$

$R(t)$ = fonction de fiabilité

3.2.4 Taux de défaillance

Le taux de défaillance est défini par une fonction qui est le rapport entre la densité de probabilité de défaillance et la fonction de fiabilité. Le taux de défaillance instantané peut alors être déterminé à chaque instant t à l'aide de cette relation [12]:

$$\lambda(f) = f(t) / R(t) \quad (3.9)$$

Il est souvent intéressant de considérer la fonction du taux de défaillance car elle permet d'identifier certains comportements typiques rencontrés lors des cycles de vie des composantes. Les trois tendances de base sont clairement illustrées par la courbe en baignoire illustrée à la figure 3.2. Ainsi, lorsqu'on observe un taux de défaillance décroissant (première partie de la courbe), cela indique une période de défaillance précoce. D'autre part,

le taux de défaillance peut demeurer constant sur une longue période (partie centrale de la courbe), ce qui équivaut à des défaillances survenant indépendamment du temps c'est-à-dire parfaitement aléatoires. Finalement, on observe un taux de défaillance croissant (troisième partie de la courbe) qui indique une propension des défaillances causées par l'usure et au temps. Cette courbe en baignoire caractérise un grand nombre de populations notamment dans le domaine mécanique.

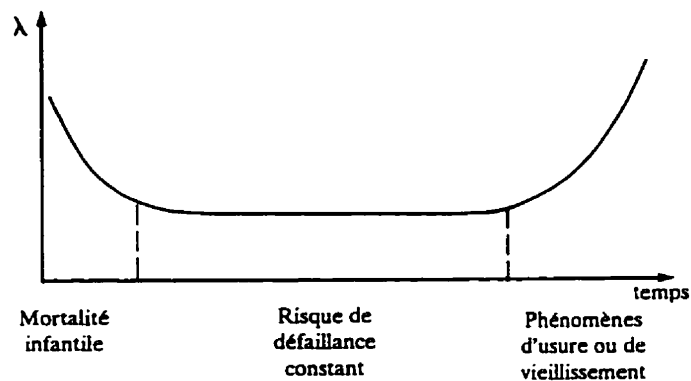


Figure 3.2 - Courbe en baignoire représentative des différentes phases de la vie d'un matériel.

3.2.5 Durée moyenne de bon fonctionnement

La durée moyenne de bon fonctionnement est un paramètre très utile pour la planification et l'entretien des équipements. En effet, elle permet de prévoir à quel moment la majorité des défaillances surviennent, ce qui permet de bien gérer les stocks et de prévoir les activités de remplacement. Elle est communément désignée par le terme MTTF qui vient de l'abréviation de Mean Time To Failure. On peut évaluer la MTTF à l'aide de la relation suivante:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.10)$$

On remarque donc que la MTTF est l'aire sous la courbe de la fiabilité de la composante en fonction du temps.

3.3 Lois de probabilité utilisées en fiabilité

La prochaine section explique les différentes distributions statistiques utilisées pour modéliser des échantillons de données. On décrira donc les distributions exponentielles, normales, lognormales et de Weibull.

3.3.1 Distribution exponentielle

La distribution exponentielle [12] a été très utilisée pour modéliser la vie de plusieurs produits autant électroniques que mécaniques. Elle est très efficace dans les cas où le taux de défaillance est constant sur toute la période active. Cela peut aussi s'appliquer à des produits qui ont une période de rodage, suivie d'une période où l'usure devient prédominante. La possibilité de réaliser des calculs aisément demeure sûrement l'un des avantages de cette distribution.

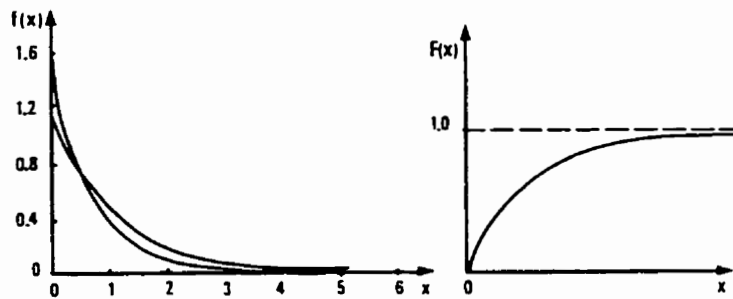


Figure 3.3 - Densité de probabilité et fonction de répartition de la loi exponentielle.

Pour une distribution exponentielle, la densité de probabilité est donnée par:

$$f(t) = \lambda \exp (- \lambda t) \quad (3.11)$$

On peut ensuite déterminer la fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - \exp (- \lambda t) \quad (3.12)$$

la fonction de fiabilité :

$$R(t) = \exp (- \lambda t) \quad (3.13)$$

et la durée moyenne de bon fonctionnement

$$MTTF = 1 / \lambda \quad (3.14)$$

On remarque que toutes ces équations peuvent être manipulées facilement parce qu'elles n'ont qu'un seul paramètre, ce qui contribue à la popularité de cette distribution par rapport à d'autres distributions statistiques plus complexes.

3.3.2 Distributions normales et lognormales

Les distributions normales et lognormales [12] sont très utilisées car elles catégorisent un grand nombre de données expérimentales. Elles peuvent décrire les dimensions de pièces conçues automatiquement ainsi que plusieurs phénomènes physiques et biologiques. Elles s'appliquent lorsque les données étudiées se répartissent autour d'une moyenne fixe. Ceci est un avantage pour certains types de données expérimentales mais pour la plupart des données

de durée de vie cela comporte une restriction majeure. C'est pourquoi on utilise davantage des lois plus élaborées, comme la distribution de Weibull, pour caractériser la vie des composantes mécaniques.

Les lois normales et lognormales comptent sur deux paramètres. La loi lognormale est utilisée lorsque l'on désire davantage de souplesse au niveau de la forme mais que l'on a tout de même une moyenne fixe. Les deux paramètres sont la moyenne m et l'écart type σ .

Loi normale : $N(m, \sigma)$

Pour la loi lognormale, il faut effectuer une petite transformation :

$$y = \ln t \quad (3.15)$$

$$m_y = \ln m - \sigma_y^2/2 \quad (3.16)$$

$$\sigma_y^2 = \ln [(\sigma/m)^2 + 1] \quad (3.17)$$

Loi lognormale : $N_{ln}(m_y, \sigma_y)$

On obtient donc les fonctions de densité de probabilité suivantes :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(t-m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3.18)$$

$$f_{ln}(y) = \frac{1}{y \sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{[y-m_y]^2}{2\sigma_y^2} \right] \quad (3.19)$$

La loi centrée réduite est utilisée la plupart du temps pour réduire la complexité des calculs en appliquant la substitution suivante :

$$u = \left[\frac{(t-m)}{\sigma} \right] \quad (3.20)$$

$$\phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{u^2}{2}\right)} \quad (3.21)$$

$$f(t) = \left(\frac{1}{\sigma} \right) \phi \left[\frac{(t-m)}{\sigma} \right] \quad (3.22)$$

La loi centrée réduite a pour effet de ramener la fonction à une moyenne nulle, ce qui simplifie les calculs.

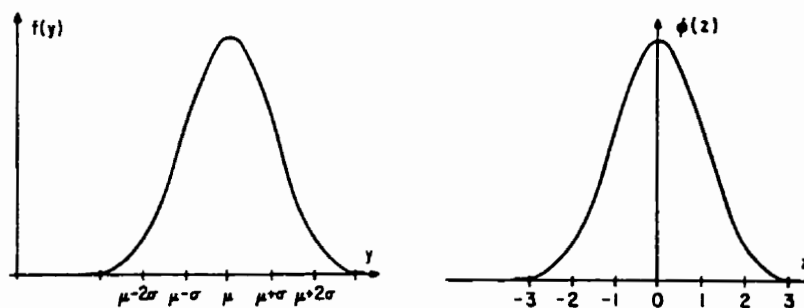


Figure 3.4 - Effet de la loi centrée réduite

La fonction de répartition est ensuite déterminée en intégrant la fonction de densité de probabilité :

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2} \right] dt \quad (3.23)$$

et avec la loi centrée on obtient la fonction de répartition :

$$F(t) = \Phi \left[\frac{(t-m)}{\sigma} \right] \quad (3.24)$$

$$\Phi(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (3.25)$$

similairement pour la loi lognormale, on a :

$$F_{\ln} = \Phi \left[\frac{(y-m_y)}{\sigma_y} \right] \quad (3.25)$$

$\Phi(u)$ est une fonction de répartition standard. On peut donc aisément déterminer les valeurs correspondantes de n'importe quelle valeur de t avec cette table. Les fonctions de fiabilité sont déduites de la fonction de répartition :

$$R(t) = 1 - \Phi \left[\frac{(t-m)}{\sigma} \right] \quad (3.27)$$

$$R_{\text{ln}} = 1 - \Phi \left[\frac{(y-m_y)}{\sigma} \right] \quad (3.28)$$

Finalement, on obtient les fonctions de taux de défaillances :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \left[\frac{1}{\sigma} \right] \left[\frac{\phi[(t-m)/\sigma]}{(1-\Phi)[(t-m)/\sigma]} \right] \quad (3.29)$$

$$\lambda_{\text{ln}}(y) = \left[\frac{1}{\sigma_y} \right] \left[\frac{\phi[(y-m_y)/\sigma_y]}{(1-\Phi)[(y-m_y)/\sigma_y]} \right] \quad (3.30)$$

Le taux de défaillance de la distribution normale est essentiellement croissant, c'est pourquoi il s'applique aux problèmes de durée de vie des composantes mécaniques. On peut l'utiliser dans les cas où les composantes montrent un accroissement des défaillances dues à l'usure. De son côté, le taux de défaillance de la distribution lognormale augmente avec le temps, atteint un maximum puis redescend ensuite vers zéro progressivement avec le temps. Pour la plupart des composantes mécaniques, cela ne représente pas la réalité. On peut cependant l'utiliser pour modéliser la durée de vie de composantes sous charges variables où les défaillances sont dues à la fatigue des pièces.

3.3.3 Distribution de Weibull

Cette distribution élaborée par W. Weibull en 1951 est très populaire dans les applications de durée de vie de composantes mécaniques tels les engrenages et les roulements à billes [12]. La grande qualité de cette distribution est d'offrir une très grande flexibilité au niveau des paramètres et des formes. La distribution peut compter deux ou trois paramètres selon la forme désirée. Le troisième paramètre consiste en une période initiale durant laquelle il ne se produit aucune défaillance. Ce paramètre est parfois justifié notamment dans le cas des modèles de vie de roulements à billes développés par Weibull lui-même. La plupart du temps, cette période est inexistante pour les composantes mécaniques. On a donc une distribution qui compte deux paramètres, soit les paramètres d'échelle θ et de forme β . La souplesse de cette distribution permet de nombreuses applications pratiques.

La densité de probabilité est calculée par la relation suivante :

$$f(t) = (\beta / \theta) (t / \theta)^{\beta-1} \exp [- (t / \theta)^\beta] \quad (3.31)$$

Les paramètres de forme β et d'échelle θ sont toujours positifs. La distribution peut prendre des formes variées dépendant des valeurs respectives attribuées aux deux paramètres. Par exemple, lorsque β est égal à l'unité, on retrouve la distribution exponentielle qui est un cas particulier de la loi de Weibull. Lorsque β est égal à 2, on obtient la distribution de Rayleigh. Pour des β compris entre 3 et 4, la distribution ressemble beaucoup à la loi normale.

La fonction de répartition est obtenue en intégrant la relation de densité de probabilité (équation 3.31) :

$$F(t) = 1 - \exp [- (t / \theta)^\beta] \quad (3.32)$$

3.3.4 Distribution de Weibull déphasée (à trois paramètres)

Tel que mentionné plus haut, le troisième paramètre γ est employé lorsqu'une période sans défaillance est observée au début de la vie d'une certaine population de composantes. Ce procédé est souvent dénommé 'déphasage' du modèle. Le paramètre additionnel peut aussi bien être ajouté à une fonction exponentielle qu'à une fonction normale ou lognormale. Il suffit d'insérer le paramètre dans la fonction de manière à faire débiter la distribution après la période de non-défaillance :

$$F(t) = 1 - \exp -\{ [(t - \gamma) / \theta]^\beta \} \quad (3.33)$$

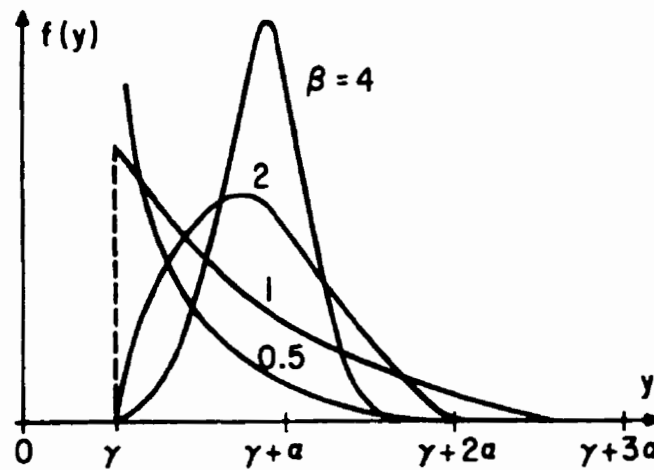


Figure 3.5 - Loi de Weibull à trois paramètres

La fonction de fiabilité est donnée par:

$$R(t) = \exp -\{ [(t - \gamma) / \theta]^\beta \} \quad (3.34)$$

le taux de défaillance est donné par:

$$\lambda(t) = (\beta / \theta) (t - \gamma / \theta)^{\beta-1} \quad (3.35)$$

et la durée moyenne de bon fonctionnement est donnée par:

$$MTTF = \gamma + (\theta - \gamma) \Gamma(1 + (1/\beta)) \quad (3.36)$$

où $\Gamma(x)$: fonction gamma

Dépendant de la valeur du paramètre β , le taux de défaillance peut représenter diverses étapes de la vie des composantes mécaniques. Par exemple, pour des β inférieurs à l'unité, on obtient un taux de défaillance qui décroît avec le temps et que l'on peut associer à une période de jeunesse. À l'opposé, pour des β supérieurs à l'unité, le taux augmente en relation avec le temps, ce qui représente une période où l'usure et l'âge influencent la propension à la défaillance.

3.3.5 Distribution de Hastings

Cette distribution a été élaborée par N.A.J. Hastings [7] afin de tenir compte des trois phases de vie souvent rencontrées dans les études des composantes mécaniques et qui sont illustrées par la courbe en baignoire mentionnée précédemment. Cela est accompli en ajoutant deux nouveaux paramètres à ceux déjà considérés dans la distribution de Weibull. Tel que constaté plus haut, la distribution de Weibull peut simuler chacune des trois phases comprises dans la courbe en baignoire mais une seule à la fois. La distribution de Hastings permet de tenir compte de deux phases à l'intérieur du même modèle en ajoutant une fonction supplémentaire correspondant à la phase de jeunesse. On obtient donc une distribution qui compte la période de jeunesse combinée à une période de défaillance aléatoire ou alors à une période de propension de défaillances associées à la vieillesse.

On utilise donc deux fonctions de taux de défaillance, une pour la fonction de jeunesse et l'autre pour le reste de vie active:

Pour $t < \gamma$, on a :

$$\lambda(t) = \delta \chi (\delta t)^{\chi-1} \quad (3.37)$$

Et pour $t > \gamma$:

$$\lambda(t) = (\beta / \theta) [(t - \gamma) / \theta]^{\beta-1} \quad (3.38)$$

Les deux nouveaux paramètres χ et δ sont des paramètres de forme et d'échelle qui servent à caractériser la période de jeunesse. Ils peuvent être nuls dans les cas où aucune période de jeunesse n'est observée dans la population.

Les fonctions de répartitions et de fiabilité sont les suivantes pour chacune des deux phases :

$0 < t < \gamma$

$$F(t) = 1 - \exp [- (\delta t)^\chi] \quad (3.39)$$

$$R(t) = \exp [- (\delta t)^\chi] \quad (3.40)$$

$t > \gamma$

$$F(t) = 1 - \exp [- (\delta t)^\chi + ((t - \gamma) / \theta)^\beta] \quad (3.41)$$

$$R(t) = \exp [- (\delta t)^\chi + \{(t - \gamma) / \theta\}^\beta] \quad (3.42)$$

3.4 Méthodes d'estimation des paramètres

Différentes méthodes sont utilisées pour évaluer les paramètres des distributions décrites précédemment à partir de données multiples. Les méthodes graphiques de base utilisent des papiers spéciaux sur lesquels il suffit de tracer une droite qui correspond adéquatement à la répartition des défaillances. La régression linéaire est habituellement employée pour tracer cette droite représentative. Des méthodes analytiques telles le “maximum de vraisemblance” utilisent des fonctions statistiques afin de déterminer les paramètres. Elles nécessitent l'utilisation d'un ordinateur pour les calculs qui impliquent de nombreuses itérations.

3.4.1 Méthodes graphiques et régression linéaire

La régression linéaire [12] est utilisée dans les méthodes graphiques afin de déterminer la droite qui correspond le mieux aux points qui représentent les défaillances. La popularité des méthodes graphiques est due à la facilité à laquelle elles peuvent être exécutées pour déterminer les estimateurs des différentes distributions. Nous ne nous attarderons pas sur ces méthodes graphiques car la précision des estimateurs est habituellement inférieure à celle obtenue à l'aide des méthodes analytiques.

3.4.2 Maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood Method)

La méthode du maximum de vraisemblance (*MV*) est couramment employée pour estimer les paramètres des distributions de données multiples [12]. Elle permet aussi d'estimer les intervalles de confiance associées. Elle peut être appliquée à l'estimation de paramètres uniques (exponentielle) ou multiples (Weibull) pour un échantillon de données.

Il existe plusieurs manières de colliger des échantillons. Dans un premier temps, on peut choisir une population de n éléments et attendre qu'ils terminent leurs vies. Dans ce cas, les essais sont non censurés et procurent un échantillon complet. Alternativement, on désire

parfois observer la population pendant un certain temps ou bien observer une quantité prédéterminée de défaillances. On obtient alors des échantillons censurés de type I et II respectivement. Par exemple, les données recueillies dans ce projet sont censurées de type I car elles ont été prises pendant une période délimitée indépendamment du nombre de défaillances.

La théorie MV pour une distribution à paramètre unique s'appuie sur l'hypothèse que toutes les unités t_1, \dots, t_n de l'échantillon de n unités sont statiquement indépendantes et viennent de la même distribution avec une densité de probabilité $f(t, \alpha)$. La vraisemblance $L(\alpha)$ est une fonction de α , une valeur arbitraire du paramètre réel dénoté par α_0 . Il est à noter que la méthode est appliquée à un échantillon complet (non censuré).

$$L(\alpha) = f(t_1; \alpha) * \dots * f(t_n; \alpha) \quad (3.43)$$

La vraisemblance logarithmique de l'échantillon est donc:

$$\zeta(\alpha) = \ln [L(\alpha)] = \ln [f(t_1; \alpha)] + \dots + \ln [f(t_n; \alpha)] \quad (3.44)$$

et pour une observation i donnée on a:

$$\zeta_i(\alpha) = \ln [f(t_i; \alpha)] \quad (3.45)$$

On déduit que la vraisemblance logarithmique de l'échantillon est la sommation de n vraisemblances logarithmiques. Par exemple, pour la loi exponentielle, on obtient l'expression suivante:

$$L(\alpha) = (1/\alpha) \exp(-t_1/\alpha) * \dots * (1/\alpha) \exp(-t_n/\alpha) = (\alpha^{-n}) \exp \left[-\frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^n t_i \right] \quad (3.46)$$

et une vraisemblance logarithmique de :

$$\zeta(\alpha) = -n \ln(\alpha) - \left[\frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^n t_i \right] \quad (3.47)$$

La vraisemblance logarithmique d'une seule observation est donc :

$$\zeta_i(\alpha) = -\ln(\alpha) - (t_i / \alpha) \quad (3.48)$$

L'estimateur est trouvé en maximisant l'équation de vraisemblance:

$$\partial \zeta(\alpha) / \partial \alpha = 0 \quad (3.49)$$

$$\partial \zeta(\alpha) / \partial \alpha = -(n/\alpha) + \left[\frac{1}{\alpha^2} \sum_{i=1}^n t_i \right] \quad (3.50)$$

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = t_{\text{moy}} \quad (3.51)$$

On obtient donc un estimateur qui équivaut à la moyenne de l'échantillon, ce qui se rapproche de la réalité pour la distribution exponentielle. Par conséquent, l'estimateur du taux de défaillance est :

$$\lambda = 1 / \alpha = 1 / t_{\text{moy}} \quad (3.52)$$

La même démarche est utilisée pour les distributions à paramètres multiples. Dans ces cas, il faut cependant utiliser des méthodes numériques pour résoudre le système d'équations différentielles (une équation par paramètre car il faut maximiser l'équation de vraisemblance par rapport à chacun d'eux). À titre d'exemple, nous allons montrer les étapes qui permettent de développer les équations permettant au logiciel d'évaluer les estimateurs des deux paramètres principaux de la loi de Weibull. Dans ce deuxième exemple, on applique la *MV* à un échantillon censuré de type 1.

On a donc l'équation de vraisemblance logarithmique pour l'échantillon de n éléments et r défaillances:

$$\zeta(\beta, \theta) = \ln [f(\beta, \theta)] = \ln \{ (\beta / \theta) (t / \theta)^{\beta-1} \exp [- (t / \theta)^\beta] \} \quad (3.53)$$

$$\zeta(\beta, \theta) = \sum_{i=1}^r [\ln(\beta) + (\beta - 1) \ln(t_i) - \beta \ln(\theta) - (t_i / \theta)^\beta] + \sum_{i=r+1}^n [- (t_i / \theta)^\beta] \quad (3.54)$$

$\sum_{i=1}^r$: somme des unités défaillantes

$\sum_{i=r+1}^n$: somme des unités non défaillantes

Pour trouver les estimateurs des paramètres, il faut maximiser l'équation de vraisemblance. Cela peut être fait de plusieurs façons. Tout d'abord, on peut maximiser numériquement l'équation telle que présentée plus haut. Alternativement, on peut tenter de résoudre le système d'équations obtenu en dérivant l'équation principale par chacun des paramètres:

$$0 = \delta \zeta(\beta, \theta) / \delta \theta = \sum_{i=1}^r [- (\beta / \theta) + (\beta / \theta) (t_i / \theta)^\beta] + \sum_{i=r+1}^n (\beta / \theta) (t_i / \theta)^\beta \quad (3.55)$$

$$0 = \delta \zeta(\beta, \theta) / \delta \beta = \sum_{i=1}^r [(1 / \beta) + \ln(t_i / \theta) - (t_i / \theta)^\beta \ln(t_i / \theta)] - \sum_{i=r+1}^n (t_i / \theta)^\beta \ln(t_i / \theta) \quad (3.56)$$

On peut encore une fois essayer de résoudre le système d'équations à l'aide d'une procédure itérative, mais il est plus efficace de le réduire en éliminant le paramètre θ dans l'équation et on obtient alors une fonction à paramètre unique :

$$\sum_i' \ln(t_i) / r = (\sum_i \ln(t_i)) (\sum_i t_i)^{-1} - (1 / \beta) \quad (3.57)$$

Cette dernière fonction peut être résolue aisément de manière itérative pour obtenir le paramètre unique. On calcule ensuite l'autre estimateur avec la fonction suivante:

$$\theta = (\sum_i t_i^\beta / r)^{1/\beta} \quad (3.58)$$

3.4.3 Méthode de précision maximale (Max Model Accuracy Method)

La méthode de précision maximale (*PM*) est une méthode graphique élaborée qui permet de trouver le modèle pour lequel il y aura un minimum d'écart entre les points et la droite du modèle [1]. L'équation de précision maximale permettra donc de réduire au minimum l'écart entre la courbe et les points correspondant aux défaillances. La précision maximale du modèle est définie ainsi:

N : nombre de défaillances

p_i : probabilité cumulative de défaillance donnée par le rang médian pour la défaillance i , modifiée si nécessaire pour tenir compte des suspensions

e_i : probabilité cumulative de défaillance telle que calculée par la distribution l'âge qui correspond à la défaillance i .

On a donc la probabilité d'erreur absolue PEA:

$$PEA_i = | p_i - e_i | \quad (3.59)$$

et la probabilité d'erreur absolue moyenne PEAM:

$$PEAM = (1 / N) \sum_i PEA_i \quad (3.60)$$

Et on peut alors définir la précision du modèle (PM) comme suit:

$$PM = 100 (1 - PEAM) \quad (3.61)$$

L'équation de la PM permet donc de déterminer la droite de distribution qui minimise l'écart avec les points obtenus avec le rang médian. Son évaluation ne peut être effectuée qu'avec l'aide d'un logiciel afin de trouver tous les écarts et optimiser la PM . La PM est en sorte un test de validation du modèle ainsi évalué. Ses critères de validation sont discutés dans la section suivante.

L'avantage principal de la méthode consiste en sa capacité à différencier les défaillances des suspensions. Par suspension, on entend les unités qui ont été remplacées dans un cadre préventif bien qu'elles n'aient pas subi de défaillances comme tel. La PM tient compte de cette différence dans la manière dont sont estimées les données de la fonction de répartition cumulative. Habituellement, on utilise la méthode des Rangs Médians pour estimer les points sur le graphique. Les abscisses représentent l'échelle des temps de défaillances tandis que les ordonnées sont déterminées à l'aide de tableaux de Rangs Médians de Johnson. Les valeurs du Rang Médian sont déterminées par la formule suivante:

$$Rang\ Médian = (i - 0.3) / (N + 0.4) \quad (3.62)$$

i : ordre de défaillance
 N : taille de l'échantillon

Pour tenir compte des unités suspendues, la *PM* utilise un Rang Médian Modifié. Pour ce faire, il faut définir un incrément et un ordre de défaillance modifié:

I : incrément
 j : ordre de défaillance modifié
 f : ordre de défaillance excluant les suspensions
 e : ordre de défaillance incluant les suspensions
 N : taille de l'échantillon

Le rang médian modifié est calculé comme suit pour les défaillances seulement:

$$\text{Rang Médian Modifié} = (j_f - 0.3) / (N + 0.4) \quad (3.63)$$

Pour trouver la valeur de l'ordre de défaillance modifié, il faut d'abord déterminer la valeur de l'incrément :

$$I = (N + 1 - j_{f,1}) / (N + 1 - (e - 1)) \quad (3.64)$$

La valeur de j_0 est toujours nulle, ce qui assure un incrément unitaire lorsque la première unité est défaillante. On calcule l'ordre de défaillance modifié en ajoutant la valeur de l'incrément à celle de l'ordre modifié précédent :

$$j_f = j_{f,1} + I \quad (3.65)$$

On obtient donc des Rangs Médiens Modifiés pour les défaillances survenant après des suspensions. Les défaillances qui précèdent la première suspension ne sont donc pas

affectées et un Rang Médian Normal leur est attribué. Il s'agit d'un facteur important dans notre étude car pour la plupart des échantillons, notamment pour les unités contrôlées, la majorité des suspensions surviennent à la même période, longtemps après les défaillances précoces. On remarquera donc une faible influence des suspensions dans ces échantillons.

3.5 Tests de validation des modèles

Les tests de validation ou d'hypothèse sont des tests statistiques qui sont appliqués afin de déterminer si une distribution donnée s'applique bien à un échantillon de données [3]. Ici, on désire évaluer la méthode qui génère le modèle le mieux adapté aux échantillons obtenus. Il faut cependant décider de la précision désirée pour les modèles afin d'établir un intervalle d'acceptation. Parmi ces derniers, on retrouve les tests paramétriques et non paramétriques.

Les tests paramétriques permettent de déterminer les intervalles de confiance des estimateurs des paramètres du modèle. Les intervalles de confiance sont déterminés avec les lois statistiques de Student, de Fisher ou de Khi-carré. D'après les valeurs de l'intervalle, on déduit si le modèle est valide ou non, mais cela ne permet pas vraiment de valider une distribution par rapport à une autre. Pour ce faire, il faut employer un test non paramétrique. Ces derniers permettent d'établir si la distribution utilisée est applicable à l'ensemble des données. Parmi ces tests, on retrouve le test de Kolmogorov-Smirnov et le test de Khi-carré.

L'estimation des intervalles de confiance se fait par rapport aux paramètres du modèle. Pour la loi de Weibull par exemple, il est difficile d'appliquer cette méthode car plusieurs paramètres définissent la distribution. C'est pourquoi nous allons discuter principalement des méthodes non paramétriques dans cette section.

3.5.1 Test de Kolmogorov-Smirnov (KS)

Ce test permet de comparer la distribution expérimentale avec la distribution théorique et de vérifier la différence entre les deux [3]. En établissant un critère, on est en mesure de vérifier si la distribution expérimentale est satisfaisante par rapport à la théorie. La méthode consiste donc à comparer l'écart maximal entre les deux distributions avec le critère d'acceptation. Si l'écart est supérieur au critère, la distribution est non représentative de l'ensemble de données.

KS : écart maximal

$F_e(t_i)$: fonction de répartition de la distribution expérimentale

$F_n(t_i)$: fonction de répartition de la distribution théorique

$D_{n,\alpha}$: critère KS

$$KS = \max |F_n(t_i) - F_e(t_i)| \quad (3.66)$$

La valeur du critère dépend de la taille de l'échantillon et du niveau de précision α désiré. On a donc la probabilité suivante de rejeter le modèle:

$$Prob(D_{n,\alpha} > \max |F_n(t_i) - F_e(t_i)|) = 1 - \alpha \quad (3.67)$$

On vérifie donc que l'inégalité suivante est respectée, ce qui nous permet d'accepter l'hypothèse pour un niveau de signification α .

$$D_{n,\alpha} > KS \quad (3.68)$$

Certaines modifications ont été appliquées à ce test afin de l'adapter pour les distributions à moyennes variables comme la distribution de Weibull. Au lieu d'utiliser la valeur KS qui est la distance verticale entre les courbes empiriques et théoriques à un point donné, on utilise la distance absolue donnée par la relation de Cramer Von-Mises:

$$Q_n^2 = n \int_0^{\infty} [F_n(t_i) - F_e(t_i)]^2 \Psi(x) dF(t) \quad (3.69)$$

Cette dernière calcule donc l'écart relatif entre les deux distributions concernées. En pratique, on utilise l'approximation suivante pour la statistique de Cramer Von-Mises:

$$Q_n^2 = \sum_{i=1}^n \left[F_e(t_i) - \frac{(i-0,5)}{n} \right]^2 + \frac{1}{12n} \quad (3.70)$$

On peut ensuite comparer la valeur de la distance maximale obtenue avec le critère d'acceptation approprié.

3.5.2 Test de Précision Maximale (PM)

Tel que décrit précédemment, l'équation de précision maximale permet de déterminer la droite qui rejoint le mieux les points associés aux défaillances [1]. La *PM* devient en fait un critère d'acceptation du modèle. On a vu plus haut que l'erreur absolue est inversement proportionnelle à la *PM*. On désire donc une *PM* maximale et elle est évaluée de la façon suivante:

Chapitre 4: Analyse des modèles générés

4. 1 Méthode de filtrage des données

4.1.1 Composantes contrôlées

Boyaux du moteur (tous les modèles), limite : 240 000 km

Compresseur à air (modèle 1), limite : 180 000 km

Compresseur à air (modèle 2), limite : 240 000 km

Démarrreur (modèle 1), limite : 300 000 km

Démarrreur (modèle 2), limite : 240 000 km

Pompe à eau (tous les modèles), limite : 240 000 km

4.1.1.1 Interprétation des données préventives

Dans le cas des composantes contrôlées, la durée de vie de l'unité est fixée par une limite de contrôle. Idéalement, on devrait observer des remplacements correctifs à des kilométrages inférieurs à la limite et des remplacements préventifs à des kilométrages équivalents à la limite. Cependant, cela n'est pas toujours le cas. On observe parfois des remplacements préventifs à des kilométrages bien inférieurs ou bien supérieurs à la limite. Il a été décidé que les kilométrages qui se situaient à l'intérieur d'un intervalle de +/- 10 000 km de la limite de contrôle étaient jugés acceptables alors que les autres sont considérés hors limite.

Les remplacements préventifs inférieurs à la limite semblent indiquer que la réparation a été effectuée au même moment qu'une intervention corrective ou bien lors d'une réfection majeure. L'ouvrier en a alors profité pour remplacer l'unité qui semblait susceptible de faillir avant la prochaine inspection ou avant sa limite. On pourrait donc qualifier cette opération de corrective puisque l'ouvrier en question a bel et bien jugé que l'unité ne serait pas en mesure de compléter sa mission. Nous avons donc modifié le fichier en conséquence.

Quelques questions supplémentaires au questionnaire nous ont permis de comprendre la signification des remplacements préventifs qui ont eu lieu à des kilométrages largement supérieurs à la limite de contrôle. En effet, ces remplacements ont été effectués dans le cadre d'un programme de rattrapage entamé en date du premier janvier 1995. C'est à cette époque que le programme de maintenance préventive a débuté. À ce moment, certaines composantes avaient déjà subi des kilométrages supérieurs à la limite de contrôle établie. Le programme visait donc à remplacer graduellement ces composantes. Cela explique aussi la présence de certains remplacements correctifs à des kilométrages supérieurs à la limite. Nous avons éliminé les données préventives et avons gardé les données correctives dans les fichiers.

4.1.1.2 Valeurs extrêmes

Tous les fichiers ont été soumis à deux tests statistiques visant à éliminer les données qui sont trop élevées par rapport aux autres. Il s'agissait du critère B4 et du test de Gruber (voir section 3.1.1). Ces tests consistent à vérifier l'appartenance de chaque donnée en la comparant à un critère propre à la population. On peut ainsi éliminer les données qui n'appartiennent pas statistiquement à la population.

4.1.1.3 Codes spécifiques attribués dans les banques de données des compresseurs d'air

Les fichiers du compresseur à air comprennent des codes de défaillances spécifiques qui sont reliés à une modification effectuée au cours de la vie de l'unité. Il a donc fallu classer les interventions sur les unités défaillantes qui ont subi la modification selon qu'elles soient survenues dans un cadre préventif ou correctif. Ainsi, le code 'D' représente une unité défaillante remplacée en mode correctif par une unité modifiée. Nous avons donc considéré ces défaillances comme des remplacements correctifs. De même, le code 'Q' représente la modification de l'unité présente ou un remplacement en mode préventif par une unité modifiée. Dans les deux cas précédents, les défaillances ont été considérées comme étant des remplacements préventifs. Les codes 'I' et 'J' peuvent être considérés comme étant les

équivalents des codes 'D' et 'Q' respectivement puisqu'ils servent seulement à préciser que l'unité a été remplacée ou modifiée suite à une inspection. La différence entre les codes permet aux gestionnaires de la flotte de sortir des compte rendus et des statistiques.

La modification entreprise sur les compresseurs à air entraîne une problématique pour l'évaluation de la fiabilité. En effet, les unités modifiées ne montrent pas les mêmes caractéristiques que les unités originales. À ce moment, les effets de la modification n'ont pas été évalués statistiquement, mais il semble acquis pour les gestionnaires qu'elles ont un effet bénéfique sur la durée de vie des unités. Finalement, il a été décidé de considérer toutes les composantes dans un même groupe puisqu'il est souvent impossible de savoir si la composante a bel et bien été modifiée dans les cas où la modification n'est pas effectuée dans le cadre d'un remplacement correctif ou préventif. Il faut donc apporter une nuance aux résultats qui seront obtenus avec cette banque de données.

4.1.2 Composantes suivies

Alternateur (3 modèles)

Culasse (2 modèles)

Injecteurs (2 modèles)

Soufflante (2 modèles)

Transmission (3 modèles)

Turbocompresseur (1 modèle)

4.1.2.1 Interprétation des données préventives

Pour ces composantes, il n'y a pas de limite de contrôle. On s'attendait à observer des remplacements correctifs seulement. Cependant, nous avons remarqué un bon nombre de remplacement préventif sur la plupart des composantes. Pour ces remplacements préventifs, nous avons appliqué le même raisonnement que pour les unités contrôlées qui avaient des

remplacements préventifs inférieurs à la limite. L'opération peut être qualifiée de corrective puisque l'ouvrier en question a bel et bien jugé que la composante ne serait pas en mesure de compléter sa mission. Pour les cas pertinents, nous avons créé des fichiers supplémentaires dans lesquels tous les remplacements préventifs ont été remplacés par du correctif. Cela nous permet plus de flexibilité lors de l'analyse des modèles obtenus avec le logiciel.

Encore une fois, les fichiers ont été soumis à deux tests visant à éliminer les données qui n'appartiennent pas statistiquement à la population. Comme pour les unités contrôlées, l'application des deux tests n'a pas détecté de données aberrantes.

4.2 Élaboration des modèles pour chaque composante

Afin de bien analyser les résultats obtenus avec un logiciel de fiabilité (Section 4.3), nous avons décidé d'apporter certaines modifications en créant plusieurs fichiers différents pour la même composante lorsque le nombre de données est suffisant. Ainsi, nous avons créé un fichier supplémentaire dans lequel les remplacements préventifs ont été changés par des remplacements correctifs et un autre dans lequel nous avons complètement enlevé les remplacements préventifs laissant seulement les correctifs. Dans les cas où les données étaient insuffisantes pour créer des fichiers supplémentaires, nous avons seulement analysé le fichier original.

4.3 Logiciel d'analyse de fiabilité RELCODE

Les modèles de fiabilité ont été générés par le logiciel RELCODE [7]. Ce logiciel permet l'évaluation des caractéristiques de fiabilité d'une population selon plusieurs méthodes avec la distribution de Weibull et avec la distribution de Hastings (voir le chapitre 3 pour les détails de ces distributions). Tel que mentionné au chapitre 3, la loi de Weibull est reconnue pour son aptitude à bien simuler le comportement de pièces mécaniques.

Le modèle de Hastings est plus flexible en ajoutant deux paramètres supplémentaires mais se veut plus complexe en appliquant deux fonctions différentes, l'une de jeunesse et l'autre de vie normale.

Le logiciel permet d'évaluer les modèles par les méthodes suivantes:

- la distribution de Weibull à deux ou trois paramètres avec la régression linéaire;
- la distribution de Weibull à deux paramètres avec le maximum de vraisemblance;
- la distribution de Weibull à trois paramètres avec la précision maximale;
- la distribution de Hastings (5 paramètres) avec la précision maximale.

Cela correspond au menu suivant:

```

+-----+
| FIT WEIBULL OR HASTINGS DISTRIBUTION - Ungrouped Data Module |
|                                                                  |
| Options 1 and 2 are similar to the probability paper method.  |
|                                                                  |
| Option 5 recommends a preferred model on the basis of model   |
| accuracy and the number of parameters fitted.                 |
+-----+
| <Enter> Return to Ungrouped Module Main Menu                  |
|                                                                  |
| ----Fit by Linear Regression to Probability Plot-----      |
|                                                                  |
| 1   Fit Two Parameter WEIBULL Distribution.                   |
| 2   Fit Three Parameter WEIBULL Distribution                  |
|                                                                  |
| ----Other Options-----      |
|                                                                  |
| 3   Two Parameter WEIBULL by Maximum Likelihood              |
| 4   Three Parameter WEIBULL by Maximum Model Accuracy        |
| 5   Model Optimization - Fit WEIBULL and HASTINGS            |
|       Distributions and select preferred model                |
+-----+

```

Chacune des options permet le calcul des différents paramètres selon la méthode indiqués et fournit le tableau de résultats suivant:

```

Two Parameter WEIBULL Fit - Ungrouped Data Module
-----

+-----+
| ALTE MODELE 1p |
+-----+
|
|   Number of Failures      =      27
|   Number of Suspensions   =       4
|   Total Failures + Suspensions =     31
|
+--- Fitted WEIBULL Parameters      (Maximum Likelihood )-----+
|
|   Minimum Life            =      .00 (KILOMETRES)
|   Shape Parameter BETA    =      2.07
|   Scale Parameter THETA   =    323769.10 (KILOMETRES)
|   Mean Life               =    286794.40 (KILOMETRES)
|   Characteristic Life     =    323769.10 (KILOMETRES)
|   Standard Deviation      =    145346.80 (KILOMETRES)
|
+----- Goodness of Fit Test-----+
|
| Confidence Levels:      80%   90%   95%   97.5%   99%
| Critical Values: K-S test    ---   .152   .165   .177   .190
|   Model Accuracy test      95.84  95.41  94.95    ---   94.10
|
| Observed results: K-S Statistic =    .199
|
|           Model Accuracy=    94.50% (MODERATE)
|
| Hypothesis distribution fits data rejected with 95% confidence.
|
+---(Based on Model Accuracy)-----Output Y/N?:

```

De plus, il offre la possibilité d'opter pour la méthode selon la précision maximale:

Model Optimization						
ALTE MODELE 1p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				319178.80	2.20	94.36%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				300288.40	2.11	95.64%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			44685.04	276015.40	1.56	95.64%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			140438.70	159905.70	.78	97.45%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	140438.70	159905.70	.78	97.45%
Computer preferred model is Number 4. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

Il est à noter que l'évaluation effectuée avec le maximum de vraisemblance n'est pas incluse dans ce tableau qui évalue uniquement la précision maximale. Aussi, le logiciel ne permet pas l'évaluation des distributions de Weibull à trois paramètres et de Hastings avec le maximum de vraisemblance. Il offre cependant la possibilité de visualiser graphiquement plusieurs courbes dans le menu suivant:

RELCODE GRAPHS MENU		

<Enter> Return to Previous Menu		

Weibull or Hastings -----		
1	Reliability Function	Full Graphics
2	Cumulative Distribution Function	Full Graphics
3	Failure Probability Density Function	Full Graphics
4	Failure Rate (Hazard Function)	Full Graphics

Weibull Only -----		
5	Plot Data on Weibull Scale	Full Graphics
6	Plot Data on Weibull Scale	Character Graphics
7	Failure Probability Density Function	Character Graphics
8	Failure Rate (Hazard Function)	Character Graphics

9	Printed or File Output Information	

On peut donc obtenir les graphiques de fiabilité, de répartition, de densité de probabilité et du taux de défaillance. À titre d'exemple, voici une courbe de fiabilité:

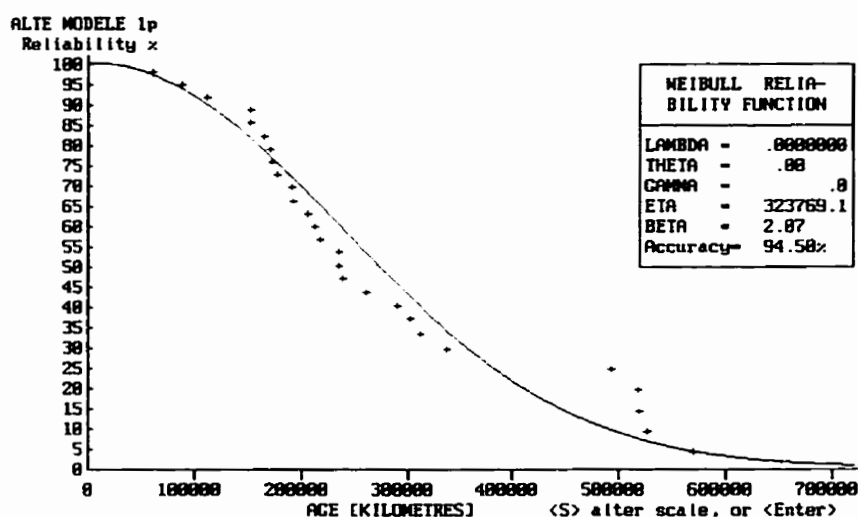


Figure 4.1: Courbe de fiabilité obtenue avec RELCODE

Chacun des fichiers de défaillance a été traité par le logiciel et les résultats complets sont inclus dans l'annexe A.

4.3.1 Distributions de Weibull et de Hastings

Nous avons obtenu les résultats à l'aide des distributions de Weibull à deux et trois paramètres et de Hastings pour chacun des fichiers. Dans la plupart des cas, l'estimation du troisième paramètre est nulle ce qui équivaut, de toute façon, à une loi de Weibull à deux paramètres. La différence dans ce cas est due à des méthodes d'estimation différentes pour chacune des lois. En effet, dans le logiciel RELCODE, les valeurs de la loi de Weibull à deux paramètres sont estimées à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance (MV, voir section 3.4.2) alors que ceux de la loi à trois paramètres sont calculés avec la méthode de précision maximale (PM, voir section 3.4.3). La plupart du temps, la différence entre les résultats n'est pas énorme. Pour les cas où la différence est marquée, il est possible de se baser sur les tests de validation pour choisir le résultat qui convient.

À certaines occasions, nous avons obtenu un paramètre de location avec la loi de Weibull à trois paramètres. Les résultats obtenus pour les trois paramètres sont parfois difficiles à interpréter (ex: $\beta = 30$). Pour ce qui est de la loi de Hastings, les paramètres supplémentaires constituant la période de jeunesse ont rarement été applicables, ce qui équivaut donc à une loi de Weibull à trois paramètres évaluée avec la méthode de précision maximale.

4.3.2 Méthodes d'estimation de paramètres

Tel que mentionné plus haut, le logiciel RELCODE fait appel à plusieurs méthodes d'estimation pour l'évaluation des paramètres des distributions de Weibull et de Hastings. La régression linéaire et le maximum de vraisemblance sont des méthodes analytiques éprouvées dans les domaines de fiabilité alors que la méthode de précision maximale a été développée par N.A.J. Hastings pour l'application aux modèles qui contiennent des données de remplacement préventif.

L'utilisation de RELCODE permet de comparer les distributions de Weibull et de Hastings évaluées avec les méthodes de précision maximale et de régression linéaire. Étant donné que ces deux méthodes sont graphiques, il est intéressant de les comparer avec les résultats acquis avec le maximum de vraisemblance. C'est pourquoi un tableau supplémentaire est ajouté dans l'analyse de chaque composante. Malheureusement, il était seulement possible d'analyser la distribution de Weibull à deux paramètres avec le logiciel RELCODE.

4.3.3 Tests de validation de modèle

Les deux tests de validation ou d'hypothèse utilisés dans le logiciel sont celui de Kolmogorov-Smirnov (voir section 3.5.1) et celui de précision maximale (voir section 3.5.2). Il existe d'autres tests d'hypothèse non paramétriques comme le test khi-carré qui sont utilisés pour établir si le modèle utilisé est applicable aux données observées.

Le test de Kolmogorov et Smirnov est l'un des plus utilisés dans le domaine de la fiabilité. Il permet de comparer le modèle expérimental avec le modèle théorique correspondant et par la suite de le valider ou non. Chaque point de la courbe est comparé avec sa valeur théorique et l'écart maximal ne doit pas excéder un certain critère associé au nombre de données et à un niveau de confiance désiré. Cependant, le test K-S ne tient pas compte des données préventives contrairement au critère de précision maximale.

Lors de l'analyse des modèles obtenus avec le logiciel, nous avons été souvent confrontés à des cas où les deux tests d'hypothèses se contredisaient. Nous nous sommes donc fiés au test d'hypothèse de Kolmogorov-Smirnov de préférence lorsque les remplacements préventifs étaient inexistant dans le modèle. Nous avons parfois préféré considérer la précision maximale, principalement pour les unités contrôlées ou les remplacements préventifs sont plus nombreux et leur provenance plus fiable.

4.3.4 Analyse de chaque modèle

Tel que mentionné auparavant, deux à trois fichiers de données ont été utilisés pour la modélisation de chaque composante. Les modifications ont été apportées relativement à l'attribut de défaillance, soit préventive ou corrective. Le premier fichier est une version primaire qui contient les données obtenues après le filtrage, les attributs (préventifs, correctifs) demeurant tels qu'ils étaient à ce moment. Dans la deuxième version, les attributs préventifs sont remplacés systématiquement par des correctifs. Il nous est rapidement apparu que les modèles obtenus avec cette version dans le cas des unités contrôlées étaient inapplicables. En effet, les données préventives ont toutes la même valeur approximative et donnent des modèles injustifiables lorsqu'elles sont remplacées par des données correctives. La deuxième version s'est avérée très utile dans le cas des composantes suivies pour lesquelles les attributs préventifs sont parfois remis en question (voir section 4.1.1). La troisième version consistait à supprimer les remplacements préventifs des modèles. Ce dernier modèle a surtout servi à évaluer l'effet et l'influence des données préventives sur les

résultats d'analyse. Une forme condensée est présentée dans les tableaux suivant chacune des analyses.

4.4 Tableaux d'analyse

Un tableau contenant les résultats obtenus avec la méthode de vraisemblance a été ajouté pour fin de comparaison et d'évaluation. Afin d'alléger la présentation, une codification a été utilisée pour les résultats tabulés.

Première colonne Taille

Cette colonne sert à désigner la taille de l'échantillon évalué.

Deuxième colonne Données

Cette colonne spécifie de quel fichier proviennent les données.

P: Fichier contenant les attributs correctifs et préventifs après filtrage.

C: Fichier dans lequel les attributs préventifs ont été remplacés par des correctifs.

CS: Fichier dans lequel les données préventives ont été supprimées.

Troisième colonne θ

Paramètre de forme de la loi de Weibull calculé par le logiciel.

Quatrième Colonne β

Paramètre d'échelle de la loi de Weibull calculé par le logiciel

Cinquième colonne PM

Résultat du test d'hypothèse de précision maximale

B: Bon, *PM* supérieure à 99 %

M: Moyen, *PM* située entre 80 % et 99%

F: Faible, *PM* inférieure à 80 %

Sixième colonne 'K-S'

Résultat du test de Kolmogorov-Smirnov

4.4.1 Composantes contrôlées

Les tableaux suivants présentent les résultats pour les composantes contrôlées.

4.4.1.1 Boyaux du moteur 1. Limite: 240 000 km

Tableau 4.1 : Résultat du *MV* pour les boyaux du moteur 1

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
35	P	1 935 688	0.55	90.7 %	99.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
BOCM mod 1P						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				870341.90	.54	91.55%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				617352.80	.75	93.01%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	870341.90	.54	91.55%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	617352.80	.75	93.01%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.31	.00	426224.50	4.77	98.37%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Les méthodes d'estimation procurent des résultats concordants. Les valeurs β de 0.55 et 0.75 indiquent une période de jeunesse possible au niveau de cette unité. La distribution de Hastings confirme cette tendance en évaluant un paramètre η de 0.31. Cette période de jeunesse est suivie d'une période de vieillissement montrée par le β de 4.77.

- Le test K-S indique que le premier modèle est plus approprié aux données que le deuxième pour ce cas. Il est à noter que le K-S ne s'applique pas lorsque des données préventives sont présentes, ce qui est le cas. Pour ce qui est de la *PM*, elle rejette les deux distributions de Weibull mais accepte celle de Hastings.

b) Préventifs remplacés par correctifs

Tel que mentionné plus haut, pour le cas des unités contrôlées, la source des remplacements préventifs n'est pas remise en question. Nous avons de plus noté que les résultats obtenus de cette façon étaient injustifiables la plupart du temps. Nous allons ignorer ces modèles pour les composantes contrôlées lors des analyses suivantes.

c) Remplacements correctifs seulement

Données insuffisantes

d) Commentaires sur les résultats

On opte pour le modèle évalué par la *PM* parce qu'il s'agit d'un échantillon qui compte beaucoup de données préventives. Ce modèle indique une période de jeunesse sur cette composante.

4.4.1.2 Boyau du moteur 2. Limite: 240 000 km

Tableau 4.2 : Résultats du *MV* pour les boyaux du moteur 2

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
49	P	580 854	1.41	93.8 %	99.0%
13	CS	192 051	1.54	88.7 %	99.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
BOCM mod 2P						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				1487841.00	.81	93.66%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				953960.30	1.14	94.65%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			.001487841.00		.81	93.66%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00 953960.30		1.14	94.65%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.40	222658.50	119347.90	.61	98.91%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Les deux méthodes d'estimation donnent des résultats concordants. Ils indiquent tous une tendance au vieillissement qui est faible, ce qui indique que l'entretien est efficace. Pour ce qui est de la distribution de Hastings, elle indique des résultats qui ne sont pas applicables.

- Le K-S est satisfaisant à 99% mais étant donné le nombre de remplacements préventifs, ce test d'hypothèse est invalide dans ce cas.

b) Remplacements correctifs seulement

Model Optimization						
BOCM mod 2cs						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				212430.20	.88	86.07%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				216678.80	1.72	89.68%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	212430.20	.88	86.07%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	216678.80	1.72	89.68%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.35	202056.70	25966.17	2.92	95.21%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Ces deux modèles montrent une tendance plus marquée au vieillissement que les précédents. Cela concorde avec la suppression des données préventives qui avaient toutes une valeur supérieure aux remplacements correctifs. On observe cela par le paramètre θ qui représente la moyenne d'âge des unités pour les modèles à deux paramètres. On remarque que cette moyenne est bien inférieure pour les modèles correctifs. Le résultat de Hastings est semblable au précédent.

c) Commentaires sur les résultats

La *PM* qui est favorisée dans ce cas puisque les remplacements préventifs sont nombreux.

4.4.1.3- Compresseur d'air 1. Limite: 180 000 km

Tableau 4.3 : Résultats du *MV* pour le compresseur d'air 1

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
196	P	154 560	1.44	95.8 %	99.0%
166	CS	129 996	1.49	94.9 %	99.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
COMP TUFLO-700 1p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				184239.10	1.02	92.89%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				159878.80	1.80	97.24%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	184239.10	1.02	92.89%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	159878.80	1.80	97.24%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000000	.52	35006.13	140870.20	2.02	98.03%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Il y a similarité entre les deux méthodes au niveau des paramètres θ et β . Les résultats démontrent une dégradation avec l'âge malgré le programme d'entretien et la modification. On note aussi que la taille de l'échantillon est très satisfaisante dans ce cas.

- Le modèle de Hastings montre une période de jeunesse sur 35 000 km suivie d'une période de vieillissement avec β de 2.02.

- Fait intéressant à noter, la *PM* ne fournit pas des modèles tellement plus précis que le *MV*, ce qui est en accord avec le test d'hypothèse *PM*.

b) Remplacements correctifs seulement

Model Optimization						
COMP TUFLO-700 lcs						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				141496.30	1.06	91.92%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				138444.60	1.92	96.38%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	141496.30	1.06	91.92%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	138444.60	1.92	96.38%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000001	.53	31674.20	124639.70	2.20	97.57%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Les résultats sont semblables à ceux obtenus en a), ce qui illustre l'influence relative des données préventives lors de l'estimation. On pourrait convenir que ces dernières n'affectent à peu près pas les résultats lorsqu'elles sont minoritaires.

- Le test d'hypothèse K-S est donc valide pour les échantillons qui consistent d'une majorité de données correctives.

Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)

- Les deux méthodes indiquent une propension aux défaillances qui s'accroît avec l'âge. Encore une fois, on a un échantillon de grande taille qui contient peu de remplacements préventifs.
- Dans ce cas, le modèle de Hastings équivaut à une distribution de Weibull de trois paramètres.

b) Remplacement correctif seulement

Model Optimization						
COMP TUFLO-750 2cs						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				137934.90	1.34	95.57%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				140637.30	1.70	98.27%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	137934.90	1.34	95.57%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	140637.30	1.70	98.27%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	.00	140637.30	1.70	98.27%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Nous avons obtenu des résultats pratiquement identiques avec les deux méthodes. Particulièrement au niveau des valeurs de β qui sont de 1.70 et 1.71. Ces modèles concordent avec ceux obtenus avec les données préventives en ce qui à trait au vieillissement de l'unité.
- Il est à noter que le K-S est plus satisfaisant lorsque les remplacements préventifs sont supprimés.

- À nouveau, nous sommes en présence d'un modèle qui compte peu de remplacements préventifs par rapport à la taille de l'échantillon. La méthode *MV* illustre que l'entretien est efficace avec un β de 1.2 alors que la *PM* montre un vieillissement avec $\beta = 1.63$
- La période de jeunesse du modèle de Hastings calculée avec la *PM* semble être exagérée pour ce cas (117 384 km).
- Le K-S est satisfaisant, ce qui nous porte à favoriser la *MV* pour ce cas.

b) Remplacements correctifs seulement

Model Optimization						
DEMA 6V71 1cs						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				218931.40	.88	91.31%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				227594.00	1.65	95.43%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	218931.40	.88	91.31%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	227594.00	1.65	95.43%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000001	.54	94932.13	187537.00	1.82	97.44%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- On observe des résultats très semblables qu'avec les données préventives. Cela démontre la faible influence des données préventives lorsqu'elles sont peu nombreuses.

c) Commentaire sur les résultats

On favorise donc les résultats obtenus avec le *MV* qui indiquent que la limite de contrôle est adéquate pour l'unité.

4.4.1.6- Démarreur 2. Limite: 240 000 km

Tableau 4.6 : Résultats du *MV* pour le démarreur 2

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
71	P	246 709	0.97	94.9 %	99.0%
51	CS	151 313	1.03	95.2 %	97.5%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
DEMA 6V92 2p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				316466.80	.68	92.43%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				243272.70	1.24	97.29%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	316466.80	.68	92.43%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	243272.70	1.24	97.29%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	.00	243272.70	1.24	97.29%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Les deux méthodes d'estimation montrent que l'entretien préventif est efficace avec des valeurs de β de .97 et 1.24.

- Il n'y a pas de modèle de Hastings généré pour ce cas.
- On remarque que le test *PM* accepte le modèle estimé avec la *PM* alors qu'il rejette l'autre. Il faut opter pour la *PM* dans ce cas puisque le nombre de suspension n'est pas négligeable.

b) Remplacements correctifs seulement

Model Optimization						
DEMA 6V92 2cs						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				170525.70	.69	91.86%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				169980.80	1.25	98.08%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	170525.70	.69	91.86%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	169980.80	1.25	98.08%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	.00	169980.80	1.25	98.08%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: <Esc> to quit)						

-Malgré que la proportion de remplacements préventifs est substantielle, on observe peu de différence entre les modèles obtenus en a) et en b).

c) Commentaire sur les résultats

On opte pour les résultats de la *PM* qui indiquent que la composante est dans une phase de vieillissement.

4.4.1.7- Pompe à eau 1. Limite: 240 000 km

Tableau 4.7 : Résultats du *MV* pour la pompe à eau 1

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
145	P	163 181	2.89	90.6 %	99.0%
144	CS	162 133	2.94	90.5 %	99.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
PEAU 6V71 1p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				182251.30	1.53	86.65%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				175034.20	5.00	95.80%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	182251.30	1.53	86.65%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	175034.20	5.00	95.80%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000000	.45	.00	178448.80	7.46	97.65%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Il y a seulement un remplacement préventif dans tout l'échantillon. Nous allons donc nous fier à la méthode du *MV* ainsi qu'au test K-S.

b) Remplacements correctifs seulement

Model Optimization						
PEAU 6V71 lcs						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				179619.80	1.54	86.57%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				172506.80	5.16	95.66%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	179619.80	1.54	86.57%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	172506.80	5.16	95.66%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.45	.00	177900.40	7.55	97.58%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter>						

- La valeur de β de 2.94 indique une tendance à la défaillance fortement accentuée avec l'usure.
- Le test K-S est satisfaisant pour ce modèle.

c) Commentaires sur les résultats

La tendance à l'usure est évidente pour cette unité. Une seule unité a été remplacée dans un cadre préventif. On recommande donc une diminution de la valeur de la limite de contrôle pour cette unité.

4.4.1.8 Pompe à eau 2. Limite: 240 000 km

Tableau 4.8 : Résultats du *MV* pour la pompe à eau 2

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
134	P	220 180	1.21	97.3 %	99.0%
113	CS	181 955	1.2	98.2%	90.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
PEAU 6V92 2P						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				232850.00	1.00	96.40%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				232756.80	1.15	97.55%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	232850.00	1.00	96.40%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	232756.80	1.15	97.55%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000003	.87	257809.20	125290.50	.87	97.89%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Les deux méthodes donnent des résultats concordants. Il n'est donc pas nécessaire de favoriser l'une par rapport à l'autre.

b) Remplacements correctifs seulement

Model Optimization						
PEAU 6V92 2cs						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				190506.30	.99	97.23%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				194316.40	1.14	98.17%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	190506.30	.99	97.23%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	194316.40	1.14	98.17%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	.00	194316.40	1.14	98.17%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

c) Commentaires sur les résultats

Tous les modèles développés donnent la même conclusion à l'effet que la limite de contrôle est efficace dans ce cas.

4.4.2 Unités suivies

4.4.2.1 Alternateur 1

Tableau 4.9 : Résultats du *MV* pour l'alternateur 1

Taille	Données	θ	β	MA	K-S
31	P	323 769	2.07	97.5 %	99.0%
31	C	305 877	2.17	95.4 %	80.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
ALTE MODELE 1p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				319178.80	2.20	94.36%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				300288.40	2.11	95.64%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			44685.04	276015.40	1.56	95.64%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			140438.70	159905.70	.78	97.45%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	140438.70	159905.70	.78	97.45%
Computer preferred model is Number 4. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Il y a une différence notable entre les deux modèles parce que la *PM* a généré un troisième paramètre pour la loi de Weibull. On obtient alors une période de fiabilité parfaite de 140 438 km, ce qui est inacceptable du point de vue pratique. On favorise donc l'estimation procurée par la *MV* qui indique une propension à l'usure avec un β de 2.07.

- Le test d'hypothèse K-S est satisfaisant alors que le *PM* est moyen.

b) Données préventives remplacées par des correctives

Model Optimization						
ALTE MODELE 1c						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				301933.10	2.33	95.51%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				284177.10	2.38	96.79%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			42270.64	257043.60	1.72	96.34%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			132850.60	145761.30	1.00	97.81%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	132850.60	145761.30	1.00	97.81%
Computer preferred model is Number 4. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Les résultats sont sensiblement les mêmes que ceux obtenus en a).

c) Commentaires sur les résultats

Les résultats indiquent clairement la nécessité d'apposer une limite de contrôle sur les unités.

4.4.2.2 Alternateur 2

Tableau 4.10 : Résultats du *MV* pour l'alternateur 2

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
26	P	372 020	1.27	95.4 %	95.0%
26	C	355 901	1.36	94.9 %	99.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
ALTE MODELE 2p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				380893.80	1.09	95.38%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				380893.80	1.18	95.52%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	380893.80	1.09	95.38%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	380893.80	1.18	95.52%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000002	1.01	552192.40	161420.20	.61	96.48%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter>						

- Il y a seulement deux données de remplacement préventif dans un petit échantillon qui en compte 26 au total. Les méthodes d'estimation présentent des résultats équivalents qui indiquent un léger vieillissement.

- Le modèle de Hastings indique une période de défaillance aléatoire de 552 000 km suivie d'une période où le taux de défaillance décroît avec la durée.

- Les tests d'hypothèses présentent des conclusions satisfaisantes pour tous les cas.

b) Données préventives remplacées par des correctives

Model Optimization						
ALTE MODELE 2c						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				365331.10	1.13	94.97%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				380090.50	1.19	95.21%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	365331.10	1.13	94.97%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	380090.50	1.19	95.21%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000002	1.01	529959.70	103895.20	.56	96.72%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter>						

- Les résultats sont les mêmes parce qu'il y a très peu de données préventives.

c) Commentaires sur les résultats

On observe un vieillissement de l'unité mais pas assez pour qu'il soit profitable d'appliquer la maintenance. En fait il semble que le processus de défaillance soit aléatoire dans ce cas.

4.4.2.3 Alternateur 3

Tableau 4.11 : Résultats du *MV* pour l'alternateur 3

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
79	P	184 695	1.15	97.7 %	80.0%
79	C	175 855	1.18	96.1 %	97.5%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
ALTE MODELE 3p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				198245.80	.93	96.80%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				206172.40	1.04	97.68%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	198245.80	.93	96.80%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	206172.40	1.04	97.68%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000004	.82	155088.30	217044.80	2.11	98.15%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Ici, on a un échantillon de taille satisfaisante avec peu de données préventives. Les méthodes d'estimation illustrent que l'unité ne nécessite pas d'entretien préventif avec des valeurs β voisines de l'unité.

- Le modèle de Hastings suggère une période sans défaillance d'une durée exagérée (155 088 km)

b) Données préventives remplacées par des correctives

Model Optimization						
ALTE MODELE 3c						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				185502.60	.95	96.39%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				196856.90	1.06	97.24%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	185502.60	.95	96.39%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	196856.90	1.06	97.24%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000004	.83	140679.60	210135.00	2.99	98.41%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

Encore une fois, les résultats n'offrent aucune discordance avec ceux observés en a). Cela est dû à la faible proportion de données préventives dans l'échantillon.

c) Commentaires sur les résultats

Les modèles développés avec la *PM* et le *MV* indiquent qu'il n'est pas nécessaire d'appliquer la maintenance préventive sur cette unité. Le processus de défaillance est aléatoire dans ce cas.

4.4.2.4 Culasse 1

Tableau 4.12 : Résultats du *MV* pour la culasse 1

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
23	P	306 606	1.78	97.3 %	80.0%
23	C	297 466	1.95	95.3 %	80.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
CULM 6V71 1P						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				267710.30	2.12	95.47%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				270790.60	2.11	96.72%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			51787.84	238479.70	1.32	96.70%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			63296.25	211255.50	1.37	97.26%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	63296.25	211255.50	1.37	97.26%
Computer preferred model is Number 4. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

Nous sommes en présence d'un cas où la *PM* a généré un troisième paramètre à la fonction de Weibull. Cette fois-ci, le paramètre en question est de 63 296 km, ce qui est plus raisonnable.

Le test d'hypothèse K-S rejette le modèle *MV* alors que la *PM* est acceptable pour les deux.

b) Données préventives remplacées par des correctives

Model Optimization						
CULM 6V71 1C						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				292689.30	2.07	95.23%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				275476.80	2.06	96.58%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			52684.07	234506.50	1.32	96.74%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			52684.07	220715.60	1.48	97.18%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	52684.07	220715.60	1.48	97.18%
Computer preferred model is Number 4. To select this model just press <Enter>						

Les résultats sont sensiblement les mêmes étant donné la faible quantité de données préventives.

c) Commentaires sur les résultats

On favorise le résultats obtenu avec la méthode du *MV* qui indique une phase de vieillissement pour cette composante.

4.4.2.5 Culasse 2

Tableau 4.13 : Résultats du *MV* pour la culasse 2

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
9	C	319 771	2.43	94.4 %	99.0%

a) Avec remplacements préventifs

- Il n'y avait pas de données préventives dans l'échantillon.

b) Remplacements correctifs seulement

Model Optimization						
CULM 6V92						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				325839.60	1.81	92.03%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				332356.40	4.50	93.87%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	325839.60	1.81	92.03%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	332356.40	4.50	93.87%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000002	1.22	276921.00	125164.00	.84	96.58%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- L'échantillon est vraiment petit avec seulement neuf données. On favorise le modèle *MV* parce qu'il n'y a que des données correctives.

- Le modèle de Hastings ne semble pas convenir à la réalité pour ce cas car il indique une période de vieillissement suivie d'une de jeunesse.

- Les deux test corroborent le modèle *MV*.

c) Commentaires sur les résultats

Le modèle choisi indique qu'il y a nécessité d'appliquer une limite de contrôle sur l'unité. Cependant, l'échantillon étant insuffisant, il faudrait reprendre la modélisation avec plus de données pour confirmer l'hypothèse.

4.4.2.6 Injecteurs 1

Tableau 4.14 : Résultats du *MV* pour les injecteurs 1

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
59	P	255 617	1.77	97.0 %	80.0%
59	C	224 467	1.76	98.3 %	80.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
INJE 6V71 1p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				245048.70	1.99	97.74%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				240147.70	2.07	97.96%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	245048.70	1.99	97.74%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	240147.70	2.07	97.96%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	.00	240147.70	2.07	97.96%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Les modèles générés indiquent que la maintenance est nécessaire pour enrayer les effets de l'usure.

b) Données préventives remplacées par des correctives

Model Optimization						
INJE 6V71 1c						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				221798.40	1.88	98.02%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				217362.40	1.99	98.27%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			4435.97	216925.40	1.80	98.03%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	217362.40	1.99	98.27%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	.00	217362.40	1.99	98.27%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter>						

- On obtient la même chose qu'en a). La différence la plus marquée se situant au niveau du calcul du paramètre θ .

c) Commentaires sur les résultats

La maintenance préventive est nécessaire dans ce cas pour contrer l'effet de l'usure. On recommande l'application d'une limite de contrôle pour l'unité.

4.4.2.7 Injecteurs 2

Tableau 4.15 : Résultats du *MV* pour les injecteurs 2

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
13	C	305 718	2.33	91.9 %	99.0%

a) Avec remplacements préventifs

- Aucun remplacement préventif dans l'échantillon.

b) Données préventives remplacées par des correctives

Model Optimization						
INJE 6V92 2c						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				305964.90	1.93	91.38%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				331186.20	2.04	91.91%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	305964.90	1.93	91.38%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	331186.20	2.04	91.91%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000003	1.67	351780.20	35518.13	.37	94.77%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Il n'y a pas de données préventives alors on opte pour le modèle généré par le *MV*. De toute manière, les deux modèles indiquent une tendance à l'usure.

- Le modèle de Hastings indique une période initiale de vieillissement suivie d'une période de jeunesse, ce qui ne semble pas être valide dans la réalité pour les pièces mécaniques.

- Les tests K-S et *PM* sont satisfaisants pour les modèles de Weibull.

c) Commentaires sur les résultats

On recommande donc l'entretien préventif pour cette unité mais il serait bon de reprendre la modélisation avec un échantillon de plus grande taille.

4.4.2.8 Soufflante 1

Tableau 4.16 : Résultats du *MV* pour la soufflante 1

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
72	P	193 027	2.12	98.2 %	80.0%
72	C	185 001	2.21	98.1 %	80.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
SOUF 6V71 1p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				195301.40	1.94	97.50%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				195301.40	2.23	98.46%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	195301.40	1.94	97.50%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	195301.40	2.23	98.46%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	.00	195301.40	2.23	98.46%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Il est préférable d'opter pour le modèle de la *PM* parce qu'il y a une proportion intéressante de données préventives. Les deux s'accordent à démontrer qu'il y a vieillissement de l'unité.

- Le K-S rejette tous les modèles tandis que la *PM* les accepte. Cela confirme donc la validité du modèle *PM*.

b) Données préventives remplacées par des correctives

Model Optimization						
SOUF 6V71 1c						
MODEL	LAMBDA	THETA	GAMMA	ETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				185001.50	1.85	97.30%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				185001.50	2.21	98.66%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	185001.50	1.85	97.30%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	185001.50	2.21	98.66%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	.00	185001.50	2.21	98.66%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter>						

- Nous avons obtenu des résultats semblables à ceux en a).

c) Commentaires sur les résultats

On propose l'application d'une limite pour cette composante afin d'enrayer l'effet de l'usure.

4.4.2.9 Soufflante 2

Tableau 4.17 : Résultats du *MV* pour la soufflante 2

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
14	P	481 017	1.95	87.4 %	90.0%
14	C	324 924	4.23	85.2 %	99.0%
6	CS	278 402	2.00	91.1 %	97.5%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
SOUF 6V92 2p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				423156.40	1.69	88.18%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				423156.40	1.56	88.37%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	423156.40	1.69	88.18%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	423156.40	1.56	88.37%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000001	.92	315070.50	54010.24	2.11	98.13%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter>						

- Les modèles suggèrent une tendance au vieillissement avec des valeurs β de 1.95 et 1.56. On doit favoriser le *PM* à cause de la majorité de données préventives dans l'échantillon.

b) Données préventives remplacées par des correctives

Model Optimization						
SOUF 6V92 2c						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				333671.20	2.43	84.32%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				340344.60	16.92	95.24%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	333671.20	2.43	84.32%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			6673.42	333537.70	17.26	95.26%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000001	.94	306030.40	39990.50	2.47	96.83%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter>						

Les résultats obtenus sont inacceptables.

c) Commentaires sur les résultats

Il faudrait reprendre les essais avec un échantillon plus grand. Les premiers modèles semblent suggérer l'application d'une limite de contrôle sur la composante.

4.4.2.10 Transmission 1

Tableau 4.18 : Résultats du MV pour la transmission 1

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
67	P	315 183	1.14	94.4 %	99.0%
67	C	306 356	1.19	94.1 %	99.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
TRAN V730-D 1p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				346481.40	.85	93.55%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				353128.30	1.51	95.46%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	346481.40	.85	93.55%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	353128.30	1.51	95.46%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000001	.62	267720.30	214132.20	1.04	98.63%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter>						

- La faible proportion de données préventives de l'échantillon nous pousse à favoriser le modèle fourni par la MV par rapport à l'autre.

- Le modèle de Hastings montre une période sans défaillance d'une durée exagérée (267 720 km).

b) Données préventives remplacées par des correctives

Model Optimization						
TRAN V730-D 1c						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				328615.30	.88	93.13%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				355419.30	1.69	95.33%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	328615.30	.88	93.13%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	355419.30	1.69	95.33%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000001	.62	266287.00	198113.10	1.09	98.64%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter>						

On obtient sensiblement le même résultat qu'en a) à cause du peu de données préventives.

c) Commentaires sur les résultats

Le modèle choisi indique que la maintenance n'est pas nécessaire dans ce cas puisque l'usure n'est pas un facteur déterminant.

4.4.2.11 Transmission 2

Tableau 4.19 : Résultats du *MV* pour la transmission 2

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
59	P	347 638	1.55	96.3 %	90.0%
59	C	337 007	1.67	95.5 %	95.0%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
TRAN V731-D 2p						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				390600.90	1.10	93.97%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				374833.10	1.63	97.54%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	390600.90	1.10	93.97%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	374833.10	1.63	97.54%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	.00	374833.10	1.63	97.54%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Les deux modèles indiquent qu'il y a une tendance à l'usure avec des valeurs β de 1.55 et 1.63 respectivement.

- Il n'est pas vraiment nécessaire de favoriser l'un des modèles puisqu'ils donnent des résultats similaires.

b) Données préventives remplacées par des correctives

Model Optimization						
TRAN V731-D 2c						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				362039.30	1.16	93.63%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				369132.40	1.66	97.03%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	362039.30	1.16	93.63%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	369132.40	1.66	97.03%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	.00	369132.40	1.66	97.03%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter>						

Même chose qu'en a) parce que le nombre de données préventives est une faible proportion de l'échantillon.

c) Commentaires sur les résultats

On observe un risque de défaillance qui accroît en fonction de l'âge pour cette composante.

4.4.2.12 Transmission 3

Tableau 4.20 : Résultats du *MV* pour la transmission 3

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
14	C	182 682	1.34	93.6 %	95.0%

a) Avec remplacements préventifs

Aucune donnée préventive dans l'échantillon.

b) Remplacements correctifs seulement

Model Optimization						
TRAN VR731-D						
MODEL	LAMBDA	THETA	GAMMA	ETA	BETA	ACCURACY
1. Weibull 2 Parameter Linear Regression				183377.50	1.19	94.63%
2. Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				183084.30	1.05	94.82%
3. Weibull 3 Parameter Linear Regression			7335.10	174324.40	1.01	94.74%
4. Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			3667.55	181004.60	.99	94.91%
5. Hastings Max Model Accuracy	.000000	.00	3667.55	181004.60	.99	94.91%
Computer preferred model is Number 2. To select this model just press <Enter>						

On préfère le modèle généré par *MV* parce qu'il n'y a pas de données préventives dans l'échantillon.

-Le modèle de Weibull à trois paramètres indique une période de non-défaillance de 3667 km, ce qui semble raisonnable.

- Les tests d'hypothèses sont satisfaisants pour le modèle choisi.

c) Commentaires sur les résultats

Il faudrait reprendre l'évaluation des modèles avec un échantillon plus grand.

4.4.2.13 Turbocompresseur

Tableau 4.21 : Résultats du *MV* pour le turbocompresseur

Taille	Données	θ	β	PM	K-S
16	P	304 523	2.22	90.0 %	95.0 %
16	C	273 666	1.69	89.4 %	99.0%
14	CS	289 997	2.26	89.9 %	97.5%

a) Avec remplacements préventifs

Model Optimization						
TURBO	1p					
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				309816.50	1.72	90.81%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				335087.10	3.17	93.67%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	309816.50	1.72	90.81%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	335087.10	3.17	93.67%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000003	1.42	328582.30	61182.84	2.15	95.98%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

-Les modèles de Weibull indiquent qu'il y a vieillissement avec des valeurs β de 2.22 et 3.17.

- Le modèle de Hastings montre une période sans défaillance de 328 582 km, ce qui ne correspond pas à la réalité.

- Les tests d'hypothèses se contredisent.

b) Données préventives remplacées par des correctives

Model Optimization						
TURBO 1c						
MODEL	LAMBDA	ETA	GAMMA	THETA	BETA	ACCURACY
1.Weibull 2 Parameter Linear Regression				287117.80	1.16	90.91%
2.Weibull 2 Parameter Max Model Accuracy				317001.20	1.18	91.35%
3.Weibull 3 Parameter Linear Regression			.00	287117.80	1.16	90.91%
4.Weibull 3 Parameter Max Model Accuracy			.00	317001.20	1.18	91.35%
5.Hastings Max Model Accuracy	.000002	.78	104358.80	268051.90	8.41	97.60%
Computer preferred model is Number 5. To select this model just press <Enter> or enter your choice of model (1 to 5) and press <Enter>: (<Esc> to quit)						

- Les modèles sont très différents de ceux obtenus en a) et cela suggère que la taille de l'échantillon est trop modeste.

c) Commentaires sur les résultats

Il faudrait reprendre l'évaluation des modèles avec un échantillon plus grand parce que les modèles ne représentent pas bien la population.

4.5 Sommaire de l'analyse

Tout au long de l'analyse, nous favorisons la méthode du *MV* parce qu'elle constitue une évaluation mathématique des estimateurs β et θ . La méthode de *PM* est une évaluation graphique qui vise à déterminer la droite qui minimise la distance la séparant des points (défaillances). De plus la *PM* a été conçue pour les échantillons qui contiennent beaucoup de remplacements préventifs ce qui n'est pas le cas dans la plupart des modèles à l'exception de ceux des unités contrôlées.

Selon le test d'évaluation *PM*, tous les modèles développés sont moyens mais le critère est large (entre 80% et 99 %) et sévère en même temps (99 % et plus pour un bon modèle). Un écart des points inférieur à 5 % (*PM* de 95 %) constitue un modèle satisfaisant [1]. En haut de 90 %, le modèle est acceptable tandis qu'en bas de 80 %, il est insatisfaisant. D'après la littérature [1], il semble qu'un écart absolu de 5 et 10 % soit acceptable. D'un autre côté, les tests de validation selon la méthode du K-S se sont avérés satisfaisant dans la plupart des cas étudiés ici.

Pour certains échantillons, nous avons remarqué qu'il y avait un nombre insuffisant de données pour générer un modèle fiable (moins de 20 données dans l'échantillon). Nous n'avons donc pas analysé de modèle de fiabilité pour ces échantillons. Il s'agit des composantes suivantes : culasse modèle 2, injecteur modèle 2, soufflante 2, transmission modèle 3 et le turbocompresseur.

En conclusion, nous refusons 5 modèles à cause de données insuffisantes alors que les autres modèles sont satisfaisants d'après les tests de validation *PM* et K-S. Le *MV* est favorisé dans la plupart des cas pour les raisons évoquées plus haut tandis que la *PM* est favorisée dans les cas où la proportion de remplacement préventif est grande.

Tableau 4.22 : Paramètres de la loi de Weibull pour les composantes suivies)

Composante	θ	β	Méthode
ALTE1	323 769	2.07	MV
ALTE2	372 020	1.27	MV
ALTE3	175 855	1.18	MV
CULM1	306 606	1.78	MV
CULM2*	319 771	2.43	*
INJE1	255 617	1.77	MV
INJE2*	305 718	2.33	*
SOUF1	195 301	2.23	PM
SOUF2*	423 156	1.56	*
TRAN1	315 183	1.14	MV
TRAN2	347 638	1.55	MV
TRAN3*	182 682	1.34	*
TURB*	304 523	2.22	*

* Données insuffisantes

PM Paramètres générés avec la *PM*

MV Paramètres générés avec le *MV*

Tableau 4.23 : Paramètres de la loi de Weibull pour les composantes contrôlées

Composante	θ	β	Méthode
BOCM1	617 352	0.75	PM
BOCM2	953 960	1.14	PM
COMP1	154 560	1.44	MV
COMP2	150 945	1.54	MV
DEMA1	222 095	1.20	MV
DEMA2	243 272	1.24	PM
PEAU1	163 181	2.89	MV
PEAU2	220 180	1.21	MV

On obtient donc les statistiques suivantes : 5 modèles rejetés à cause de données insuffisantes (24 %), 4 modèles générés avec la *PM* (19 %) et 12 modèles générés avec le *MV* (57 %).

Chapitre 5 : Optimisation des périodes de maintenance

5.1 Optimisation de la maintenance basée sur les coûts d'exploitation

Il existe plusieurs politiques de remplacement des équipements dans les milieux industriels [9]. Dans une situation donnée, il peut parfois être préférable de remplacer les éléments lorsqu'ils ne sont plus en mesure d'accomplir leur rôle. Il est alors possible de faire aisément des prévisions budgétaires à l'aide de la relation suivante :

$$G_f = \frac{C_f}{\mu} \quad (5.1)$$

G_f : coût moyen par km pour le remplacement correctif;

μ : durée de vie moyenne des composantes (sans remplacement préventif);

C_f : coût du remplacement correctif.

En d'autres circonstances, les défaillances sont catastrophiques et ne peuvent être tolérées. Il faut alors élaborer un programme de remplacement préventif très strict. Dans le cas des autobus urbains, une défaillance ne constitue pas un événement catastrophique mais une grande fréquence des défaillances peut projeter une image négative auprès de la clientèle. Il faut donc trouver un programme de remplacement qui saura limiter le nombre des défaillances tout en respectant un budget.

Des méthodes d'optimisation ont été élaborées dans le but d'améliorer les programmes de maintenance [13]. Le facteur monétaire étant primordial et le but de l'exercice étant de réduire les coûts d'opération tout en conservant un niveau de qualité acceptable, on est inévitablement confronté au problème suivant: une augmentation de la fréquence des activités de maintenance bien qu'elle soit efficace à réduire les événements indésirables

engendre souvent des dépenses supplémentaires. Alternativement, un budget réduit entraîne une économie réelle mais mène souvent la prolifération des pannes. Les méthodes d'optimisation permettent de trouver la meilleure fréquence de travaux, celle qui permet un minimum d'occurrence des pannes à un budget minimal (figure 5.1).

On envisage donc la fréquence des activités de maintenance préventive du point de vue financier et du risque de défaillance encouru. Pour bien utiliser la méthode, il faut s'assurer que les composantes visées représentent un risque de défaillance qui augmente avec l'âge, c'est-à-dire que leur taux de défaillance augmente proportionnellement en fonction du temps. On fixe donc un temps de remplacement préventif T_p au terme duquel la composante est remplacée préventivement indépendamment de son état. Pour les cas où une défaillance survient, on remplace l'unité dans un cadre correctif et on remet son temps à zéro, ce qui n'affecte aucunement le modèle.

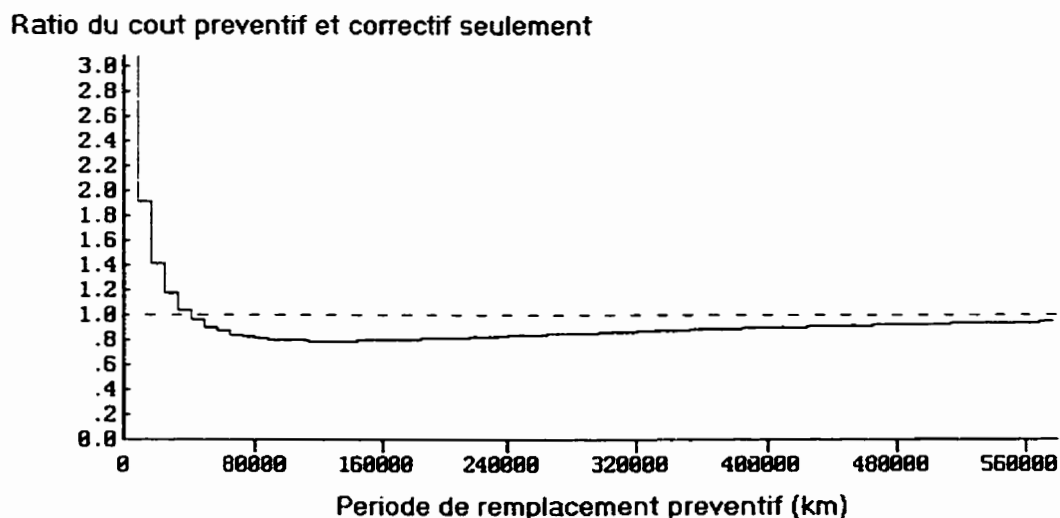


Figure 5.1 : Optimisation par le coût

On cherche donc à déterminer le temps de remplacement optimal t^* pour lequel le coût moyen de remplacement par unité C_m sera minimal. Le coût moyen de remplacement par unité est obtenu en trouvant la somme des coûts reliés aux activités préventives et ceux associés aux activités correctives. On obtient alors:

C_c : coût du remplacement correctif par unité;

$F(t)$: probabilité de remplacement correctif;

C_p : coût du remplacement préventif par unité;

$1 - F(t)$: probabilité de remplacement préventif;

$MTTF$: durée de vie moyenne des composantes.

$$C_m = \frac{C_c F(t) + C_p [1 - F(t)]}{MTTF} \quad (5.2)$$

Tout en notant que :

$$MTTF = \int_0^{\infty} [R(t)] dt$$

Il suffit donc de trouver la valeur de t qui minimise cette fonction. Pour ce faire, on dérive la fonction par rapport à t .

$$\frac{dC_m}{dt} = 0 \quad (5.3)$$

$$\frac{dC_m}{dt} = [-C_c f(t) + C_p f(t)] MTTF - \frac{[C_c R(t) + C_p F(t)] R(t)}{MTTF^2} = 0 \quad (5.4)$$

En modifiant l'équation (5.4), on obtient :

$$[C_c - C_p] f(t) MTTF = R(t) [(C_p - C_c) R(t) + C_c] \quad (5.5)$$

$$\left[\frac{f(t)}{R(t)} \right] MTTF + R(t) = \frac{C_c}{(C_c - C_p)} \quad (5.6)$$

D'après l'équation (3.9), on peut insérer le taux de défaillance $\lambda(t)$ dans la relation:

$$\alpha(t) MTTF + R(t) = \frac{C_c}{(C_c - C_p)} \quad (5.7)$$

On peut manipuler et obtenir la relation suivante:

$$\alpha(t) (C_c - C_p) = C_c F(t) + \frac{C_p [1 - F(t)]}{MTTF} = C_m(t) \quad (5.8)$$

On obtient donc une relation simple entre le taux de défaillance et le coût optimal C_m .

$$C_m(t^*) = \alpha(t^*)(C_c - C_p) \quad (5.9)$$

Cette relation illustre bien que le coût moyen est uniquement lié à la fonction du taux de défaillance et à la différence entre les coûts préventifs et correctifs. Ce modèle est très souple et peut s'adapter à toutes les distributions utilisées pour simuler les échantillons. Il suffit de substituer la fonction du taux de défaillance adéquate dans l'équation (5.9). Évidemment, le succès de cette méthode dépend fortement de la justesse de l'évaluation des coûts préventifs et correctifs.

5.2 Optimisation des périodes de maintenance basée sur la fiabilité

Dans la procédure présentée plus haut, l'optimisation est basée sur la connaissance de la fiabilité d'une composante ainsi que des coûts de remplacement préventif et correctif. Elle consiste à étudier la courbe du coût en fonction de la période de la maintenance. Le coût minimal de cette fonction détermine la période optimale de renouvellement préventif de la composante.

Une utilisation pratique de ce modèle engendre cependant quelques difficultés. Dans le cas actuel, il est difficile d'évaluer les coûts de la maintenance préventive C_p et du remplacement correctif C_c . En effet, les composantes sont remises à neuf dans divers ateliers de reconditionnement, ce qui rend l'évaluation des coûts très ardue. De plus, cette dernière s'avérerait approximative compte tenu de l'absence de registre les répertoriant. Un facteur additionnel consiste en l'interprétation des minima observés sur la courbe du coût. La plupart du temps, la courbe montre une forme plate dans la région du minimum, ce qui complique

l'évaluation exacte du temps T_p . Cela peut être observé sur la figure 5.1 qui présente le résultat des calculs pour une composante.

En plus, en cherchant à établir la grille de maintenance pour un système qui contient plusieurs composantes, il est nécessaire de modifier ensuite les fréquences de remplacements de certaines d'entre elles pour les regrouper dans des intervalles plus pratiques. Ainsi, la période de maintenance préventive pratiquée sur chaque composante est parfois loin de la période optimale calculée.

La méthode d'optimisation des périodes de maintenance basée sur les coûts se caractérise encore par un inconvénient majeur. Il arrive que la fiabilité associée à la période de maintenance préventive soit trop basse et, malgré le coût minimal d'exploitation, ne puisse être acceptée. Afin de considérer cet aspect et de faciliter l'évaluation de la fréquence de maintenance préventive d'une composante sans avoir recours à la comptabilisation des coûts de maintenance préventive et corrective, il est possible d'utiliser une méthode alternative d'estimation de la période de maintenance préventive pour l'ensemble des composantes d'un système à partir de l'analyse de la durée moyenne de vie de chacune d'elles en fonction de la période de maintenance préventive envisagée [8].

5.2.1 Théorie d'analyse

La fiabilité d'une composante soumise à la maintenance préventive toutes les T_p heures (ou kilomètres) peut être définie par l'équation suivante:

$$R_{T_p}(t) = [R(T_p)]^j R(\tau) \quad (5.10)$$

où: $t = j T_p + \tau$; $j = 0, 1, 2, \dots$; $0 < \tau < T_p$

R_{T_p} : fiabilité de la composante avec périodicité T_p

et la durée moyenne de vie de la composante [8] est déterminée avec l'aide de l'équation suivante:

$$M_{T_p} = \frac{\int_0^{T_p} R(\tau) d\tau}{1 - R(T_p)} \quad (5.11)$$

M_{T_p} : durée moyenne de vie avec périodicité T_p .

Les équations (5.10) et (5.11) s'appliquent à n'importe quelle composante ou système à condition que les fonctions $R(T_p)$ et $R(\tau)$ puissent être formulées.

Pour optimiser la fréquence de la maintenance préventive, en concordance avec d'autres composantes du système, il faut calculer le taux de défaillance λ_c et le taux de remplacement préventif λ_p pour chacune d'elle. À partir de l'intégrale $R(\tau)d\tau$ calculée sur l'intervalle $[0, \tau]$, on peut estimer la durée moyenne de vie d'une composante entre les deux interventions possibles, c'est-à-dire entre un remplacement et une défaillance subséquente. Dans un état stationnaire, il sera possible d'obtenir le taux de remplacement total (préventif et correctif) avec l'équation suivante:

$$\lambda_t = \frac{1}{\frac{\int_0^{T_p} R(\tau) d\tau}{1 - R(T_p)}} = \lambda_c + \lambda_p \quad (5.12)$$

λ_t : taux de défaillance total du système.

On remarque que la somme de la fiabilité et de la défiabilité au temps T_p équivaut à l'unité:

$$R(T_p) + Q(T_p) = 1 \quad (5.13)$$

$Q(T_p)$: défiabilité du système au temps T_p .

Finalement, le taux de défaillance correctif est déterminé avec l'équation suivante:

$$\lambda_c = \frac{Q(T_p)}{\int_0^{T_p} R(\tau) d\tau} = 1 \quad (5.14)$$

λ_c : taux de défaillance du système en mode correctif

et le taux de défaillance préventive est évalué avec l'équation suivante:

$$\lambda_p = \frac{R(T_p)}{\int_0^{T_p} R(\tau) d\tau} = 1 \quad (5.15)$$

λ_p : taux de défaillance du système en mode préventif.

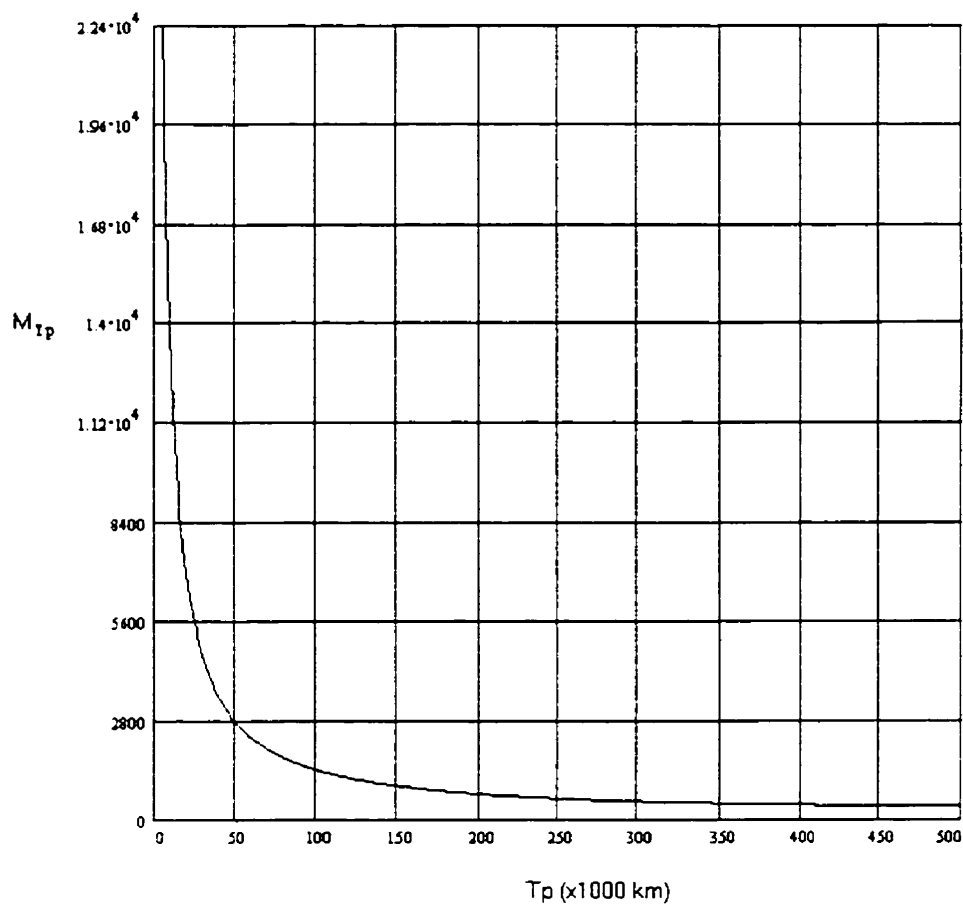


Figure 5.2: Durée moyenne de vie

À partir de la figure 5.2, on pourra donc choisir T_p en fonction de la durée moyenne de vie désirée pour chaque composante. Cela permettra donc de rassembler les activités de plusieurs composantes dans une même période, ce qui contribuera à améliorer l'efficacité du processus de maintenance préventive. Dans l'entreprise, cela se traduit par l'économie de sommes importantes actuellement consacrées aux diverses activités non coordonnées.

De plus, il sera aussi possible de choisir le rapport entre les taux de défaillance λ_p et λ_c dépendant de la politique désirée par l'entreprise. Une forte proportion de défaillances préventives entraîne des dépenses significatives alors qu'une forte proportion de défaillances correctives peut s'avérer catastrophique. Dans le cas étudié présentement, les défaillances sont admises mais une forte propension à la défaillance peut affecter la confiance de la clientèle, ce qui est inacceptable.

Le contrôle des taux de défaillances respectifs permet l'élaboration des fréquences de la maintenance ainsi que le calcul du nombre de pièces de rechange nécessaires pour les remplacements préventifs et correctifs.

Cette méthode permet donc de choisir la période de maintenance préventive en se basant sur la fiabilité d'une composante, mais sans évaluer les coûts de la maintenance préventive et corrective qui sont parfois difficiles à obtenir en pratique. Il est aussi possible de choisir une proportion de défaillance qui est acceptable par l'entreprise. À partir de ces résultats, une grille de maintenance préventive peut être élaborée pour le système observé.

5.2.2 Effet de la maintenance sur la fiabilité des composantes

Dans cette section, nous appliquons la relation (5.10) pour évaluer l'effet de la modification de la période de maintenance T_p sur la fiabilité de chacune des composantes. Nous débutons tout d'abord avec les composantes suivies afin de déterminer si une intervention de maintenance est profitable pour ces dernières. La même procédure est réitérée sur les composantes contrôlées, ce qui permet d'évaluer l'efficacité de la méthode actuelle. Un programme de calcul (annexe B) a été utilisé pour générer les valeurs de fiabilité associées à une période T_p donnée.

Nous avons fixé une limite de 500 000 kilomètres pour chacune des composantes. Cette période correspond au temps moyen d'une grande révision du moteur (GRMO). Nous avons donc simulé le comportement en fiabilité de chaque composante avec différentes périodes de maintenance T_p . Cela nous permet finalement de trouver la variation de fiabilité associée avec chacun des T_p .

Exemple pour les unités suivies: Alternateur modèle 1

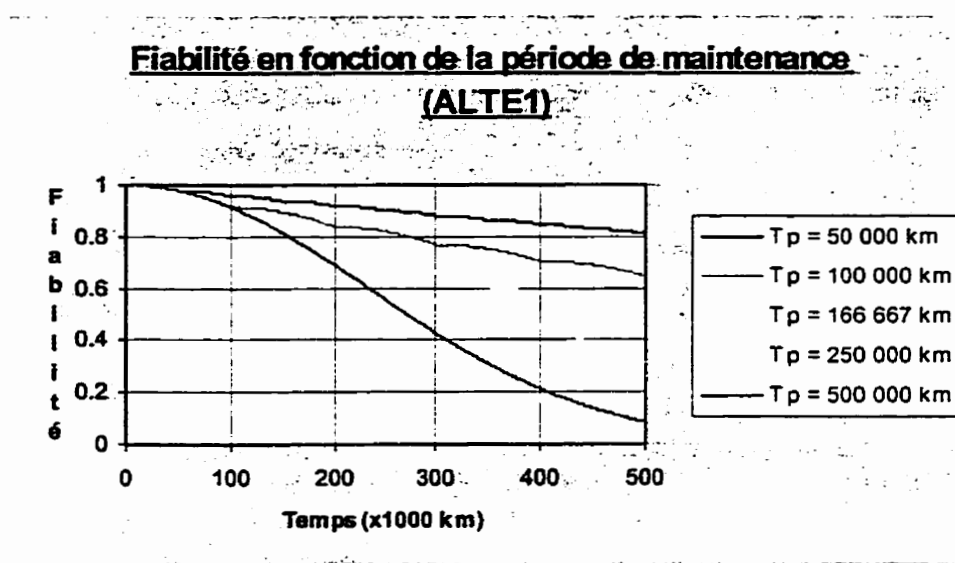


Figure 5.3

Dans le tableau suivant, la variation de fiabilité δR est définie comme étant le pourcentage entre la fiabilité améliorée et la fiabilité obtenue avec la période précédente.

Tableau 5.1 : Variation de la fiabilité (ALTE1)

Période T_p	Fiabilité $R(500\ 000)$	Variation δR
50 000 km	0.812	26 %
100 000 km	0,646	37 %
166 667 km	0.471	51 %
250 000 km	0,312	263 %
500 000 km	0.086	-----

Exemple pour les unités contrôlées : Compresseur modèle 1

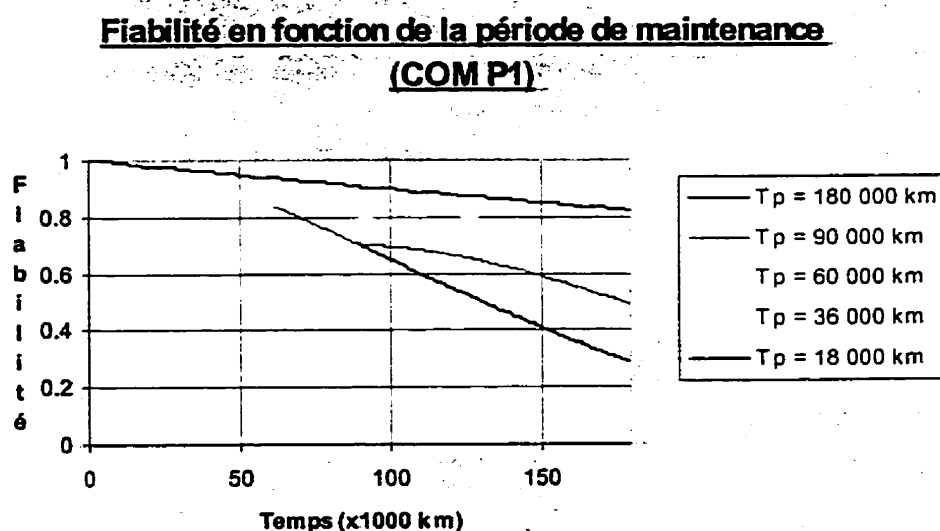


Figure 5.4

Tableau 5.2 : Variation de la fiabilité (COMP1)

Période T_p	Fiabilité $R(240\ 000)$	Variation δR
18 000 km	0,824	15 %
36 000 km	0,713	19 %
60 000 km	0,601	21 %
90 000 km	0,495	68 %
180 000 km	0,294	-----

Les résultats pour toutes les composantes sont inclus dans l'annexe C.

5.3 Coûts du correctif, préventif et de la main-d'oeuvre

Un sondage mené auprès des divers intervenants a permis de déterminer les coûts de base associés aux remplacements préventifs et correctifs de chacune des composantes. Dans un premier temps, il a fallu définir les coûts globaux afin de définir les nombreux coûts mineurs qui les composent. Ainsi, pour un remplacement préventif, on considère les coûts de la main-d'oeuvre et les coûts de réusinage. Pour un remplacement correctif, on considère les mêmes coûts que lors du remplacement préventif avec, en addition, le coût associé au signalement de service.

Un signalement de service se définit comme suit: lorsqu'une panne quelconque se produit dans l'autobus, le chauffeur communique avec le quartier général pour avertir du problème et demander de l'assistance. À ce moment, deux alternatives s'offrent à lui, dépendant de la gravité du problème. Le chauffeur peut ramener le véhicule au centre de service le plus proche lorsque cela est possible ou bien il fait appel à une remorqueuse. Le coût moyen généralisé associé à cette opération a été évalué à 470 dollars par signalement dans le cadre d'une étude menée à la STCUM [6]. Ce coût sera donc utilisé pour distinguer le coût du

remplacement préventif par rapport à celui du remplacement correctif. Ces différents coûts sont illustrés au tableau suivant:

Tableau 5.3: Coût du remplacement préventif et correctif

Composantes	Coût Main d'oeuvre	Coût Réusinage	Coût total Préventif	Coût total Correctif (+470 \$)
Alternateur	192 \$	290 \$	482 \$	952 \$
Boyaux du moteur	288 \$	50 \$	338 \$	808 \$
Compresseur	72 \$	229 \$	301 \$	771 \$
Démarrreur	96 \$	122 \$	218 \$	688 \$
Culasse 6V71	864 \$	121 \$	985 \$	1455 \$
Culasse 6V92	864 \$	254 \$	1118 \$	1588 \$
Injecteurs	192 \$	228 \$	420 \$	890 \$
Pompe à eau	96 \$	67 \$	163 \$	633 \$
Soufflante	240 \$	199 \$	439 \$	909 \$
Transmission V731	264 \$	2310 \$	2574 \$	3044 \$
Transmission VR731	264 \$	694 \$	958 \$	1428 \$
Turbo-compresseur	192 \$	101 \$	293 \$	763 \$

5.4 Utilisation de RELCODE pour l'optimisation

Les calculs d'optimisation ont été effectués à l'aide du logiciel RELCODE. Il s'agit du même logiciel utilisé pour la génération des modèles de fiabilité pour chacune des composantes. La méthode d'optimisation utilisée par le logiciel correspond à celle décrite à la section 5.1 de ce chapitre. Il suffit donc de générer le modèle désiré avec les données de la base et d'entrer les coûts associés à la composante choisie. Le logiciel calcule la période

de remplacement optimale et génère le graphique du ratio du coût en fonction de la période de remplacement. Les résultats complets sont présentés à l'annexe D.

Exemple: Alternateur modèle 1

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

ALTE MODELE 1p	
Preventive Replacement Cost	482.00
Failure Replacement Cost	952.00
Cheapest Preventive Replacement Age (KILOMETRES)	308000.00
Cost \$/KILOMETRES is then .....	.0034
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure .....	.0036
Saving \$/KILOMETRES .....	.0001
Preventive Replacements as Percent Of all Replacements.	35
Failure Replacements as Percent of all Replacements ...	65

Ratio du coût préventif et correctif

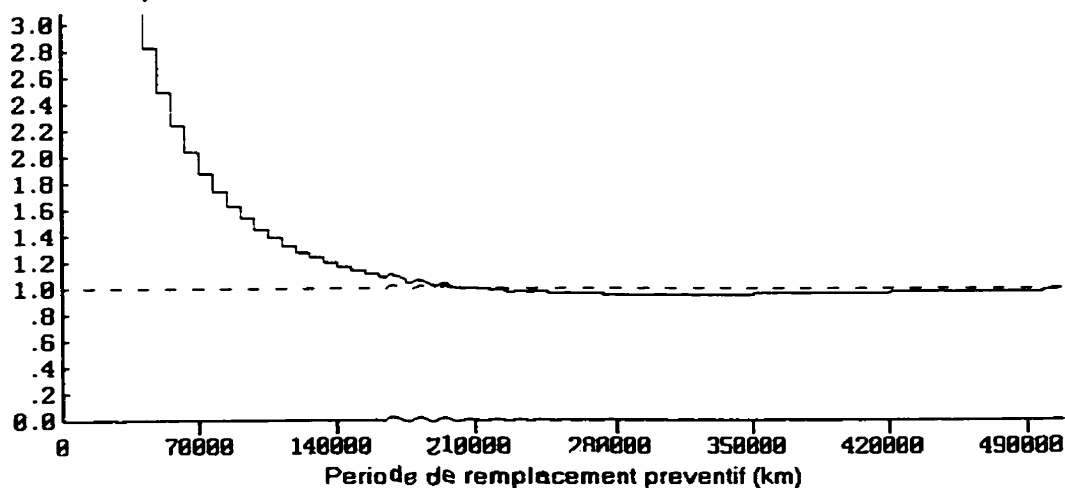


Figure 5.5 : Optimisation du coût

Dans certains cas, il est plus économique de remplacer au moment d'une défaillance. Il s'agit des cas où la valeur de β se situe près de l'unité et lorsque le ratio du coût préventif et du coût correctif est petit (inférieur à 1.5). Pour ces cas, on obtient ceci:

Exemple : Culasse du moteur 1

8- Culasse modèle 1

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

CULM 6V71 1P	
Preventive Replacement Cost	985.00
Failure Replacement Cost	1455.00
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure.....	.01
The Cheapest Policy is to Replace Only On Failure	

Les résultats sommaires sont présentés au tableau suivant:

Tableau 5.4: Période optimale de remplacement préventif

Composantes	Période actuelle	Seuil économique	Période optimale
Alternateur 1	Aucune	210 000 km	308 000 km
Compresseur 1	180 000 km	80 000 km	152 000 km
Compresseur 2	240 000 km	95 000 km	180 000 km
Culasse 2	Aucune	310 000 km	406 000 km
Démarrreur 1	300 000 km	110 000 km	225 000 km
Injecteur 1	Aucune	160 000 km	235 000 km
Injecteur 2	Aucune	215 000 km	325 000 km
Pompe à eau 1	240 000 km	130 000 km	192 000 km
Soufflante 1	Aucune	120 000 km	184 000 km
Soufflante 2	Aucune	648 000 km	648 000 km
Turbo-compresseur	Aucune	231 000 km	231 000 km

On obtient donc 11 modèles convergents pour lesquels une solution optimale du point vue économique a été générée par le logiciel RELCODE. Pour chacun d'eux, on observe le seuil économique, c'est à dire le kilométrage à partir duquel il est profitable d'appliquer la maintenance préventive du point de vue économique. On note cependant, quatre modèles qui avaient un échantillon insuffisant parmi ceux du tableau 5.4, soit la culasse modèle 2, les injecteurs modèle 2, la soufflante modèle 2 et le turbocompresseur.

5.5 Analyse des résultats

Les périodes de maintenance préventives ont été optimisées selon deux méthodes différentes, ce qui permet de les valider adéquatement.

Selon la méthode économique, on a pu remarquer que le ratio initial des coûts correctifs et préventif doit être supérieur à environ 1.5 sinon l'équation ne converge pas et on conclut que le remplacement sur défaillance est optimal. Cela indique tout simplement que le coût du remplacement préventif doit être largement inférieur à celui du correctif pour qu'il soit avantageux de remplacer avant une défaillance. D'après cette méthode, le seuil économique est rencontré au point d'intersection des courbes sur les graphiques d'optimisation (Annexe D). Un intervalle de maintenance supérieur à la valeur du seuil économique entraîne des économies alors qu'un intervalle inférieur représente des pertes. La période optimale peut être évaluée en repérant le point minimal de la courbe du coût.

On remarque une forte influence du modèle de fiabilité sur cette méthode. Ainsi, on obtient le même résultat (remplacement sur défaillance) lorsque la valeur de β est inférieure ou même légèrement supérieure à l'unité. Ce résultat est cependant conforme aux définitions des périodes de jeunesse et de défaillance aléatoire des modèles de fiabilité (section 3.2.4).

D'un autre côté, la méthode d'optimisation basée sur la fiabilité permet d'évaluer l'efficacité et de prévoir l'effet d'un resserrement de la limite de contrôle sur les unités. Les graphiques permettent de bien visualiser les accroissements de fiabilité réalisés par les différentes périodes de maintenance (Annexe C). Il faut cependant noter qu'il est impensable de resserrer la limite au delà d'un certain seuil car cela entraîne des coûts d'opérations exorbitants. C'est pourquoi cet exercice doit être accompagné des résultats de la méthode économique.

Finalement, nous avons assigné les périodes de maintenance afin qu'elles correspondent autant que possible à celles existantes. Cela dans le but de regrouper les périodes en vue d'établir une grille de maintenance. Les sections suivantes discutent des résultats obtenus avec les deux méthodes pour chacune des composantes

5.5.1 Composantes suivies

Dans le cas des composantes suivies, il n'existe pas de période de remplacement préventif définie. L'analyse consiste donc à interpréter les résultats et à déterminer si l'instauration d'une limite de contrôle serait profitable.

5.5.1.1 Alternateur 1

Tel qu'observé dans la figure C.1, le resserrement de la limite de contrôle produit une augmentation importante de la fiabilité. La méthode économique réitère ce fait en suggérant une période optimale de 308 000 km. On peut observer sur la figure D.1 que la courbe traverse l'ordonnée unitaire à environ 210 000 km. Il serait donc intéressant d'appliquer une limite de contrôle à 240 000 km, ce qui correspond à une fiabilité de 0.312. La valeur de 240 000 km permet de coordonner l'intervalle de maintenance avec d'autres composantes contrôlées ayant déjà cette limite. En contrepartie, il faut mentionner que le modèle de fiabilité a été évalué d'après un échantillon de seulement 31 éléments.

5.5.1.2 Alternateur 2

La valeur de β est près de l'unité, ce qui diminue l'accroissement en fiabilité obtenu en appliquant une limite de contrôle. Dû à ce fait, la méthode économique recommande un remplacement lors d'une défaillance. Encore une fois, l'échantillon est petit, ce qui nous oblige à émettre des mises en garde quant à la validité du modèle de fiabilité.

5.5.1.3 Alternateur 3

La valeur de β est tellement près de l'unité que l'accroissement en fiabilité est minime (figure C.3). L'échantillon servant à l'évaluation du modèle de fiabilité est de taille moyenne (79), ce qui valide le remplacement lors d'une défaillance pour cette composante.

5.5.1.4 Culasse 1

Dans ce cas, on observe un accroissement de la fiabilité avec le resserrement de la limite de contrôle (figure C.4). Par contre, le ratio des coûts correctif et préventif est près de 1.5 ce qui rend le remplacement préventif inefficace économiquement. De plus, l'échantillon était trop petit pour produire des résultats significatifs.

5.5.1.5 Culasse 2

L'accroissement de fiabilité est suffisant pour compenser le faible ratio des coûts correctif et préventif pour cette unité. La méthode économique recommande une limite de 406 000 km et l'intersection avec l'ordonnée unitaire se fait à environ 325 000 km. Comme l'échantillon ne compte que 9 éléments, il faut émettre des mises en garde quant à la validité du modèle de fiabilité.

5.5.1.6 Injecteurs 1

On note un accroissement important de la fiabilité (figure C.6). L'optimisation économique donne une période optimale de 235 000 km avec seuil économique de 150 000 km. On recommande donc l'application d'une limite à 240 000 km pour cette unité.

5.5.1.7 Injecteurs 2

L'accroissement de fiabilité est très significatif pour cette unité (figure C.7). On obtient une période de remplacement optimale de 329 000 km avec seuil économique de 210 000 km. Il faut cependant émettre des réserves à ce résultat puisque l'échantillon est petit (13).

5.5.1.8 Soufflante 1

Pour cette unité, un accroissement notable est observé (figure C.8). Une période optimale de 184 000 km avec un seuil de 120 000 km est calculée avec la méthode économique (figure D.5). On recommande donc une limite de contrôle à 180 000 km pour cette composante.

5.5.1.9 Soufflante 2

La taille de l'échantillon est insuffisante pour cette composante.

5.5.1.10 Transmission 1

La valeur de β étant très près de l'unité, on observe un léger accroissement de la fiabilité avec le resserrement de la limite. De plus, le ratio des coûts est largement inférieur à 1.5, ce qui valide le remplacement lors d'une défaillance.

5.5.1.11 Transmission 2

Encore une fois, on observe que le ratio des coûts est inférieur à 1.5, ce qui rend le remplacement préventif inutile pour cette unité.

5.5.1.12 Transmission 3

L'échantillon est insuffisant.

5.5.1.13 Turbo-compresseur

L'échantillon est insuffisant.

5.5.2 Unités contrôlées

Pour ce qui est des unités contrôlées, il existe déjà une limite de contrôle. Il s'agit donc d'évaluer celles-ci avec les mêmes méthodes d'analyse.

5.5.2.1 Boyaux du moteur 1 (limite : 240 000 km)

Dans ce cas, on observe une valeur de β inférieure à l'unité. Il semble donc que la limite de contrôle actuelle soit adéquate.

5.5.2.2 Boyaux du moteur 2 (limite : 240 000 km)

La valeur de β est près de l'unité. Il semble donc que la limite de contrôle actuelle soit adéquate.

5.5.2.3 Compresseur d'air 1 (limite : 180 000 km)

La figure C.16 démontre un accroissement de la fiabilité avec le resserrement de la limite. D'autre part, la méthode économique évalue une période optimale de 152 000 km. Il semble donc que la limite de contrôle actuelle ne soit pas assez étroite. On recommande donc un resserrement de la limite à 150 000 km.

5.5.2.4 Compresseur d'air 2 (limite 240 000 km)

Tel qu'observé dans la figure C.17, le resserrement de la limite de contrôle produit une augmentation importante de la fiabilité. La méthode économique suggère une période optimale de 180 000 km avec un seuil économique de 100 000 km. Il serait recommandé de resserrer la limite actuelle à 150 000 (comme le compresseur 1) ou 180 000 km.

5.5.2.5 Démarreur 1 (300 000 km)

L'accroissement de fiabilité est faible (figure C.18) et on remarque une fiabilité de 0.240 au moment du remplacement préventif. La méthode économique suggère un resserrement à 225 000 km. Il est recommandé d'abaisser la limite à 240 000 km comme sur l'autre modèle de démarreur.

5.5.2.6 Démarreur 2 (240 000 km)

Pour cette unité, la valeur de β est près de l'unité. Cela suggère que la limite de contrôle actuelle est adéquate.

5.5.2.7 Pompe à eau 1 (240 000 km)

L'accroissement de fiabilité est très élevé (figure C.20). De plus, la méthode économique évalue une période optimale de 92 000 km pour cette unité. Il serait recommandé d'abaisser la limite à 180 000 km.

5.5.2.8 Pompe à eau 2 (240 000 km)

Pour cette unité, l'accroissement en fiabilité est faible car la valeur de β se rapproche de l'unité (1.21). Cela indique que la limite actuelle est adéquate.

5.6 Recommandations

Suite à l'analyse de la section précédente, il est maintenant possible d'établir une grille de maintenance pour les composantes étudiées. Tel que vu auparavant, les composantes contrôlées ont actuellement des limites préventives. Nous avons donc, 6 composantes dont le remplacement se fait systématiquement à 240 000 km ainsi qu'une dont le remplacement se fait à 180 000 km et une autre dont le remplacement se fait à 300 000 km. Le but de la grille étant le plus possible de coordonner les activités de maintenance, il faut tenter de les regrouper autour de 240 000 km car il s'agit là de la période la plus commune. Les tableaux suivants illustrent nos recommandations pour chacune des composantes suivies et contrôlées :

Tableau 5.5 : Recommandations pour les composantes suivies

Composante	Période recommandée
Alternateur modèle 1	240 000 km
Alternateur modèle 2	Aucune
Alternateur modèle 3	Aucune
Culasse modèle 1	Aucune
Culasse modèle 2	*
Injecteurs modèle 1	240 000 km
Injecteurs modèle 2	*
Soufflante modèle 1	180 000 km
Soufflante modèle 2	*
Transmission modèle 1	Aucune
Transmission modèle 2	Aucune
Transmission modèle 3	*
Turbocompresseur	*

* Données insuffisantes

Tableau 5.6 : Recommandations pour les composantes contrôlées

Composante	Période recommandée
Boyaux du moteur modèle 1	240 000 km
Boyaux du moteur modèle 2	240 000 km
Compresseur d'air modèle 1	180 000 km
Compresseur d'air modèle 2	180 000 km
Démarrreur modèle 1	240 000 km
Démarrreur modèle 2	240 000 km
Pompe à eau modèle 1	180 000 km
Pompe à eau modèle 2	240 000 km

En résumé, sept composantes devraient être remplacées à une période de 240 000 km et quatre à la période de 180 000 km.

Chapitre 6 : Conclusion

La modélisation de la durée de vie des composantes mécaniques ainsi que l'optimisation des activités d'entretien sont des domaines qui prennent une importance grandissante dans le contexte économique actuel. Il est donc normal de voir les entreprises de tous les secteurs s'y intéresser. Ce projet est une tentative d'application des théories de fiabilité et de maintenabilité sur un échantillon de véhicules opérationnels. Certains problèmes reliés à cette application sont apparus durant l'analyse. On pense ici à la taille réduite de quelques échantillons et à certaines ambiguïtés quant à l'interprétation du remplacement préventif parmi les contremaîtres (section 4.1). Cela a eu un effet néfaste sur la modélisation de la durée de vie de certaines composantes.

L'étape de la modélisation est critique car les modèles sont ensuite utilisés dans les deux étapes de l'optimisation. Ainsi, un modèle erroné peut entraîner de mauvaises décisions au niveau de la gestion des périodes de remplacement préventif. C'est pourquoi nous avons omis de faire des recommandations dans les cas où l'échantillon était de trop petite taille. Il serait bon de reprendre la modélisation avec des échantillons plus importants.

Le projet a toutefois atteint son objectif pour les autres unités dont l'échantillon était suffisamment grand. La procédure étant établie, il sera maintenant rapide de l'appliquer sur d'autres échantillons afin de constamment évaluer la pertinence des limites de contrôle. Il serait aussi intéressant d'évaluer des échantillons recueillis pour les composantes suggérées dans la section 1.3 et, éventuellement, les ajouter au programme de maintenance préventive si cela s'avère nécessaire. Le tableau 6.1 présente un sommaire des recommandations issues de la modélisation et de l'optimisation:

Tableau 6.1 : Sommaire des recommandations

Composante	Limite actuelle	Limite recommandée
Alternateur 1	Aucune	240 000 km
Alternateur 2	Aucune	Aucune
Alternateur 3	Aucune	Aucune
Boyaux du moteur 1	240 000 km	240 000 km
Boyaux du moteur 2	240 000 km	240 000 km
Compresseur d'air 1	180 000 km	180 000 km
Compresseur d'air 2	240 000 km	180 000 km
Démarrreur 1	300 000 km	240 000 km
Démarrreur 2	240 000 km	240 000 km
Injecteurs 1	Aucune	240 000 km
Pompe à eau 1	240 000 km	180 000 km
Pompe à eau 2	240 000 km	240 000 km
Soufflante 1	Aucune	180 000 km
Transmission 1	Aucune	Aucune
Transmission 2	Aucune	Aucune

On obtient donc deux périodes de remplacement distinctes sur le groupe motopropulseur à 180 000 km et à 240 000 km. Ce regroupement est un avantage puisque l'on réduit alors les coûts d'immobilisation des véhicules.

Les principales améliorations à apporter afin de réduire le plus possible la marge d'erreur seraient d'uniformiser les codes de défaillance dans la banque de données et de donner une meilleure formation aux employés qui l'utilisent. Cela aurait pour effet d'augmenter la qualité des informations et par conséquent la validité des modèles générés à partir de cette dernière.

Finalement, ce projet a rempli son objectif en permettant d'établir une procédure efficace visant à déterminer des périodes de remplacement préventif optimales des points de vue de la fiabilité et du coût tout en évaluant la pertinence des périodes existantes.

Références

- [1] ANG, JEFF Y., HASTINGS, N.A.J., Model Accuracy and goodness of fit for the Weibull distribution with suspended items, *Microelectronic Reliability journal*, vol.34, no. 7, pp. 1177-1184, Elsevier Science Ltd , c1994
- [2] BARNETT V. LEWIS T., *Outliers in statistical data*, John Wiley & Sons, Toronto, c1978, p365.
- [3] D'AGOSTINO, RALPH B., STEPHENS, MICHAEL A., *Goodness-of-fit techniques*, Marcel Dekker Inc., NewYork, c1986
- [4] DETROIT DIESEL, *Manuel d'entretien série 92*, Sections 1-15.
- [5] DHILLON, B.S., *Mechanical Reliability : Theory, models and applications*, AIAA Inc., Washington, c1988, chap 8, p 133-155
- [6] HARDY, SYLVAIN, *Établissement du coût moyen généralisé d'un signalement de service*, STCUM, Décembre 1996.
- [7] HASTINGS, N.A.J., RELCODE, *Reliability and replacement analysis software, Techniques and applications*, Albany Interactive Pty. Ltd. c1994
- [8] KECECIOGLU D., *Maintainability, Availability, and Operational Readiness Engineering Handbook*. Prentice-Hall Inc., Toronto, c1995.
- [9] KLIM, ZDZISLAW, *Fiabilité et maintenabilité des systèmes mécaniques*, Notes du cours MEC 6311, Chapitre 6, École Polytechnique de Montréal, c1995, pp 167-180
- [10] MCI CLASSIC, *Manuel d'entretien, Modèles TC40102N, TC40102A*, Sections 1-26.
- [11] NASH, FREDERICK, C., *Technologie automobile, 2ième édition*, McGraw-Hill Éditeurs, Montréal, c1986, 730 pages
- [12] NELSON, WAYNE, *Applied Life data analysis*, John Wiley and sons, Toronto, p313
- [13] USHAKOV, IGOR A., HARRISON , ROBERT A., *Handbook of reliability engineering*, John Wiley & Sons, Inc. , Toronto, c1994

Annexe A : Modèles de fiabilité

Annexe A : Modèles de fiabilité

A.1 Unités suivies

A.1.1 Alternateur modèle 1

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 323.7$$

$$\beta = 2.07$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \quad \text{km}$$

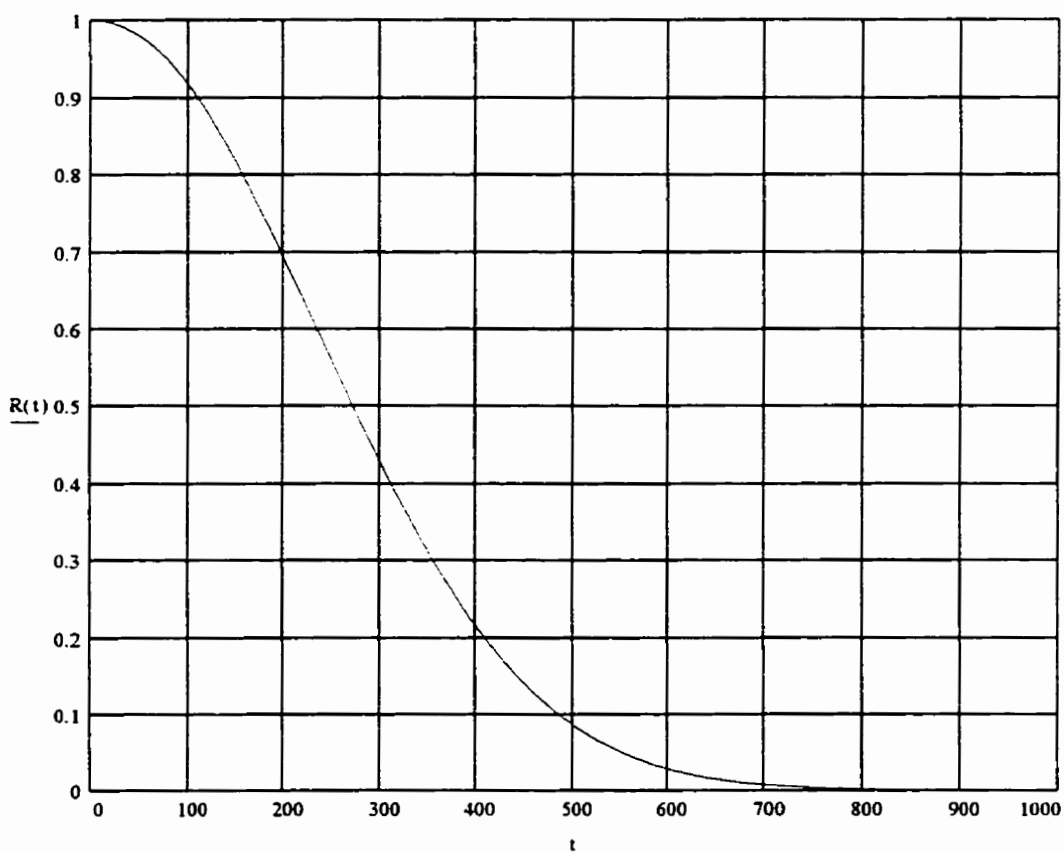


Figure A.1: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \quad \text{km}$$

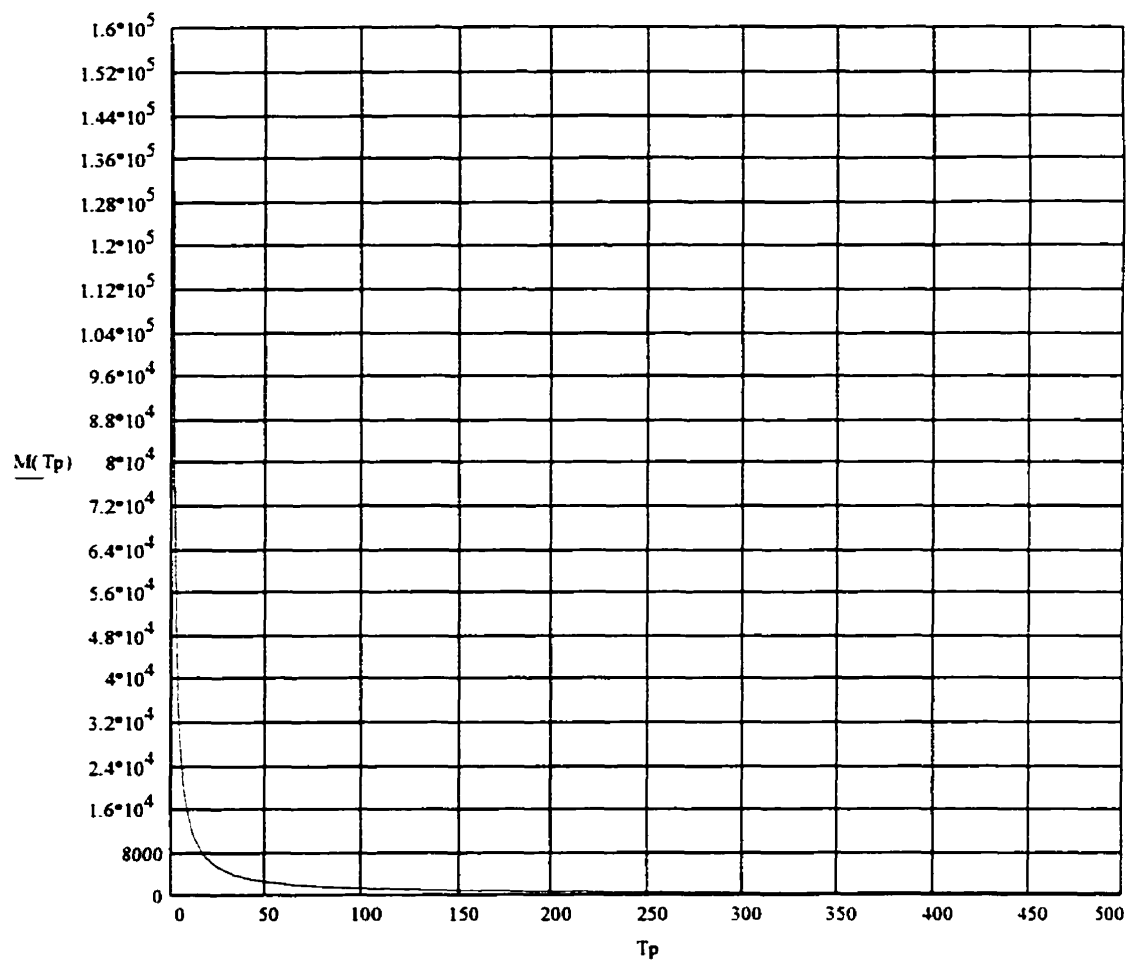


Figure A.2: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.2 Alternateur modèle 2

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 372$$

$$\beta = 1.27$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

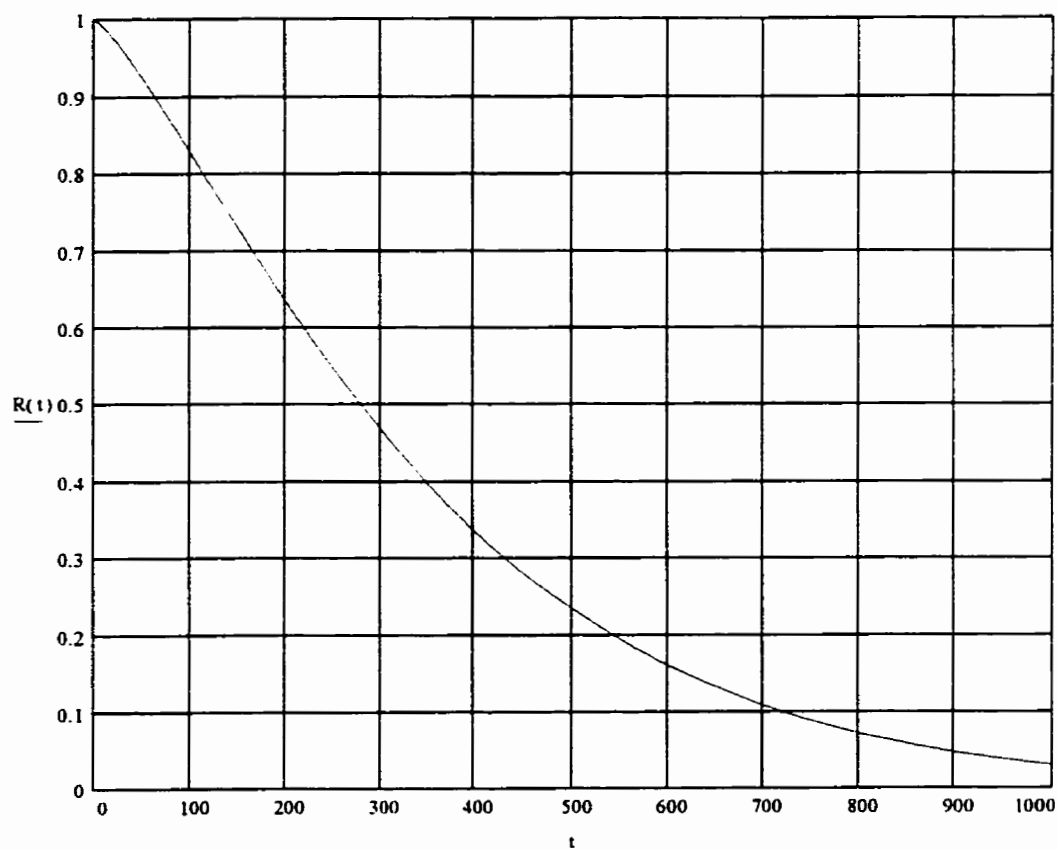


Figure A.3: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \text{ temps} \times 1000 \text{ km}$$

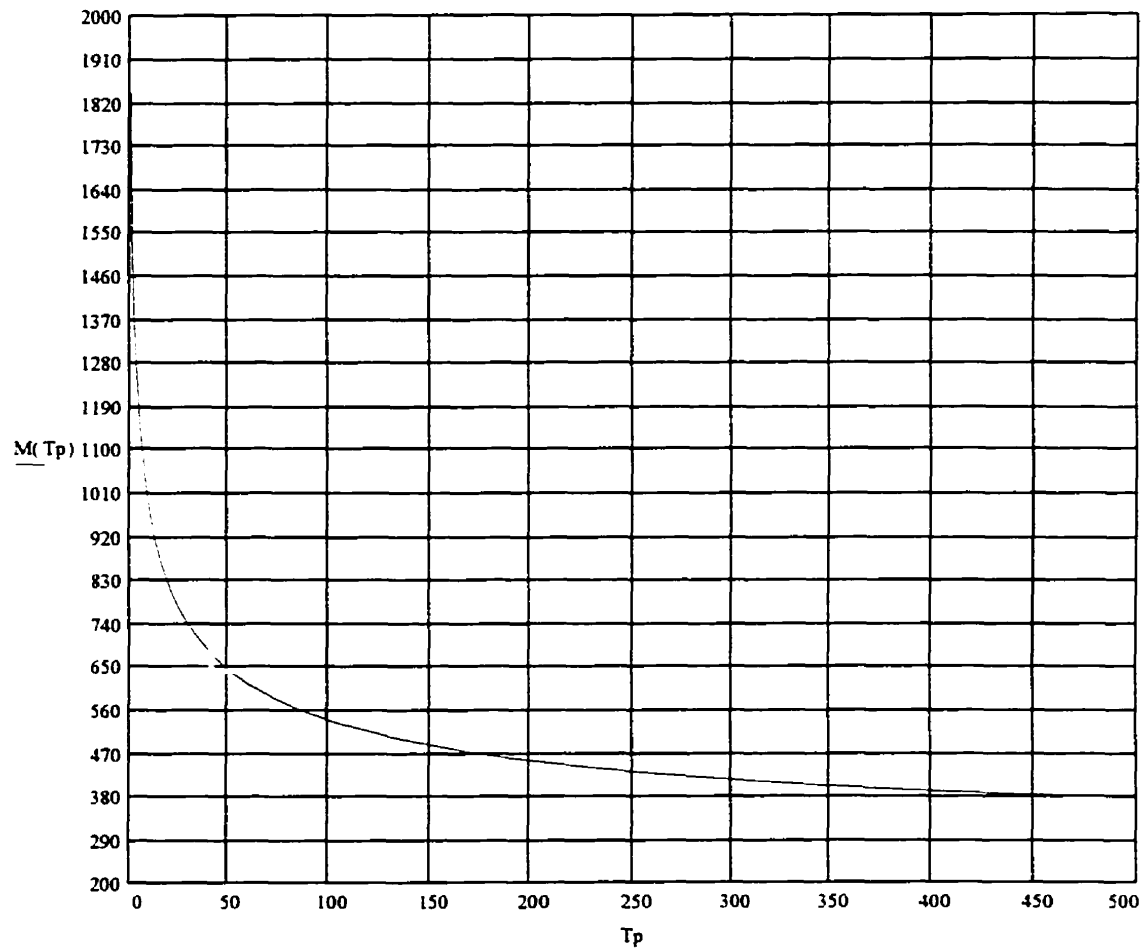


Figure A.4: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.3 Alternateur modèle 3

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 175.9$$

$$\beta = 1.18$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

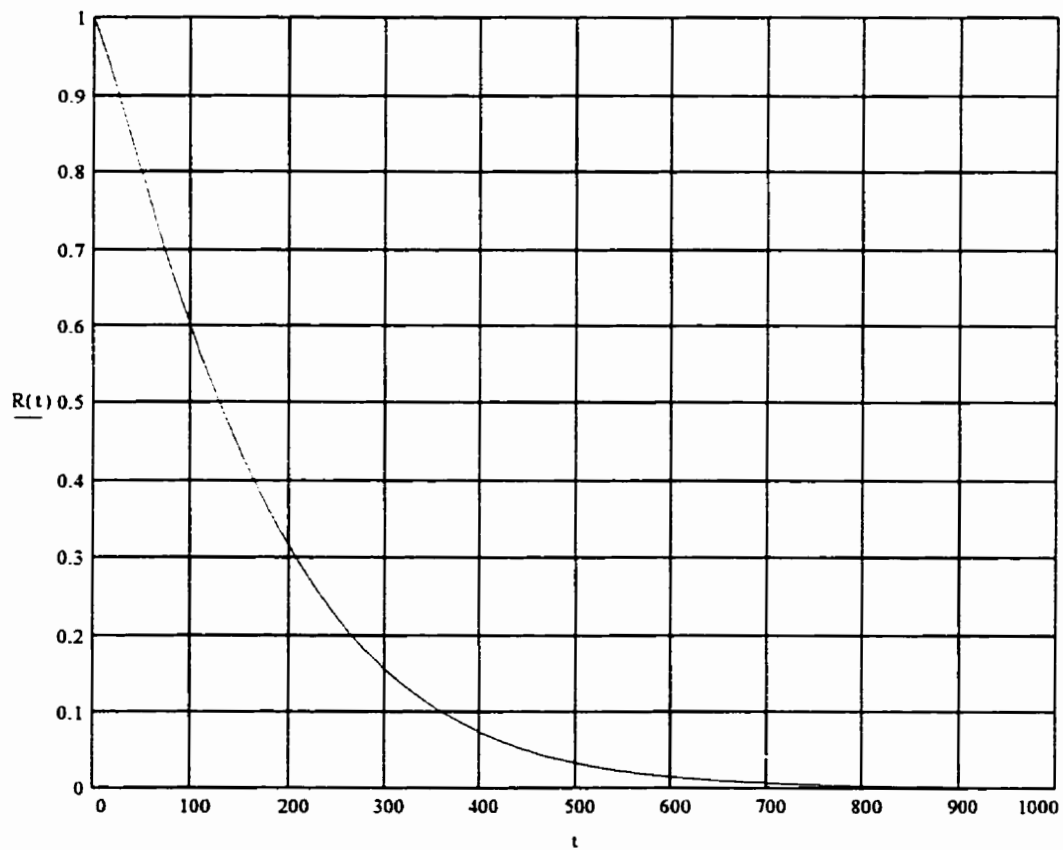


Figure A.5: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p \approx 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \quad \text{km}$$

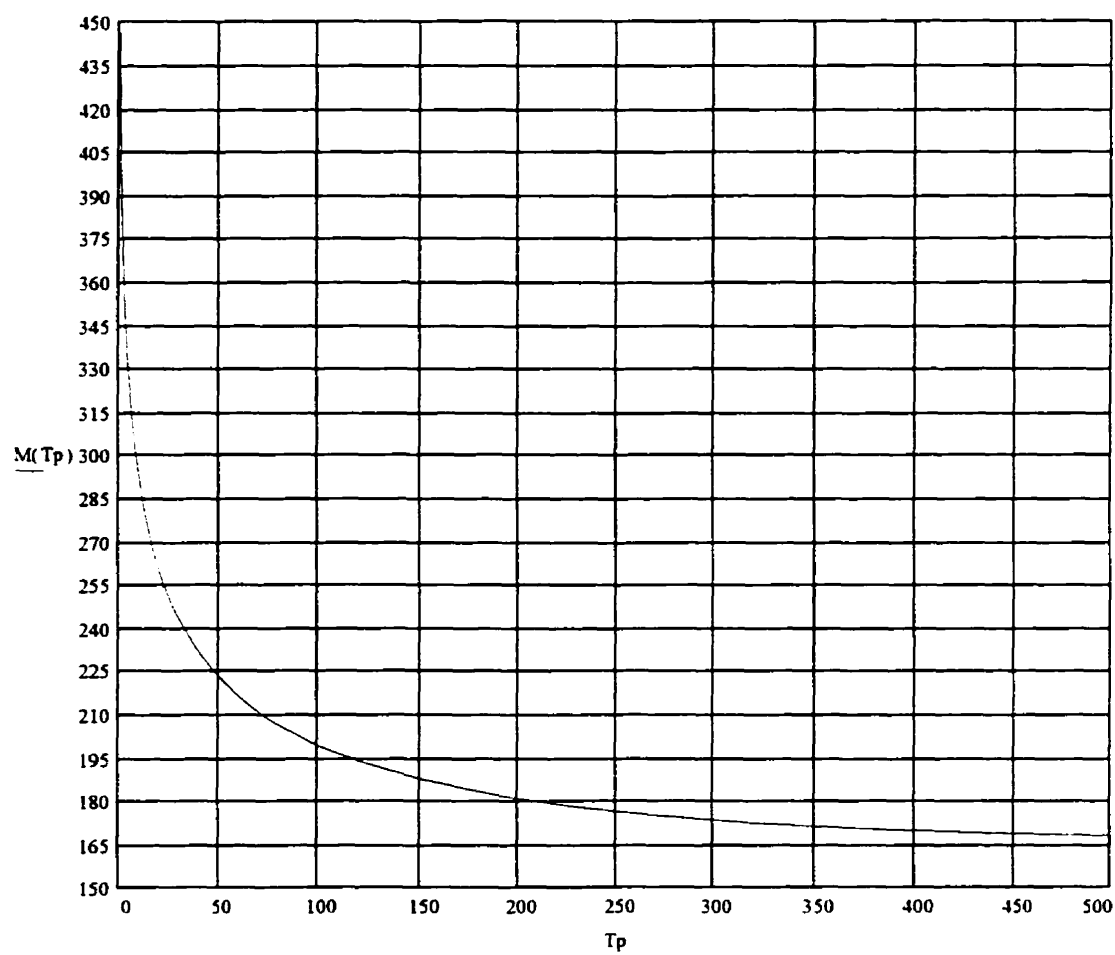


Figure A.6: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.4 Culasse modèle 1

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 306.6$$

$$\beta = 1.78$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \quad \text{km}$$

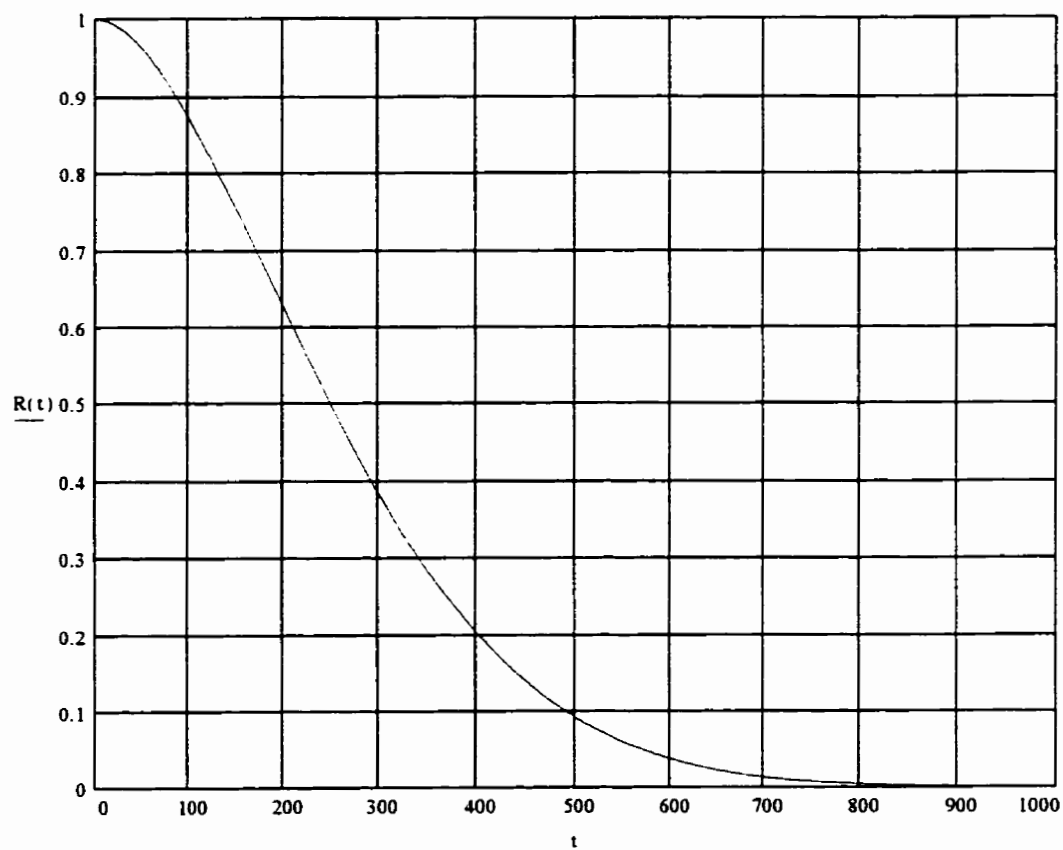


Figure A.7: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \quad \text{km}$$

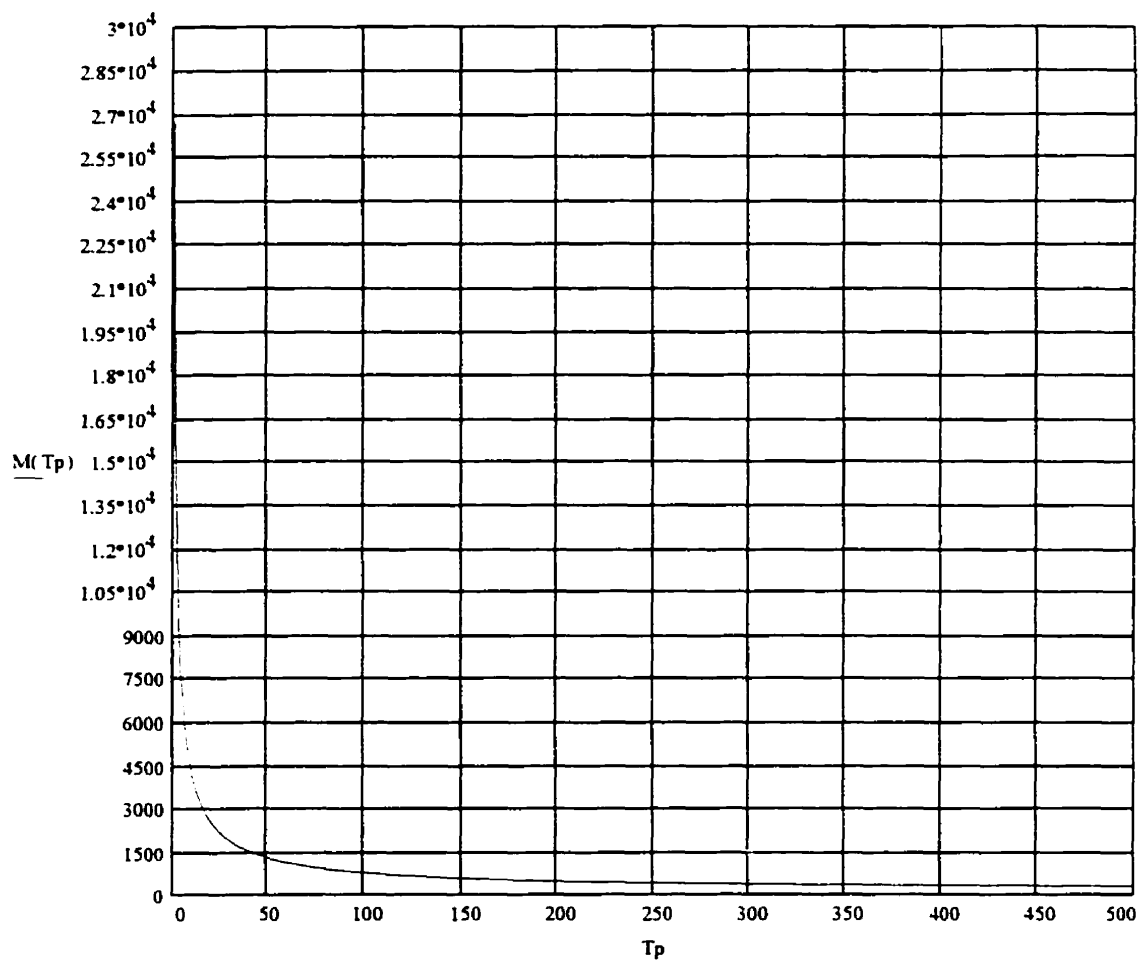


Figure A.8: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.5 Culasse modèle 2

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 319.7$$

$$\beta = 2.43$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

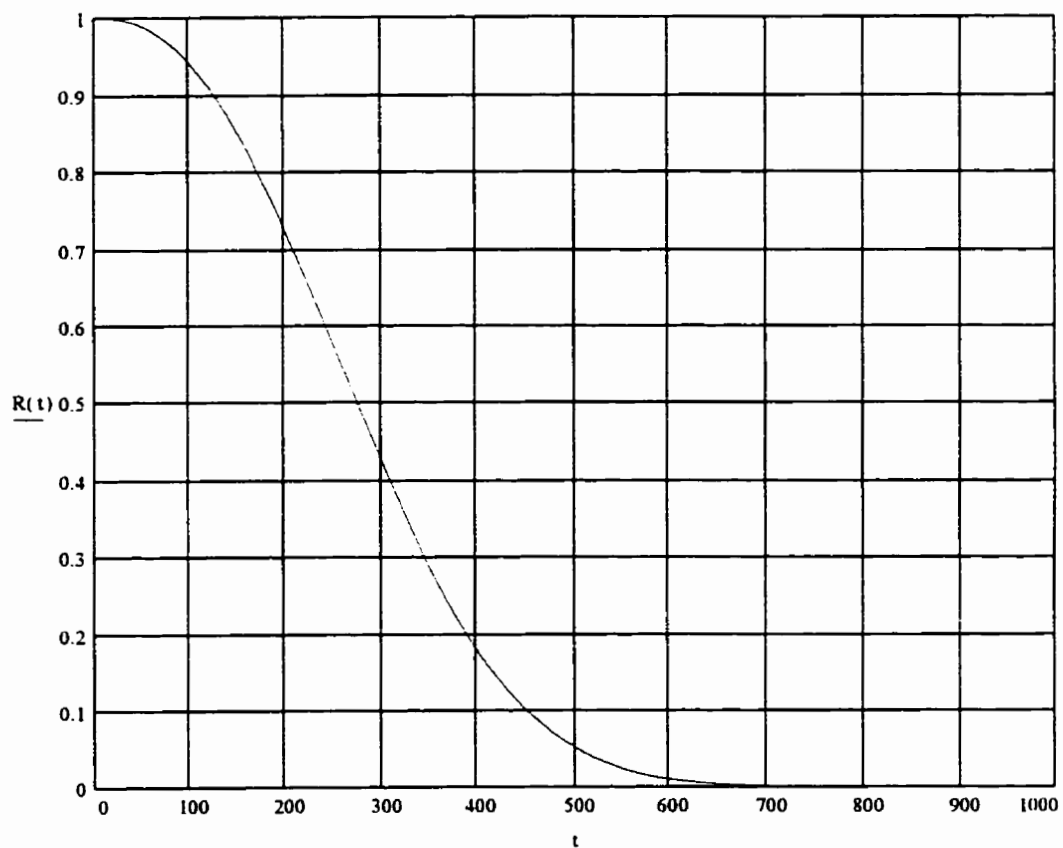


Figure A.9: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

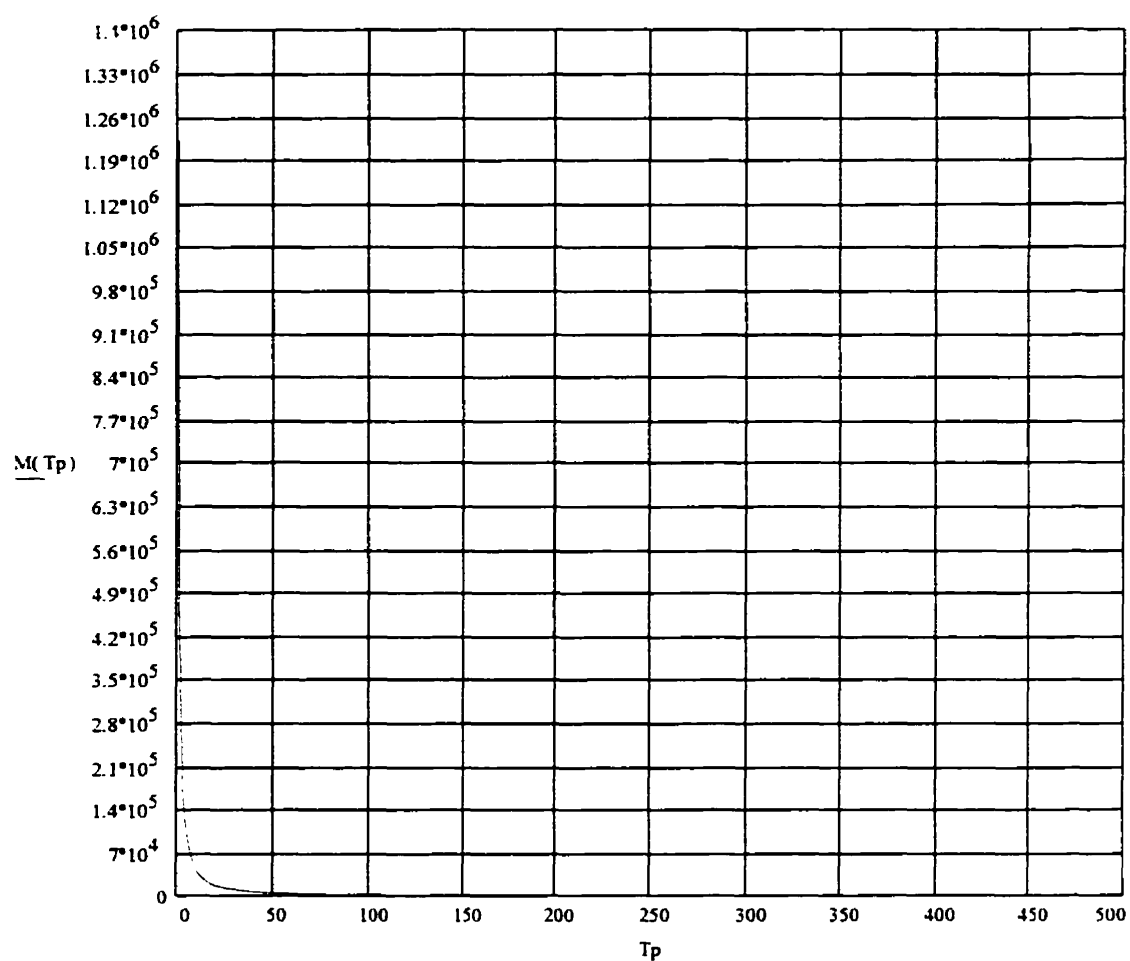


Figure A.10: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.6 Injecteur modèle 1

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 255.6$$

$$\beta = 1.77$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

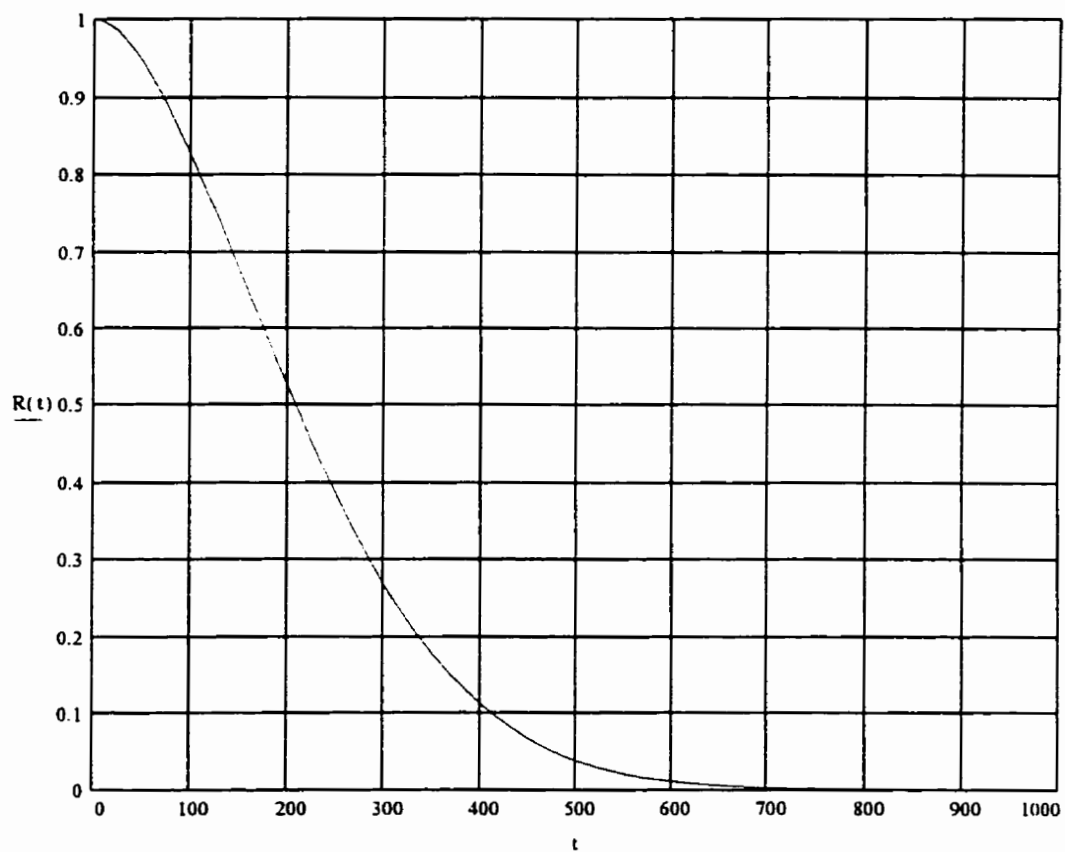


Figure A.11: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \quad \text{km}$$

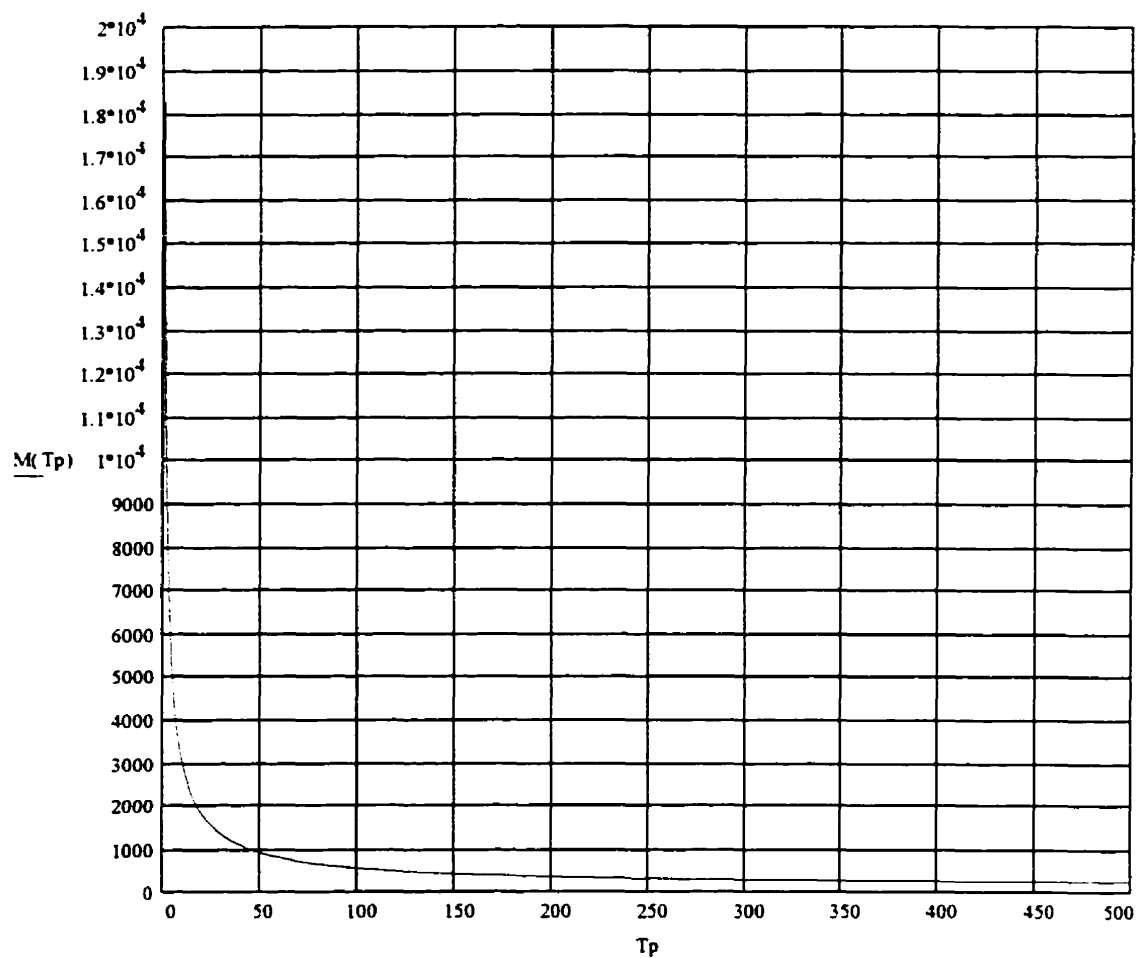


Figure A.12: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.7 Injecteur modèle 2

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 305.7$$

$$\beta = 2.33$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \quad \text{km}$$

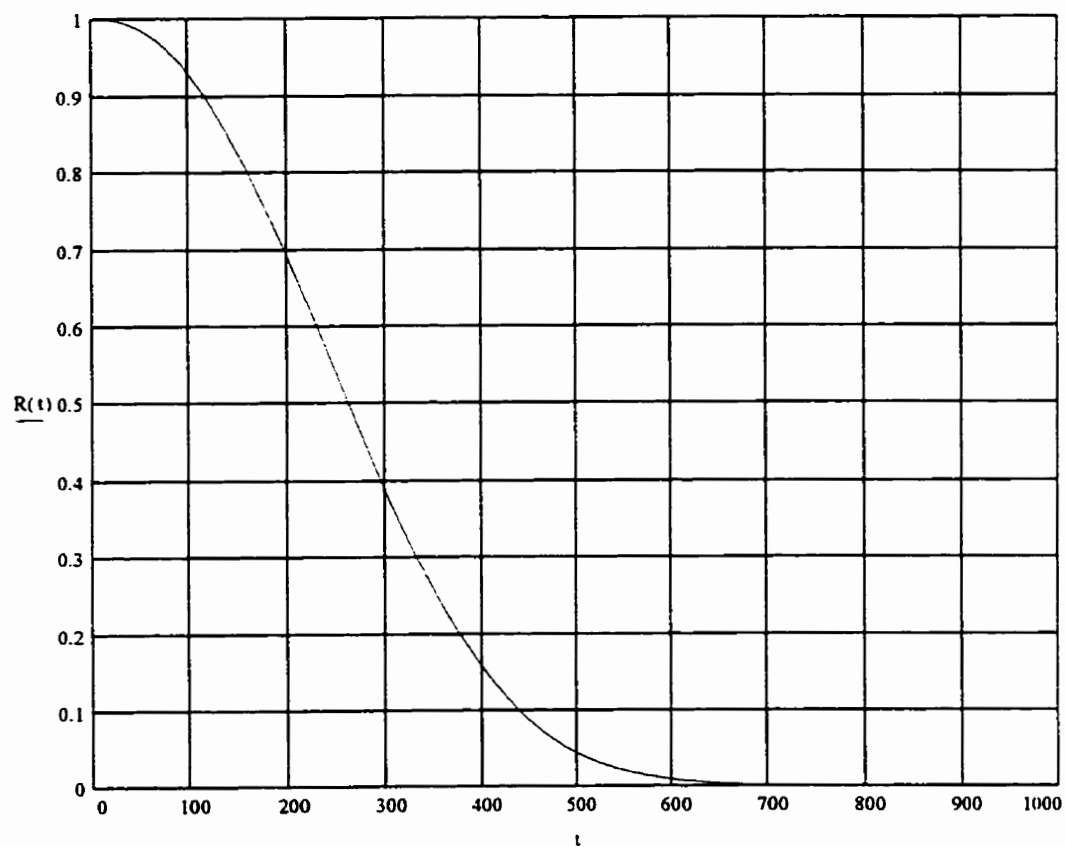


Figure A.13: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \quad \text{km}$$

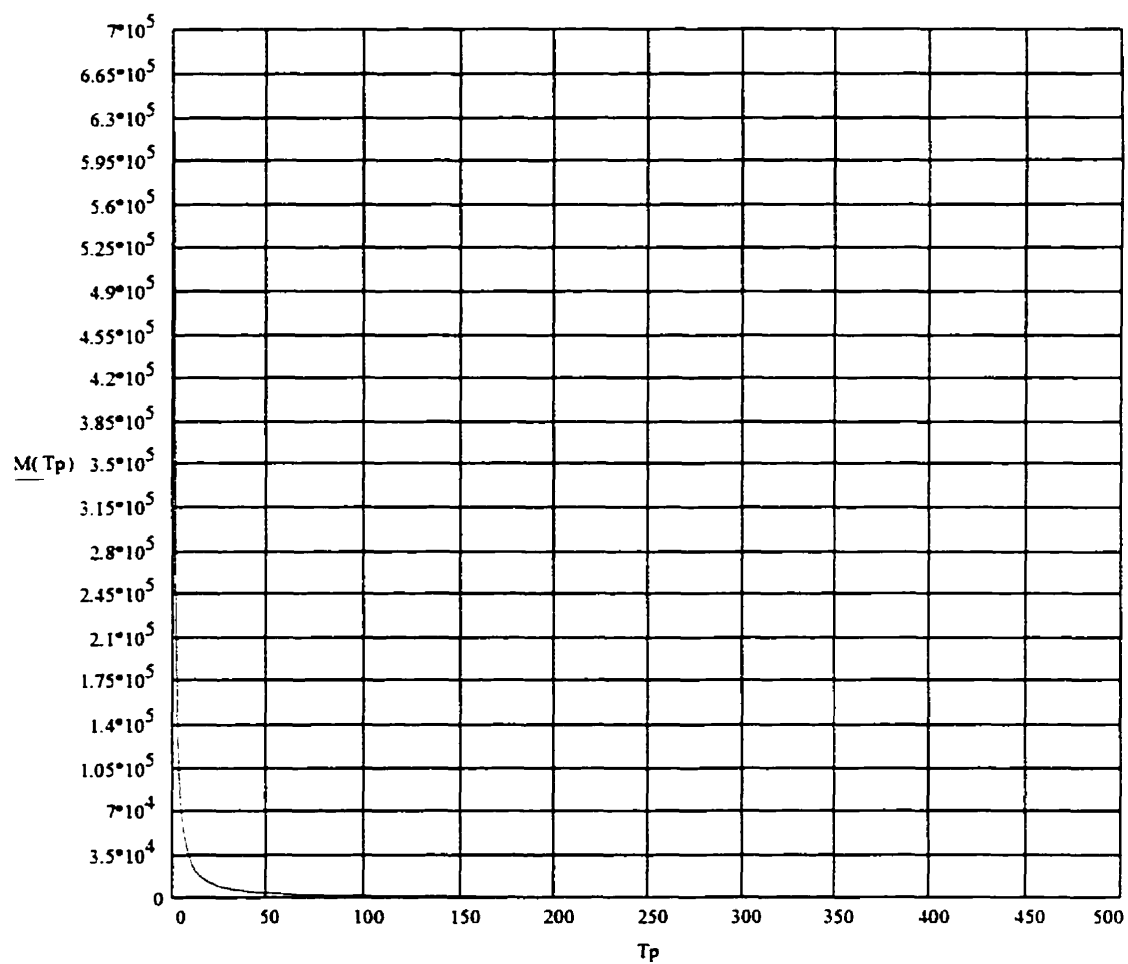


Figure A.14: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.8 Soufflante modèle 1

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 195.3$$

$$\beta = 2.23$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \quad \text{km}$$

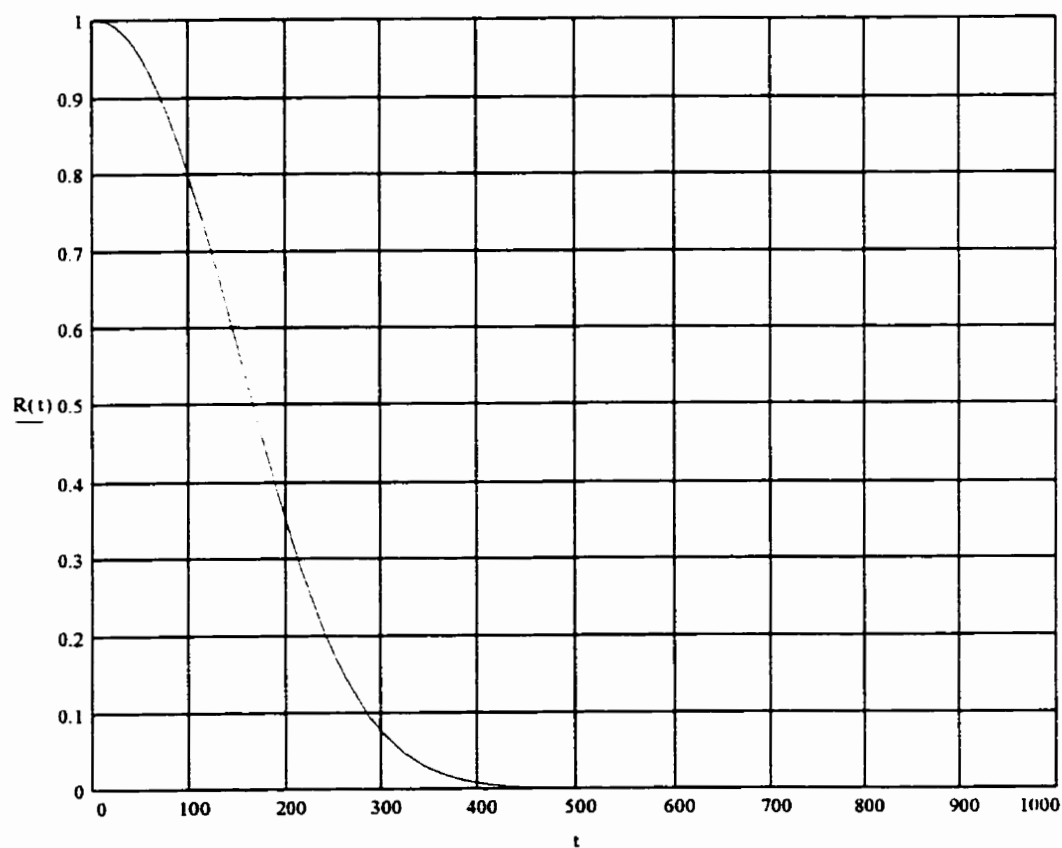


Figure A.15: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

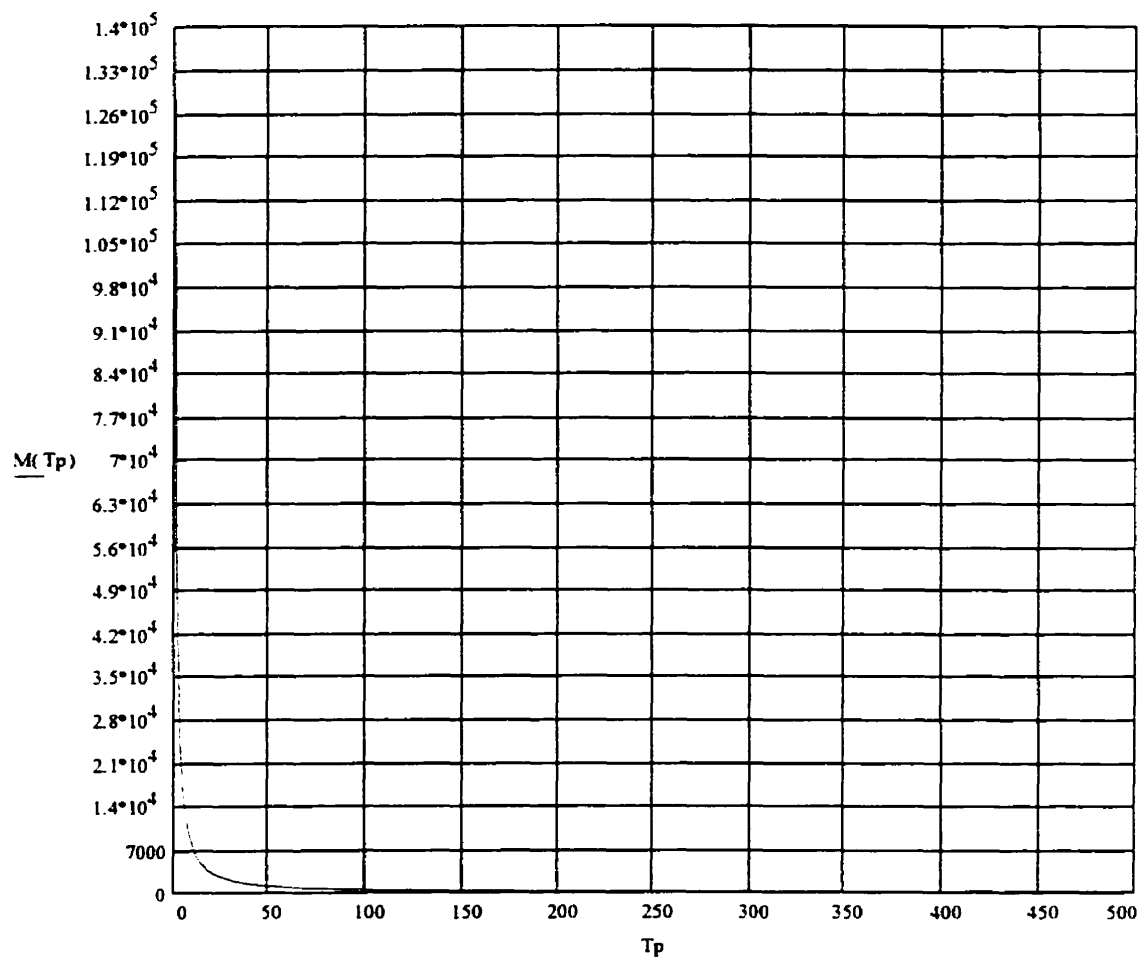


Figure A.16: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.9 Soufflante modèle 2

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 423.2$$

$$\beta = 1.56$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

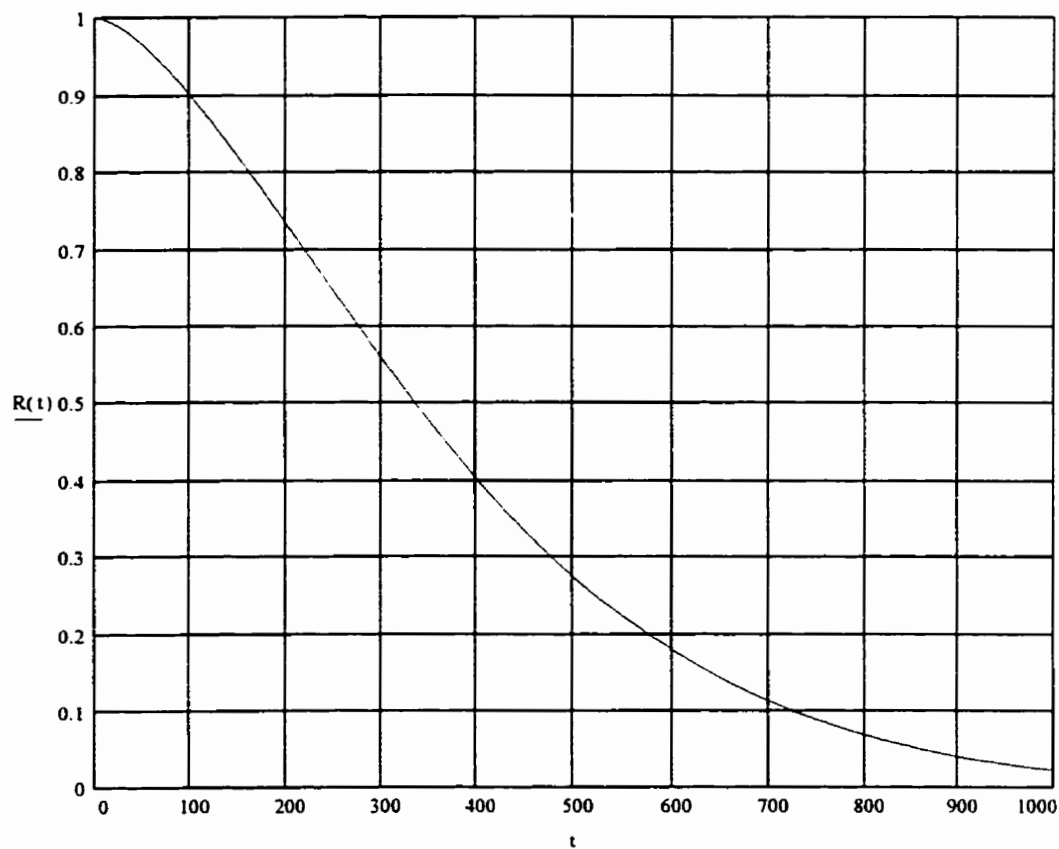


Figure A.17: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

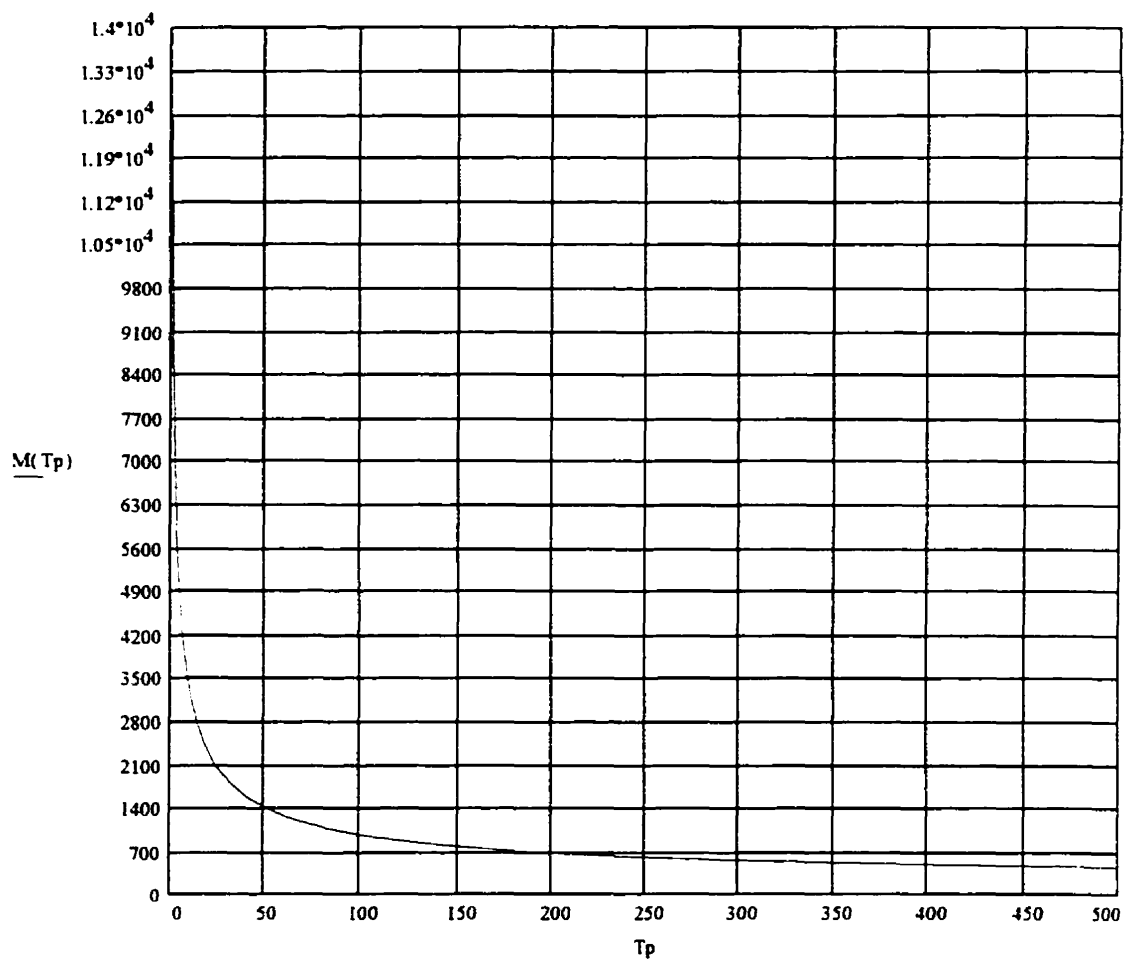


Figure A.18: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.10 Transmission modèle 1

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 315.2$$

$$\beta = 1.14$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \quad \text{km}$$

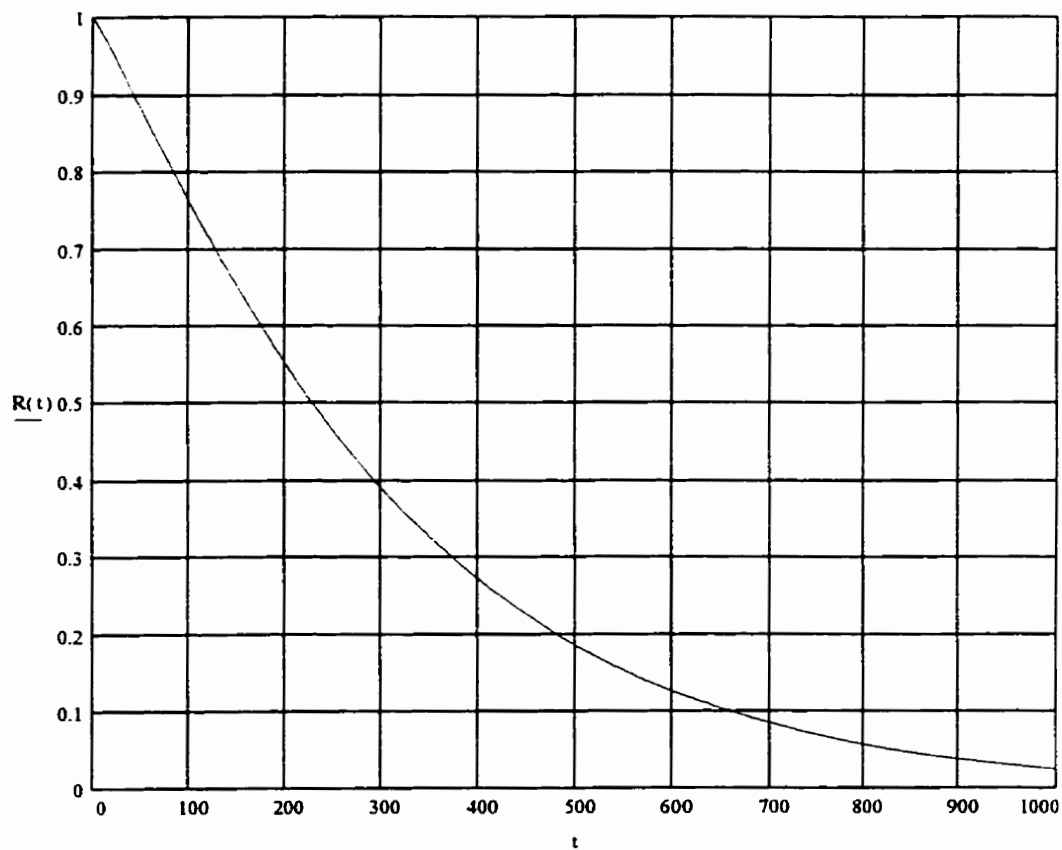


Figure A.19: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

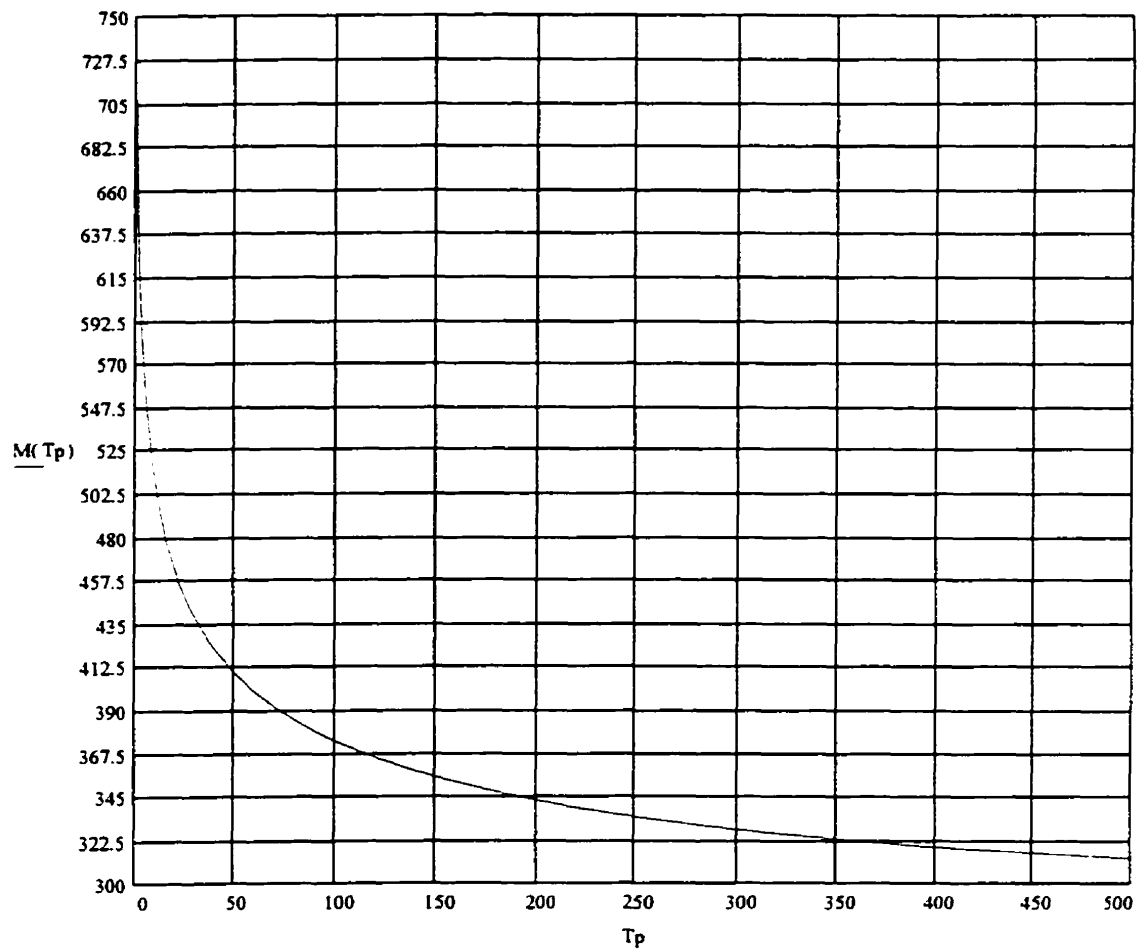


Figure A.20: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.11 Transmission modèle 2

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 347.6$$

$$\beta = 1.55$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

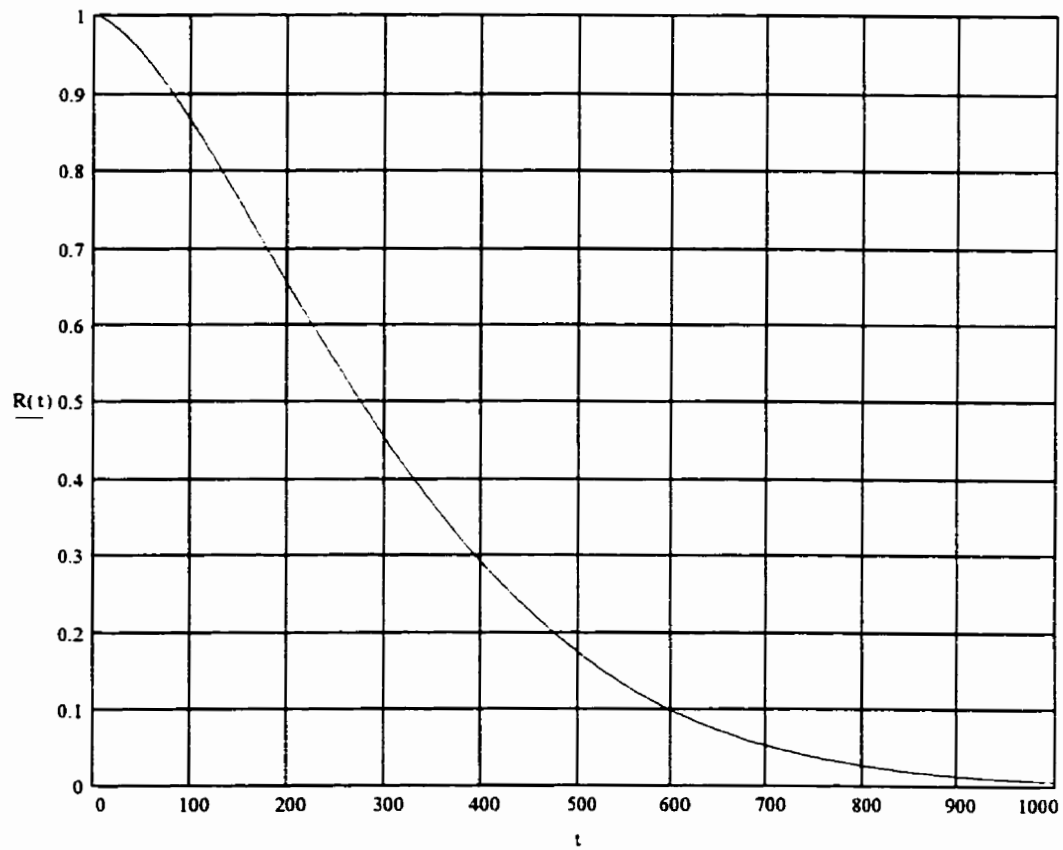


Figure A.21: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \text{ temps} \times 1000 \text{ km}$$

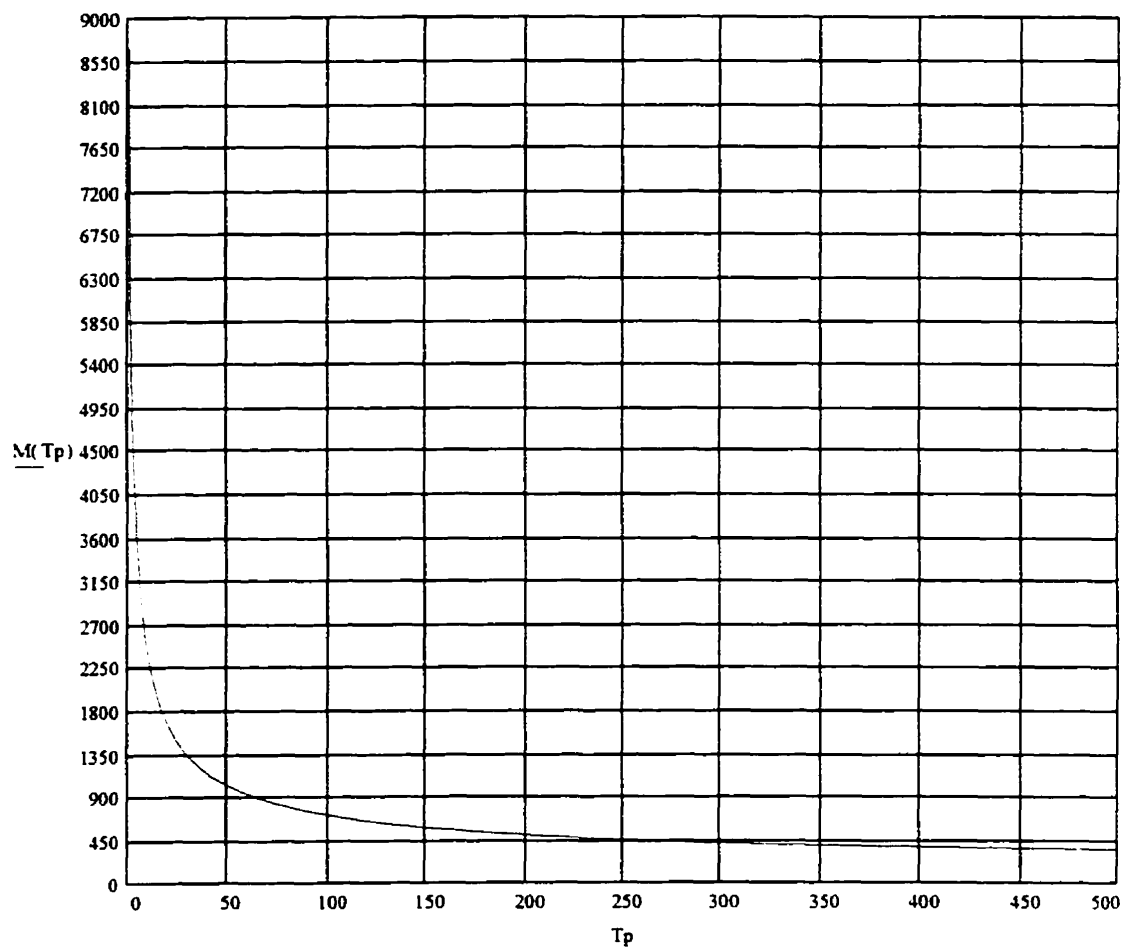


Figure A.22: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.12 Transmission modèle 3

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 182.7$$

$$\beta = 1.34$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

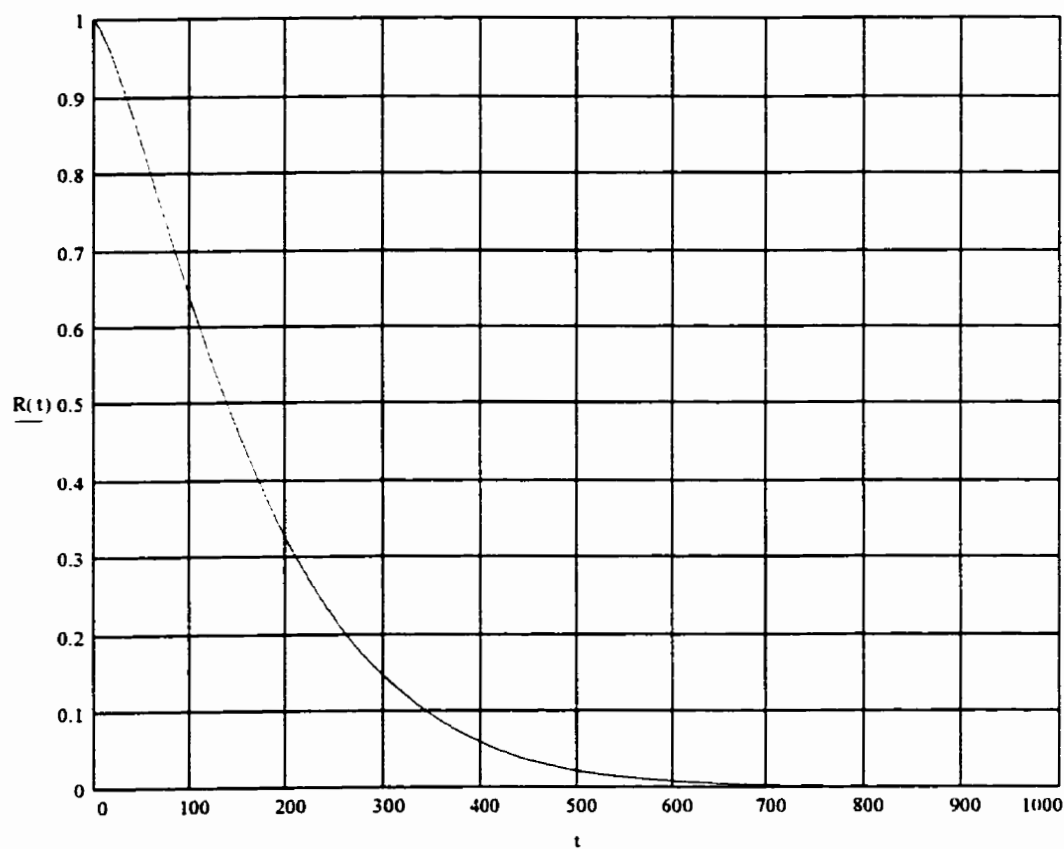


Figure A.23: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

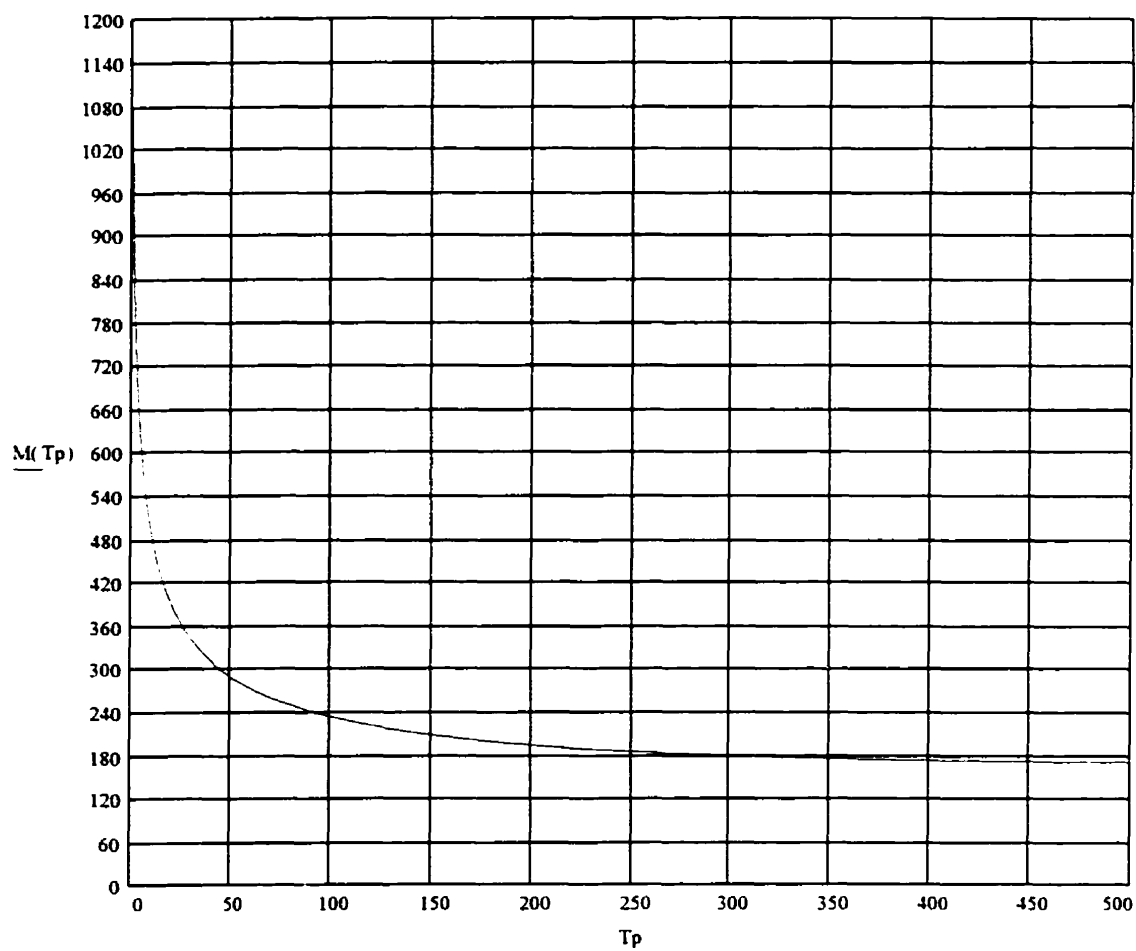


Figure A.24: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.1.13 Turbo-compresseur modèle 1

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 304.5$$

$$\beta = 2.22$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1..1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

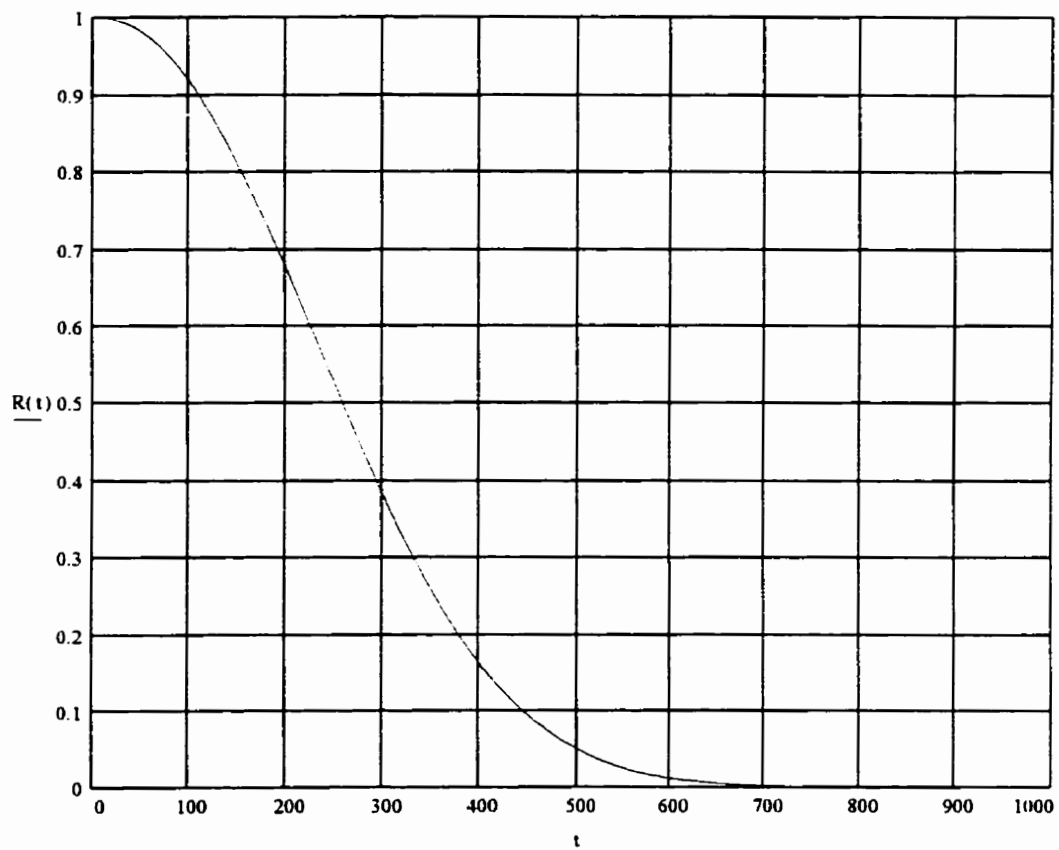


Figure A.25: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

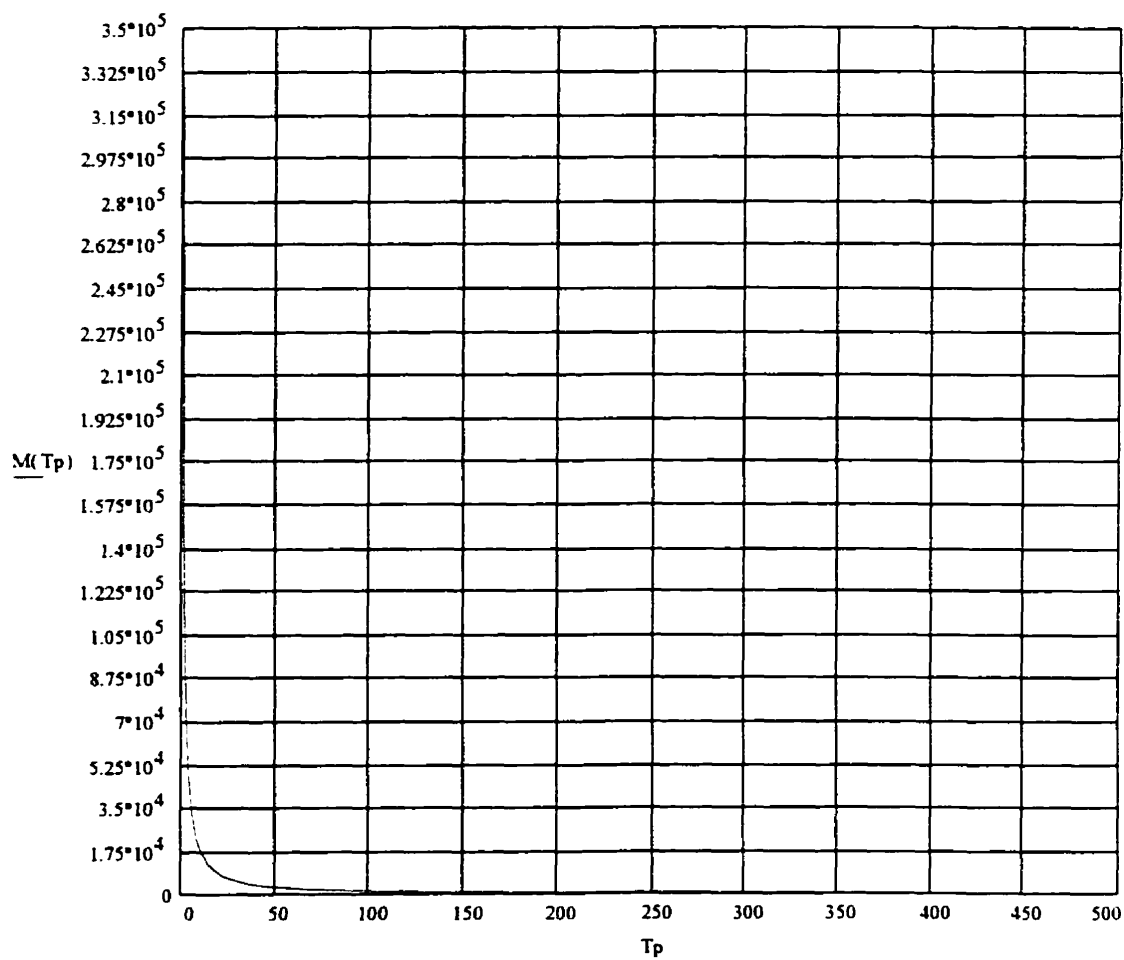


Figure A.26: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.2 Unités contrôlées

A.2.1 Boyaux du moteur modèle 1

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 617.4$$

$$\beta = 0.75$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1..1000 \text{ temps} \times 1000 \text{ km}$$

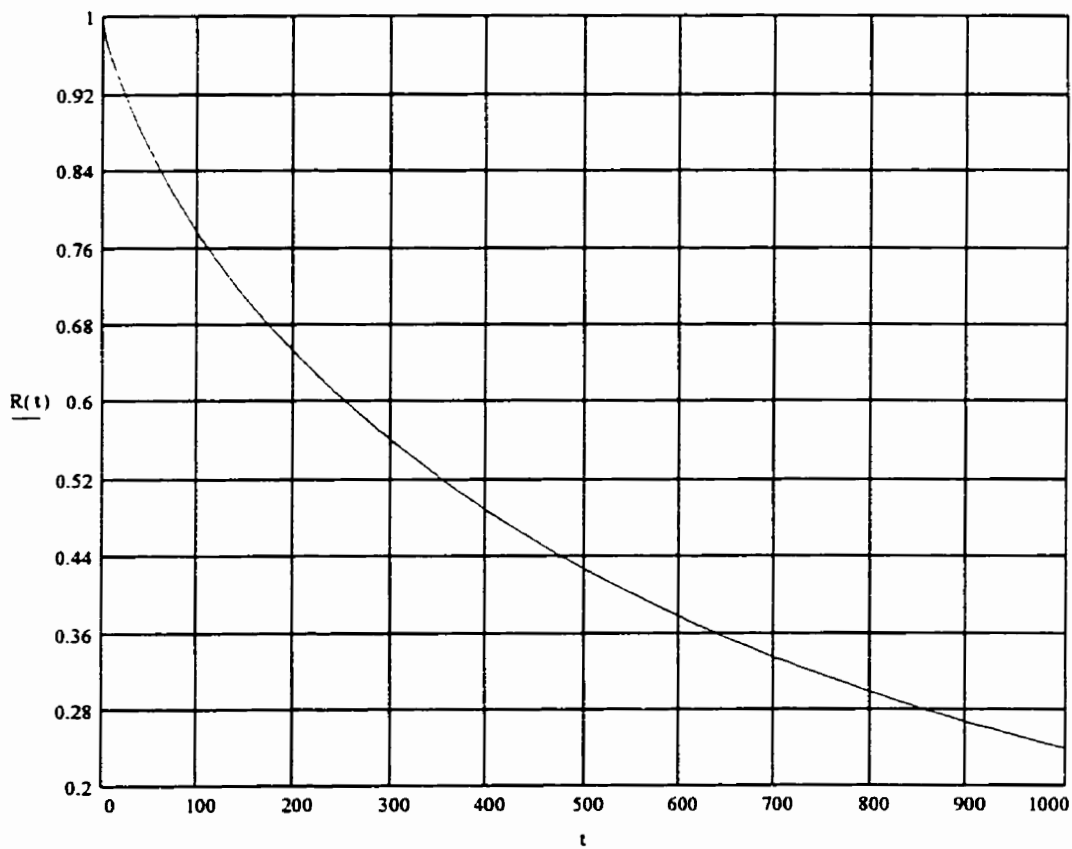


Figure A.27: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

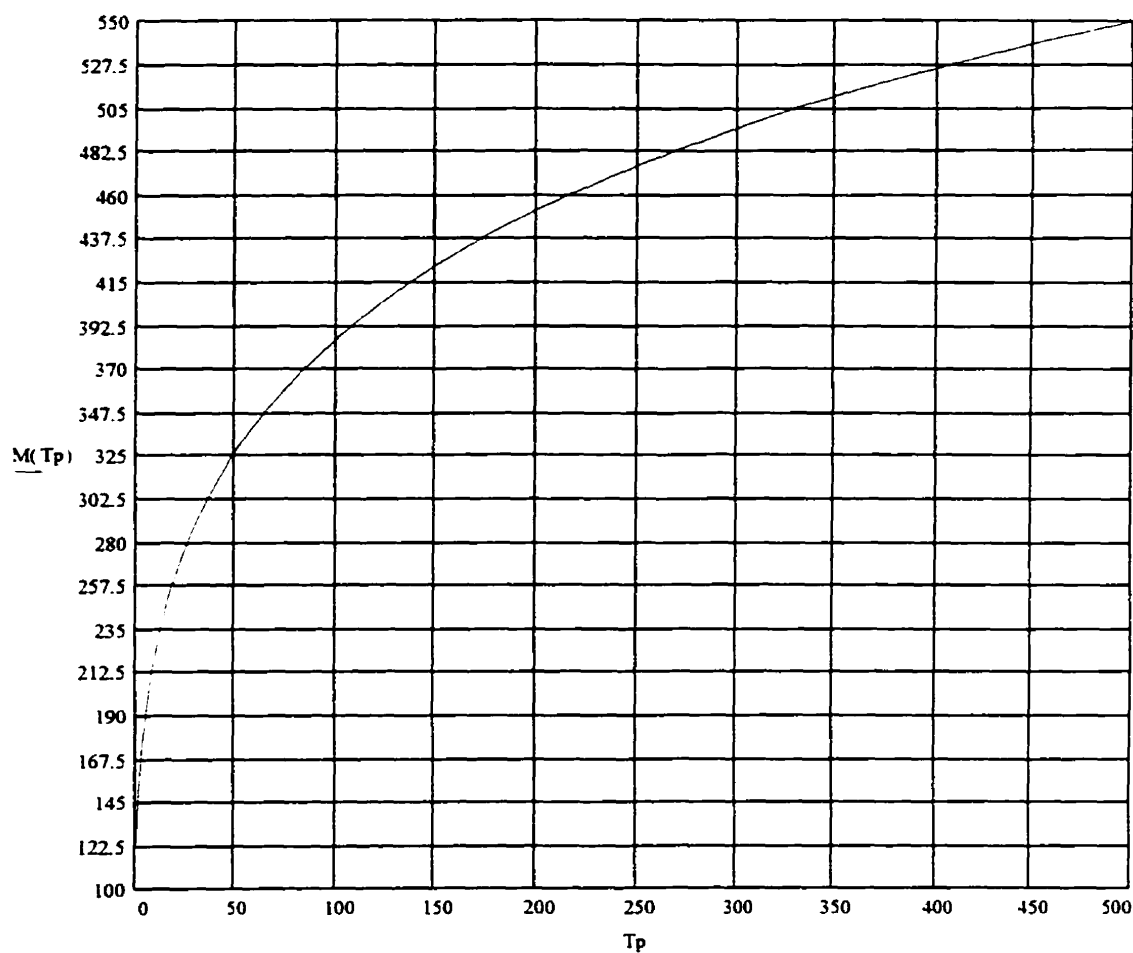


Figure A.28: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.2.2 Boyaux du moteur modèle 2

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 954$$

$$\beta = 1.14$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

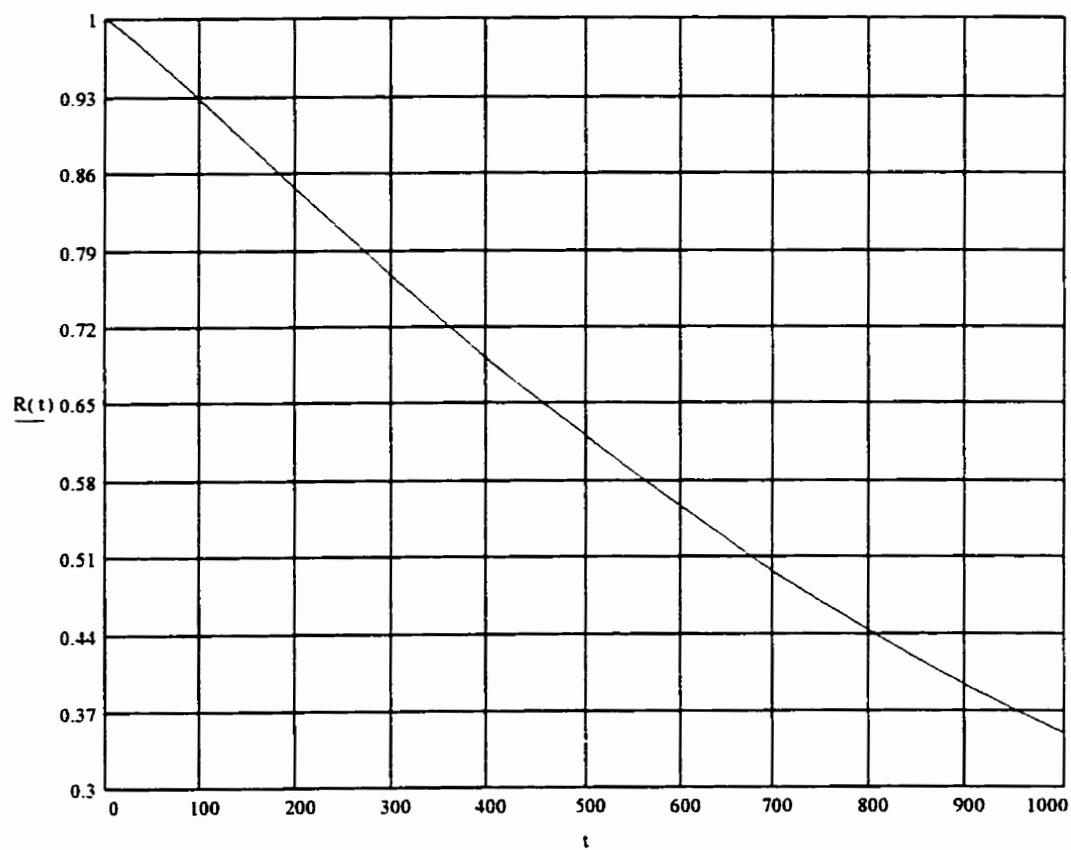


Figure A.29: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \quad \text{km}$$

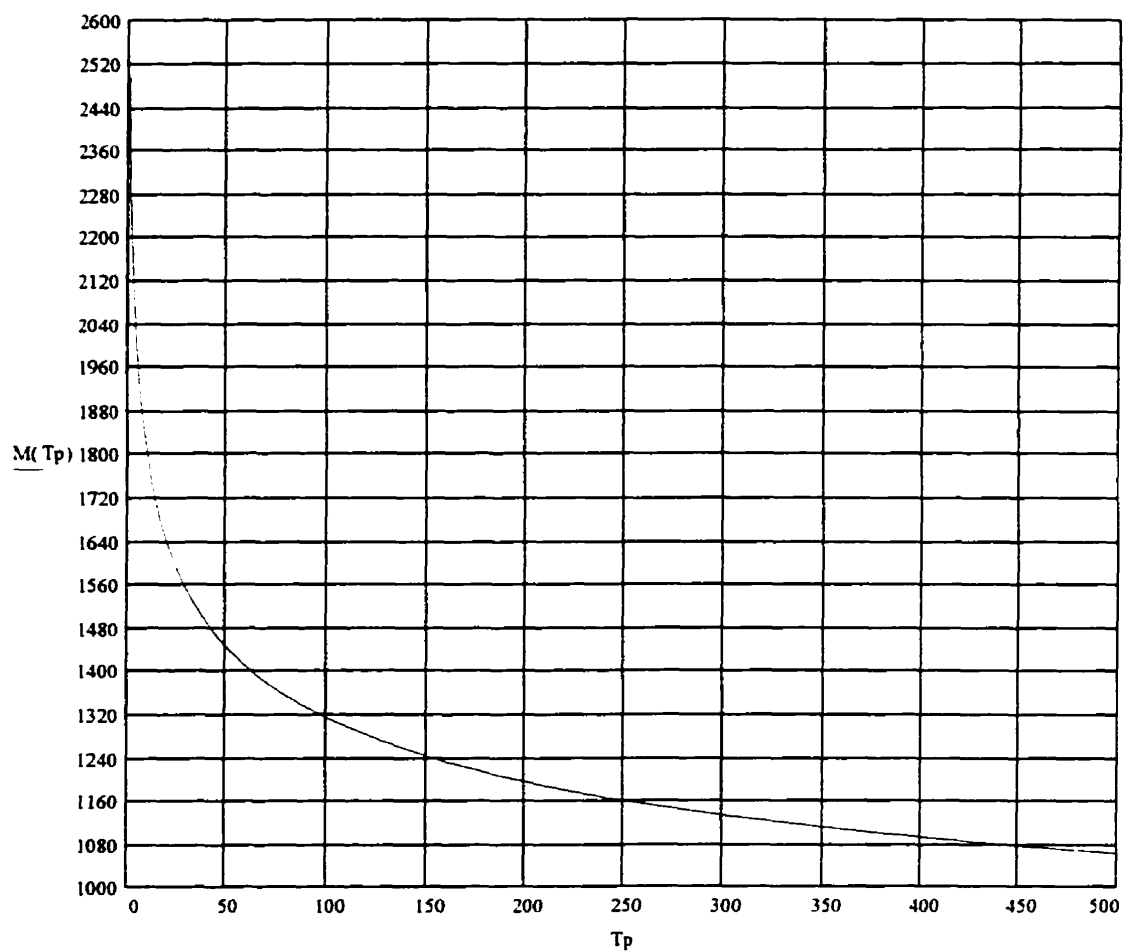


Figure A.30: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.2.3 Compresseur d'air modèle 1

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 154.6$$

$$\beta = 1.44$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \text{ temps} \times 1000 \text{ km}$$

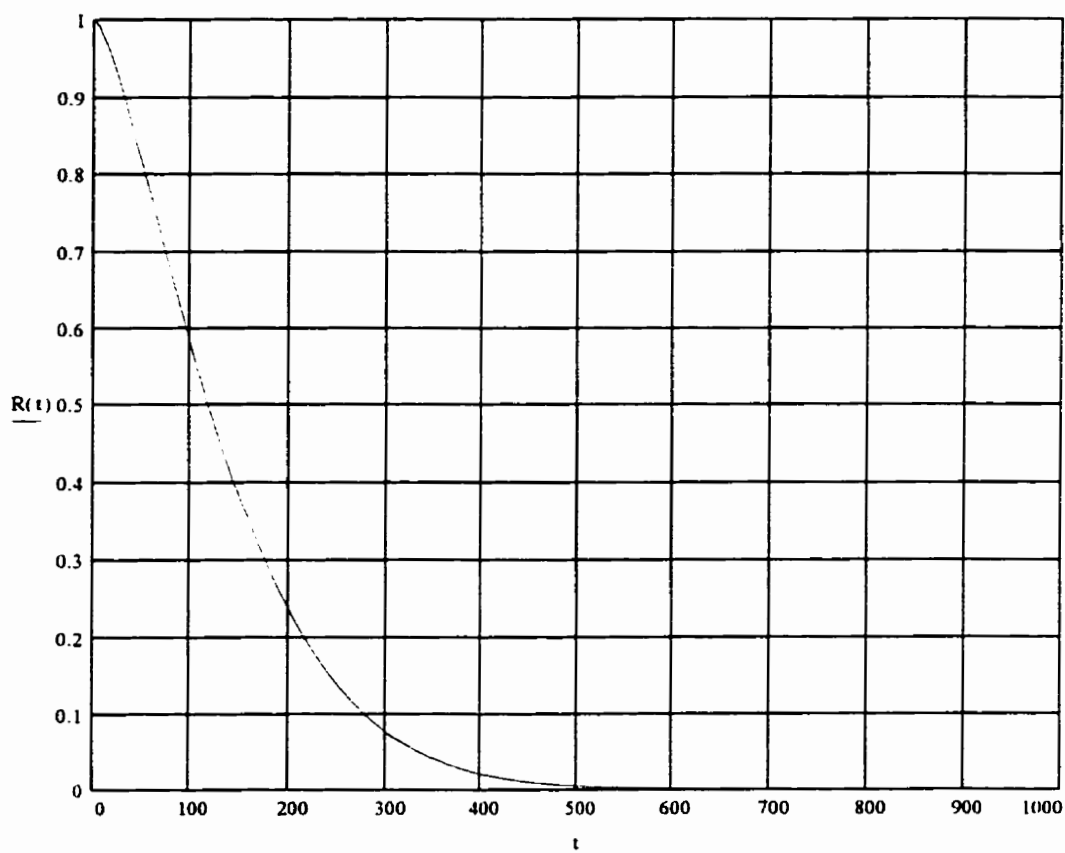


Figure A.31: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \text{ temps} \times 1000 \text{ km}$$

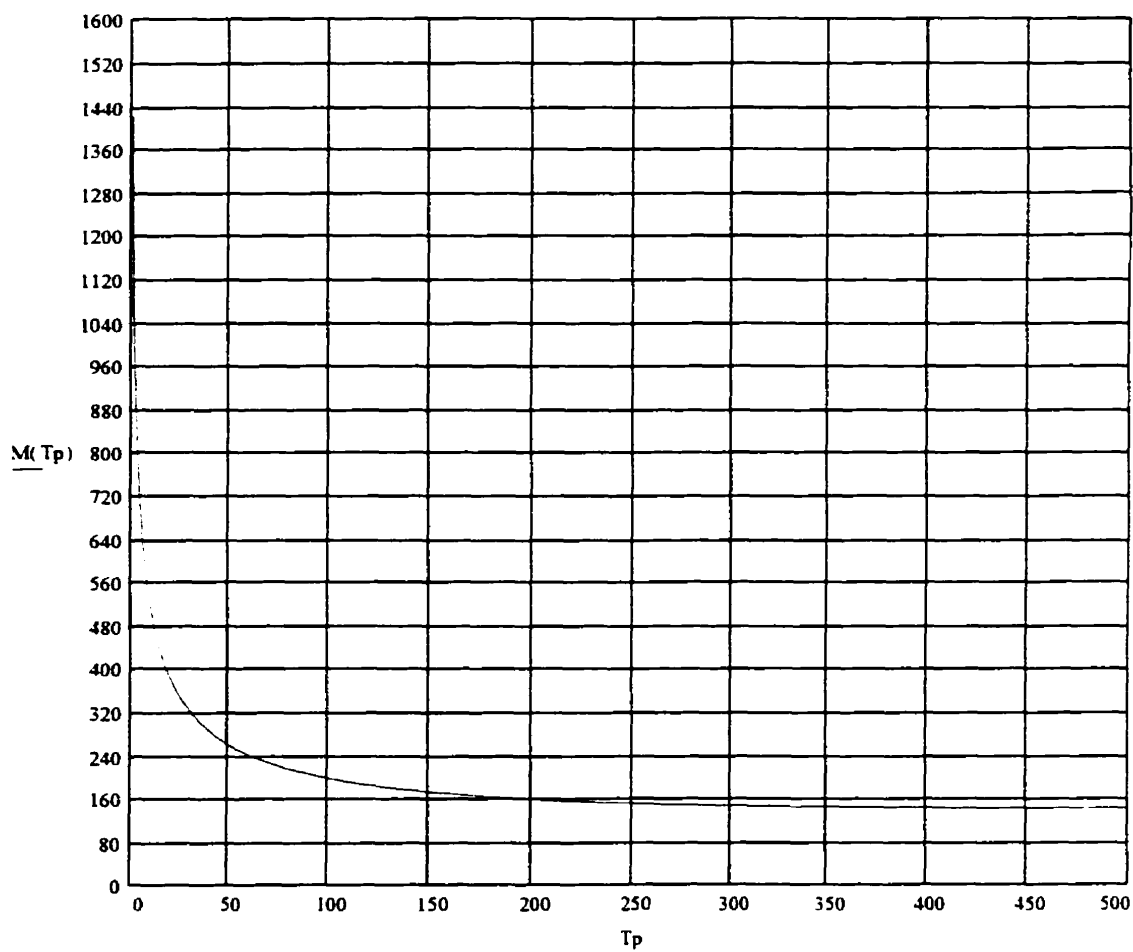


Figure A.32: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.2.4 Compresseur d'air modèle 2

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 151$$

$$\beta = 1.54$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1..1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

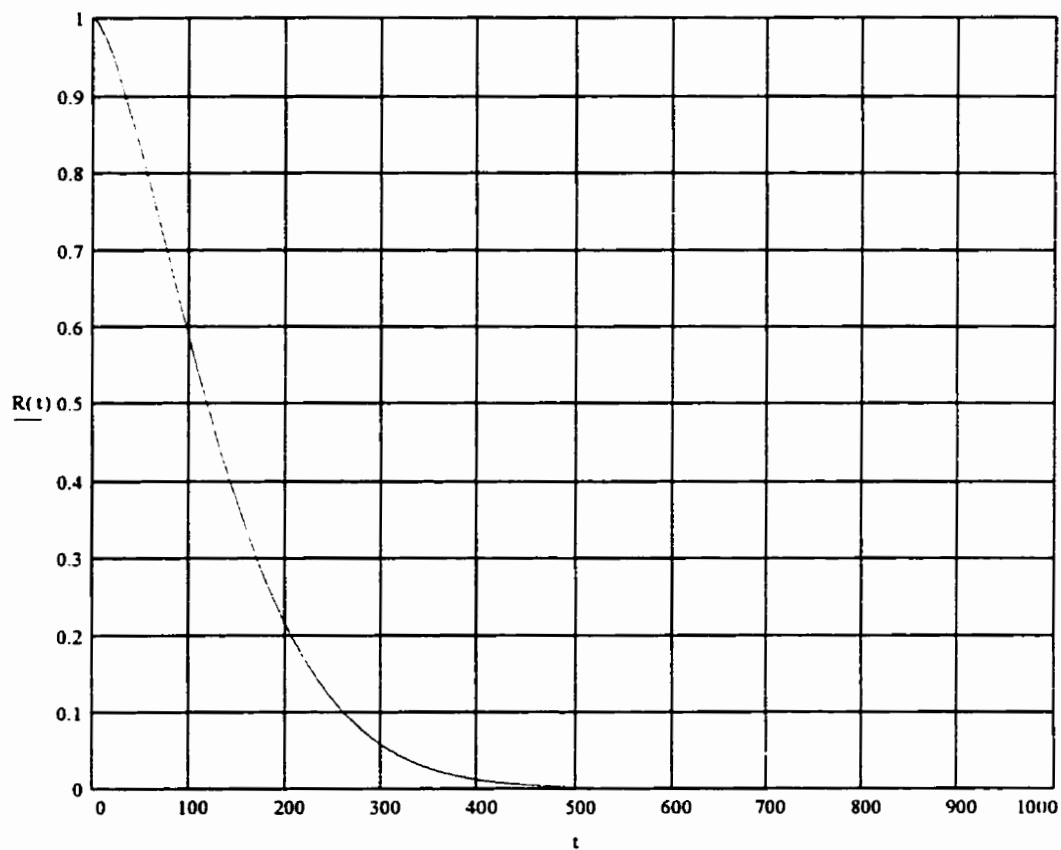


Figure A.33: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

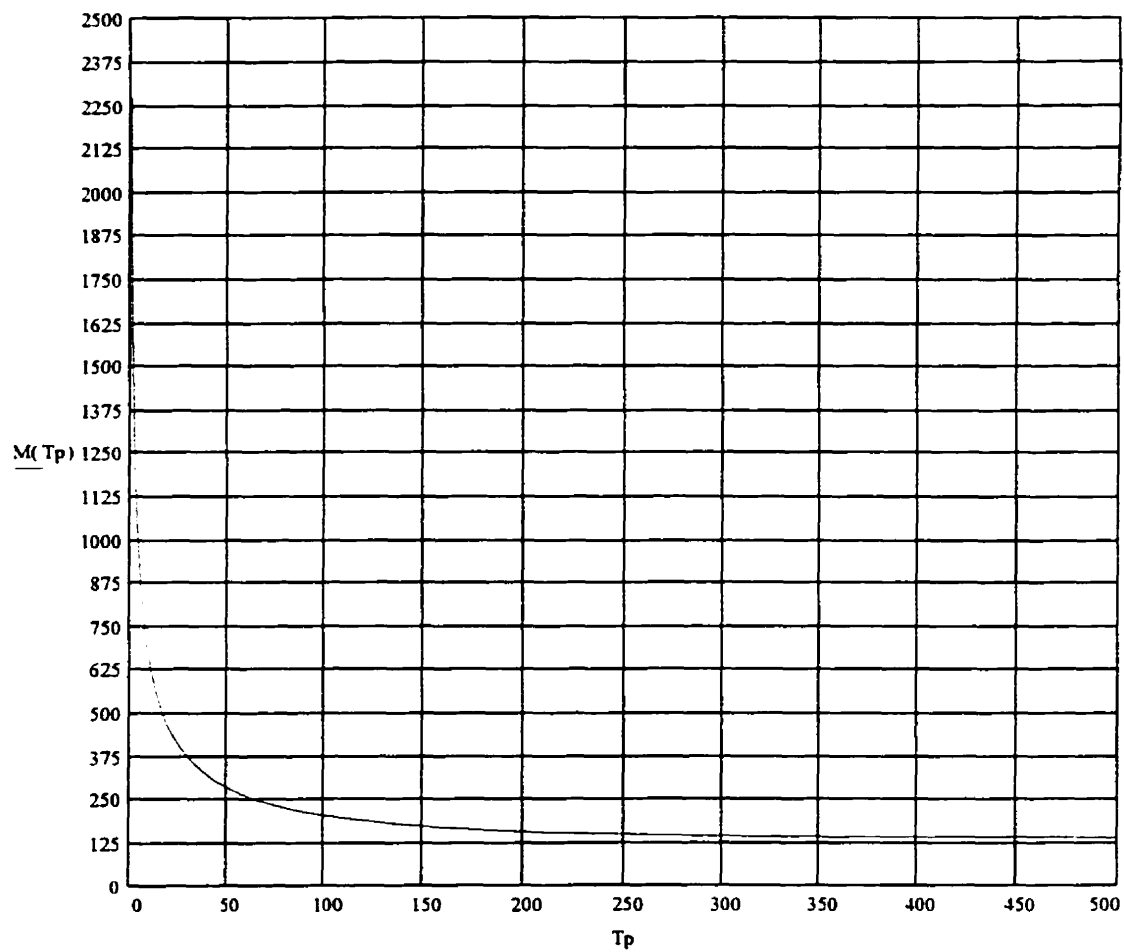


Figure A.34: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.2.5 Démarreur modèle 1

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 222.1$$

$$\beta = 1.20$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

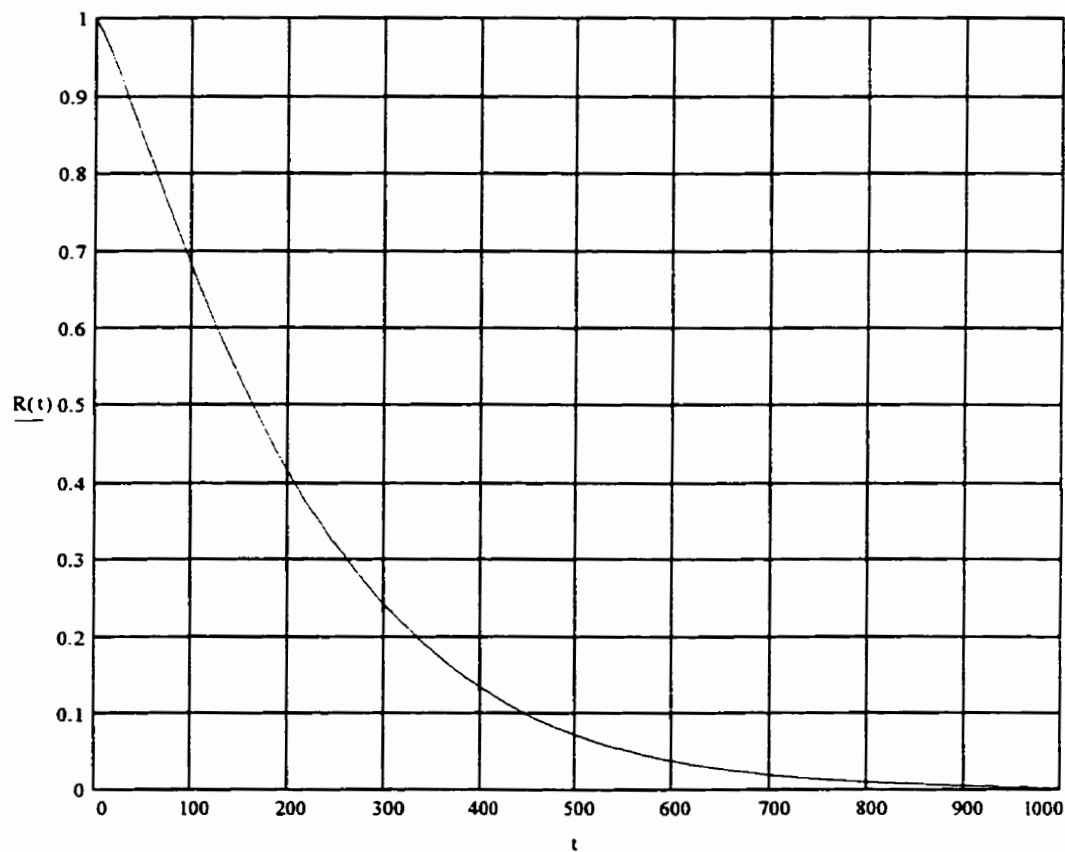


Figure A.35: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \text{ temps} \times 1000 \text{ km}$$

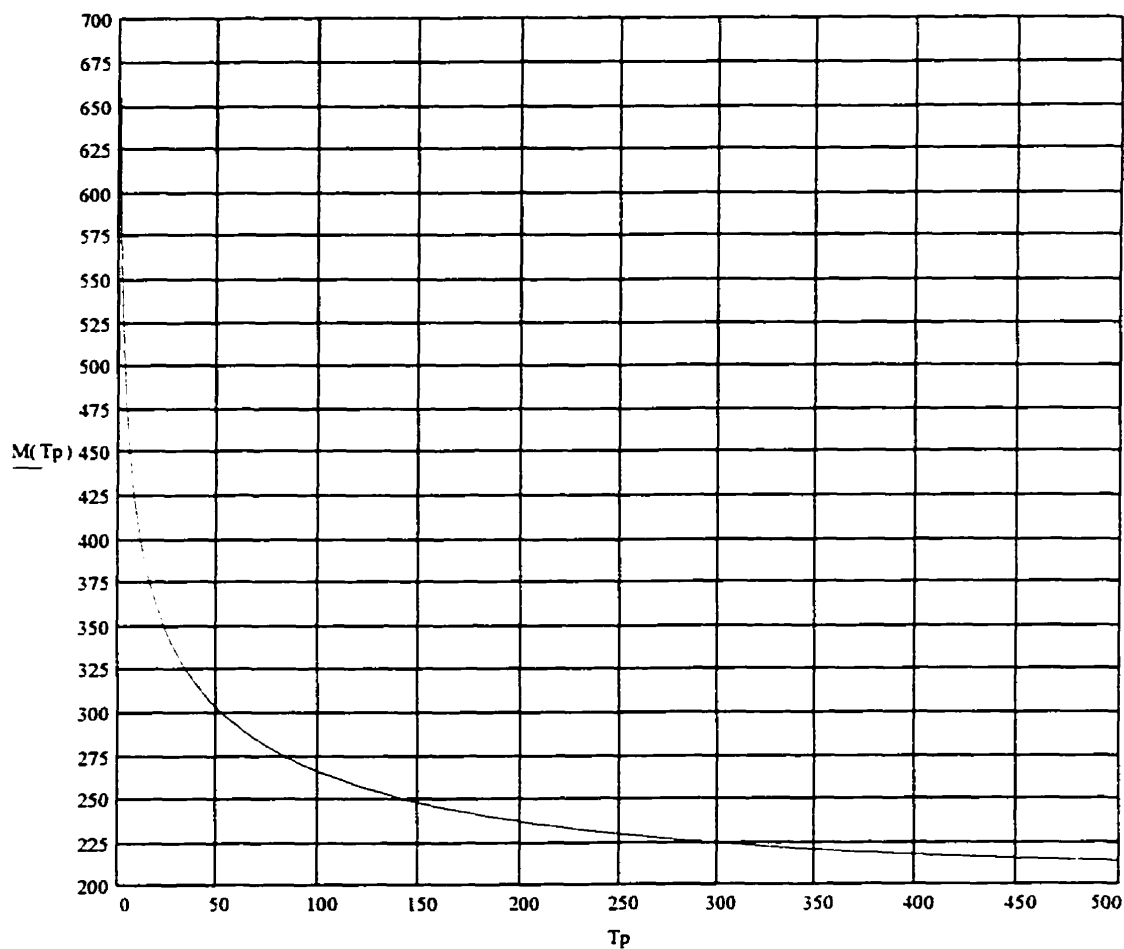


Figure A.36: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.2.6 Démarreur modèle 2

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 243.3$$

$$\beta = 1.24$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

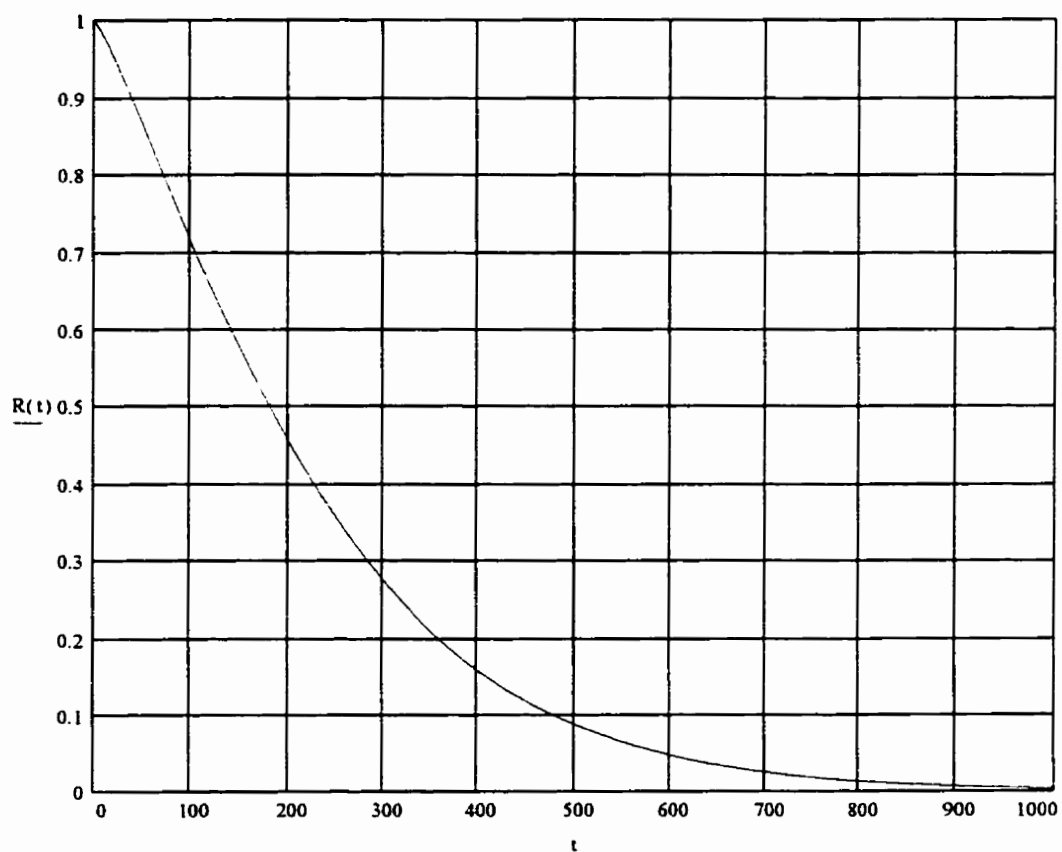


Figure A.36: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \text{ temps} \times 1000 \text{ km}$$

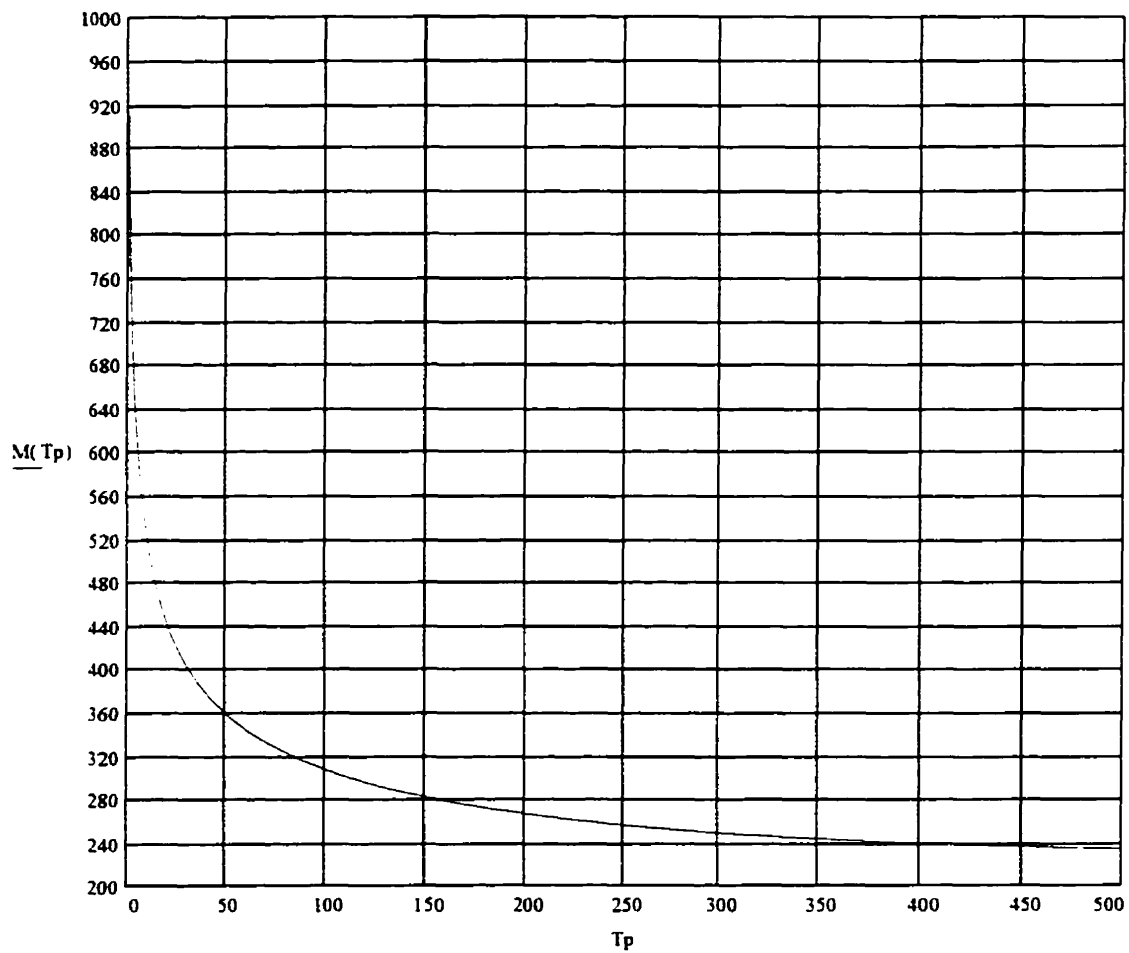


Figure A.37: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.2.7 Pompe à eau modèle 1

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 163.2$$

$$\beta = 2.89$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

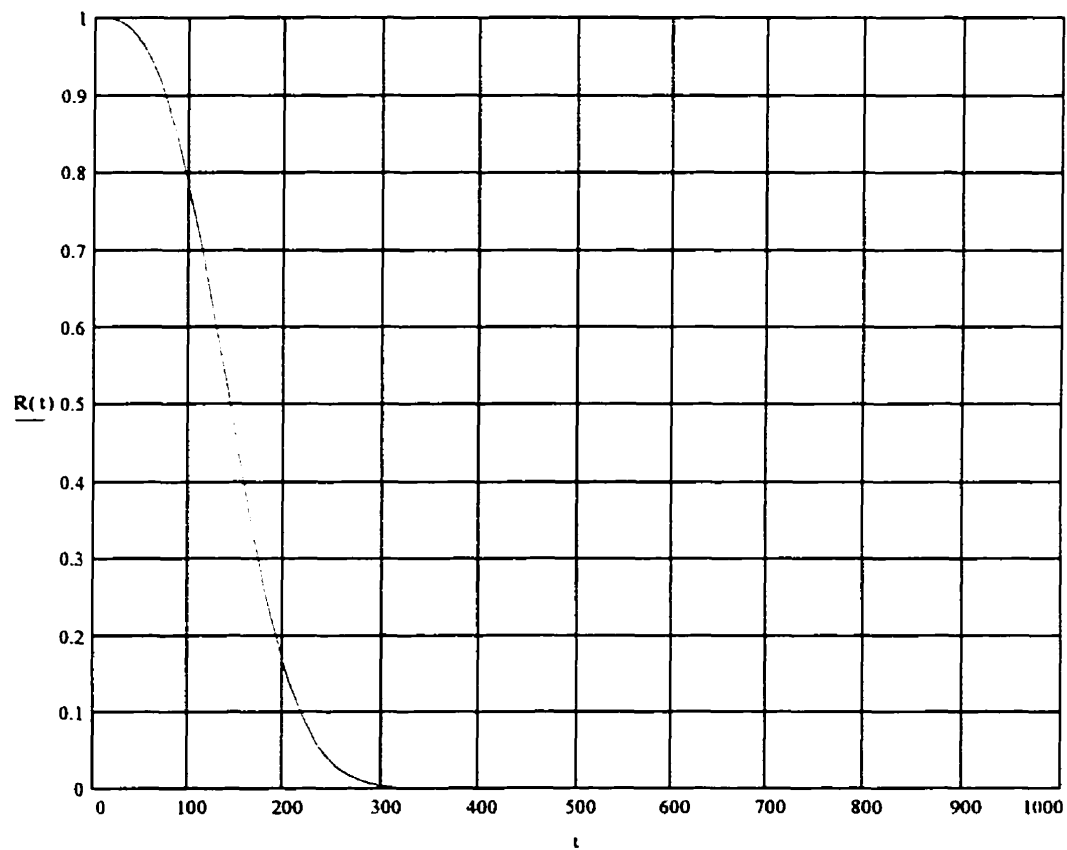


Figure A.39: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p = 1 \dots 500 \text{ temps} \times 1000 \text{ km}$$

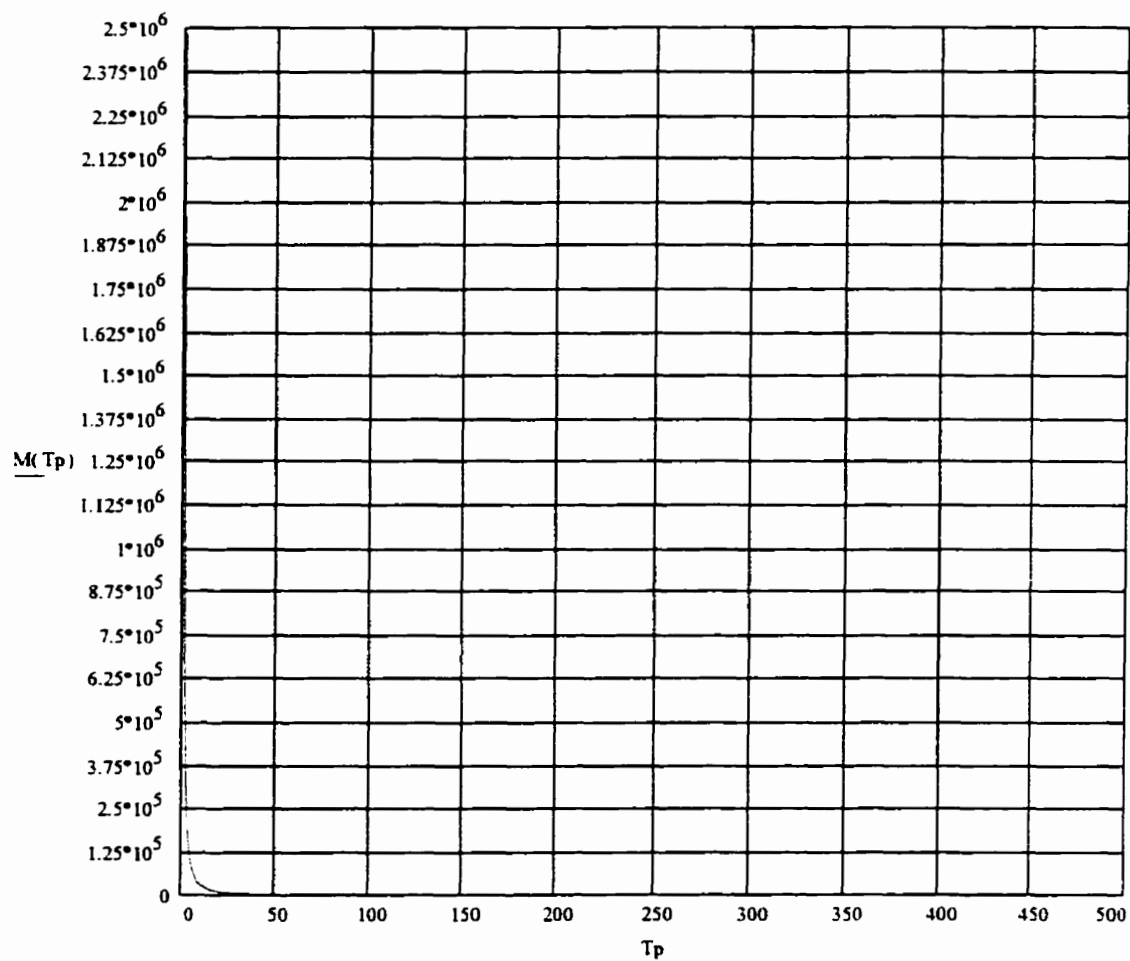


Figure A.40: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

A.2.8 Pompe à eau modèle 2

- Fiabilité de Weibull et paramètres

$$\theta = 220.2$$

$$\beta = 1.21$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad t = 1 \dots 1000 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

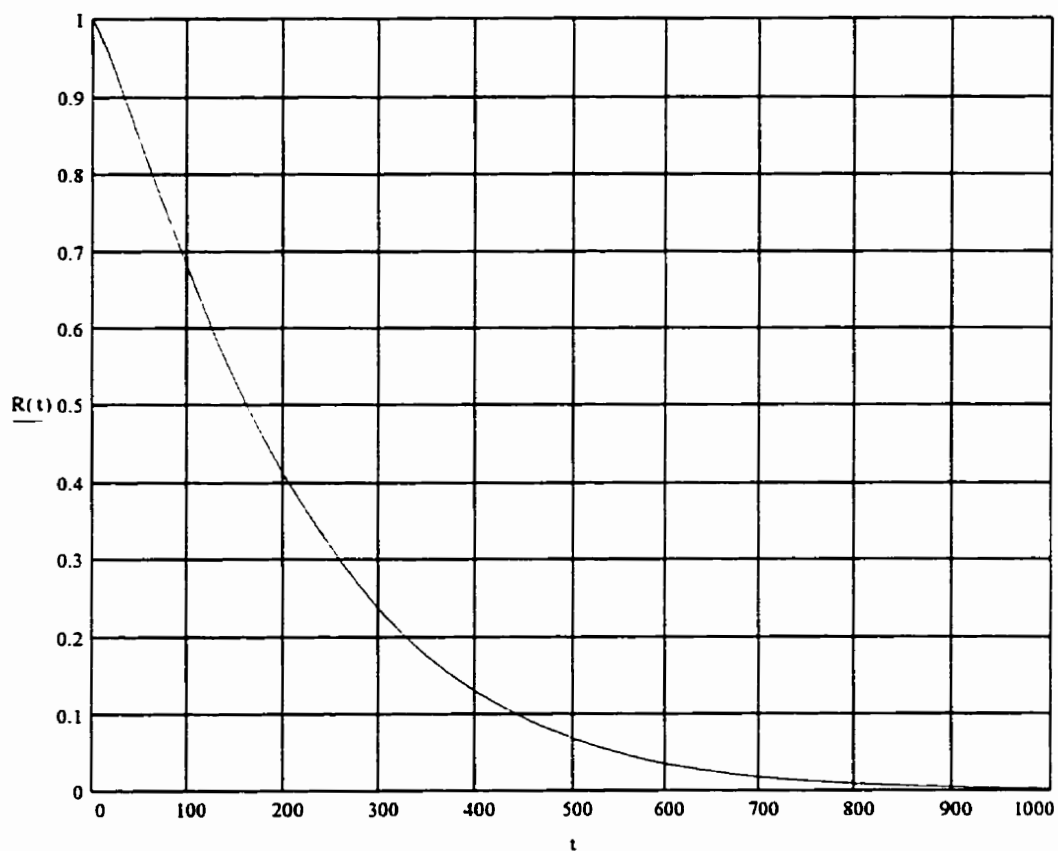


Figure A.41: Fiabilité de la composante

- Maintenabilité de la composante en fonction du temps de remplacement T_p

$$M(T_p) = \frac{\int_0^{T_p} R(t) dt}{1 - R(T_p)} \quad T_p \approx 1 \dots 500 \quad \text{temps} \times 1000 \text{ km}$$

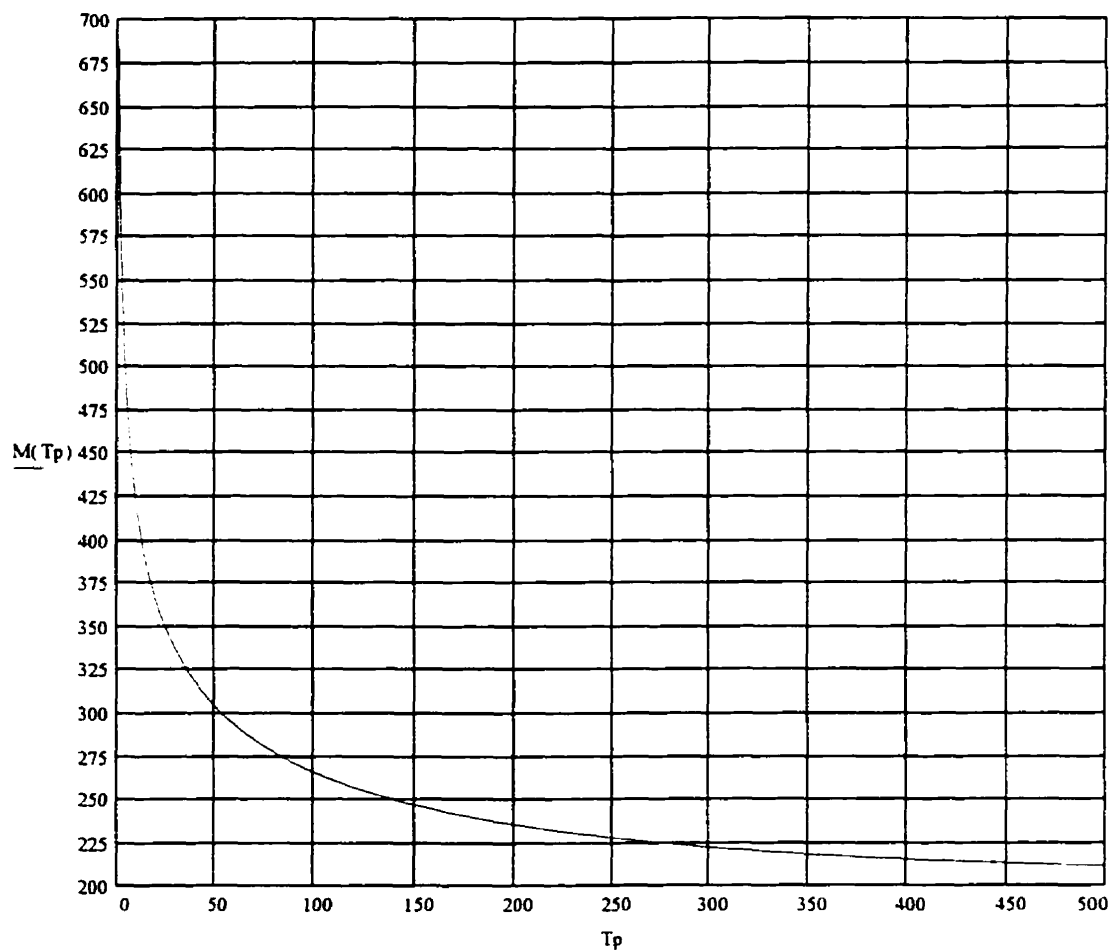


Figure A.42: Maintenabilité en fonction du temps de remplacement T_p

Annexe B : Programme de calcul des périodes de remplacement

Annexe B : Programme de calcul des périodes de remplacement

Le programme a été écrit dans le langage Fortran.

```
PROGRAM RELIA
```

```
REAL THETA,BETA,TP,VAL,COM,J,TIME  
DIMENSION R(1000),T(1000),TAU(1000),RTP(1000)  
INTEGER I,K,N
```

```
ENTREE DES VARIABLES THETA ET BETA
```

```
OPEN (UNIT=4, FILE='RESUL')  
PRINT*,'VEUILLEZ INDIQUER LA VALEUR DE BETA'  
WRITE (4,*) 'INDIQUEZ LA VALEUR DE BETA'  
READ*,BETA  
WRITE (4,*) BETA  
PRINT*,'VEUILLEZ INDIQUER LA VALEUR DE THETA'  
WRITE (4,*) 'INDIQUEZ LA VALEUR DE THETA'  
READ*,THETA  
WRITE (4,*) THETA
```

```
CALCUL DE LA FIABILITE
```

```
T(1)=0  
R(1)=0
```

```
WRITE (4,*) 'VALEURS DE FIABILITE'  
WRITE (4,*) '          t      R(t)'
```

```
DO 10 I=2,500  
  T(I)=T(I-1)+1  
  R(I)=EXP(-(T(I)/THETA)**BETA))  
  WRITE (4,*) T(I),R(I)  
10  CONTINUE
```

OPTIMISATION DE LA FIABILITE

```
PRINT*, 'ENTREZ LA VALEUR DELA PERIODE DE MAINTENANCE SVP'
```

```
READ*, TP
```

```
WRITE (4,*) '      t      Rtp(t) '
```

```
COM=(240/TP)
```

```
VAL=EXP((- (TP/THETA)**BETA))
```

```
T(1)=0
```

```
TAU(1)=0
```

```
RTP(1)=0
```

```
R(1)=0
```

```
J=0
```

```
TIME=0
```

```
N=INT(COM)
```

```
20  IF (J.LT.COM) THEN
```

```
    DO 30 I=1,TP
```

```
        TAU(I)=TIME-(J*TP)
```

```
        R(I)=EXP((- (TAU(I)/THETA)**BETA))
```

```
        RTP(I)=(VAL**J)*R(I)
```

```
30    CONTINUE
```

```
    J=J+1
```

```
    TIME=J*TP
```

```
    GOTO 20
```

```
END IF
```

```
END
```

Annexe C: Variation de la fiabilité en fonction de la période T_p

Annexe C: Variation de la fiabilité en fonction de la période T_p

C.1 Unités suivies

C.1.1- Alternateur modèle 1 ($\beta = 2.07$, $\theta = 323\,769$ km)

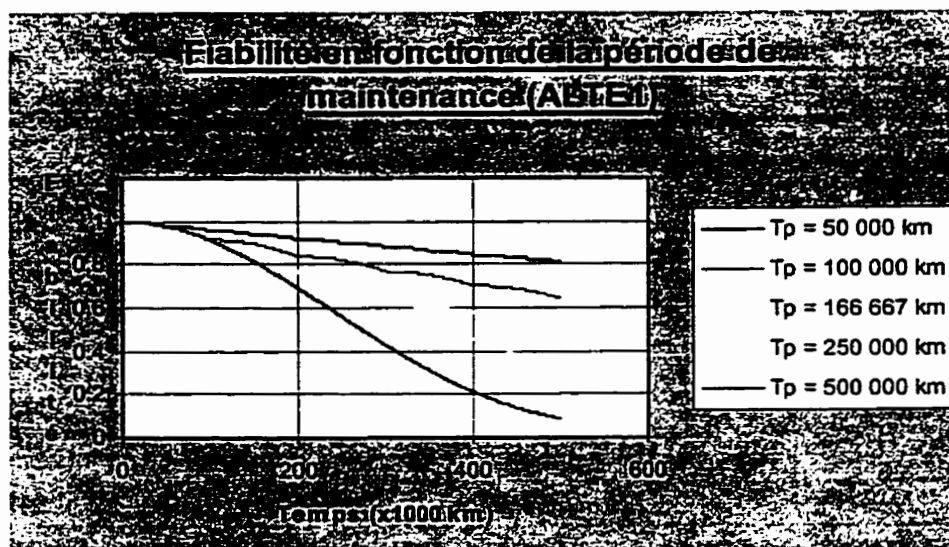


Figure C.1 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.1 : Variation de la fiabilité (ALTE1)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.812	26 %
100 000 km	0.646	37 %
166 667 km	0.471	51 %
250 000 km	0.312	263 %
500 000 km	0.086	-----

C.1.2 Alternateur modèle 2 ($\beta = 1.27$, $\theta = 372\,020$ km)

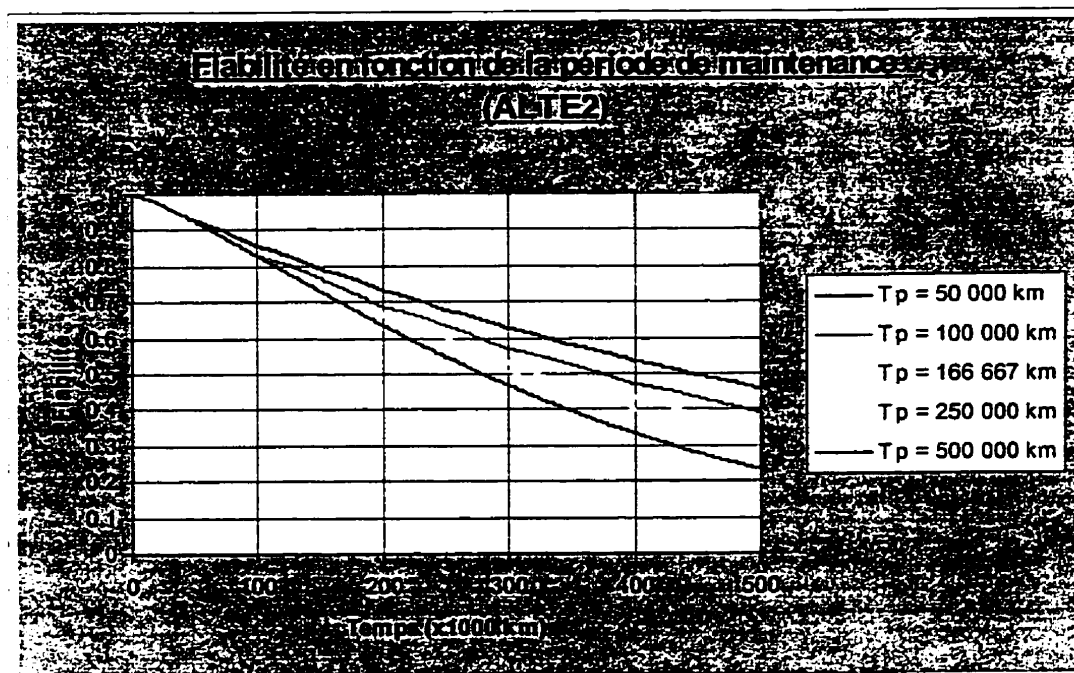


Figure C.2 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.2 : Variation de la fiabilité (ALTE2)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.459	17 %
100 000 km	0.391	15 %
166 667 km	0.340	13 %
250 000 km	0.300	28 %
500 000 km	0.234	-----

C.1.3 Alternateur modèle 3 ($\beta = 1.18$, $\theta = 175\,855$ km)

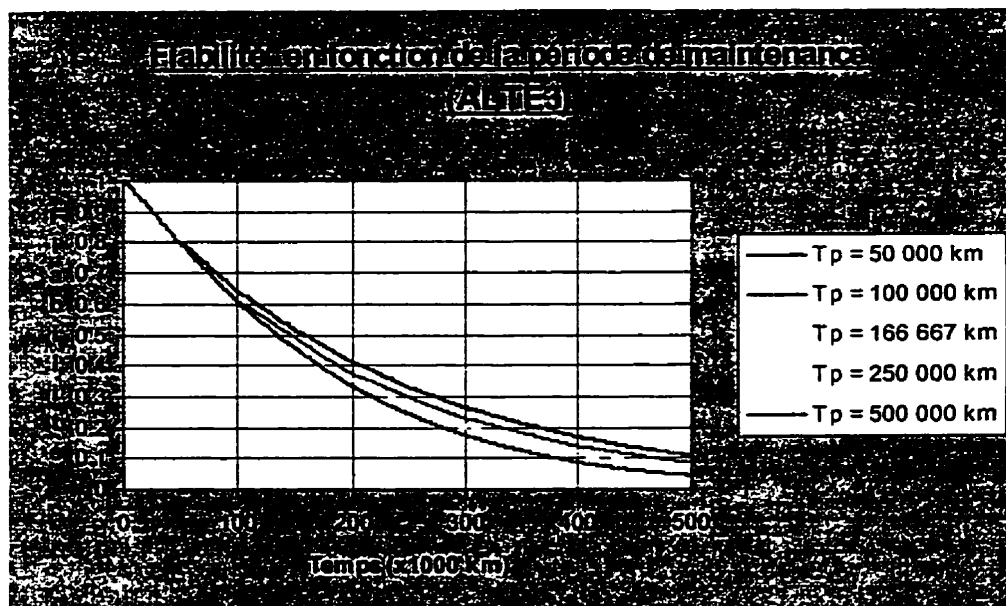


Figure C.3 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.3 : Variation de la fiabilité (ALTE3)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.109	28 %
100 000 km	0.085	21 %
166 667 km	0.070	19 %
250 000 km	0.059	34 %
500 000 km	0.044	-----

C.1.4 Culasse modèle 1 ($\beta = 1.78$, $\theta = 306\,606$ km)

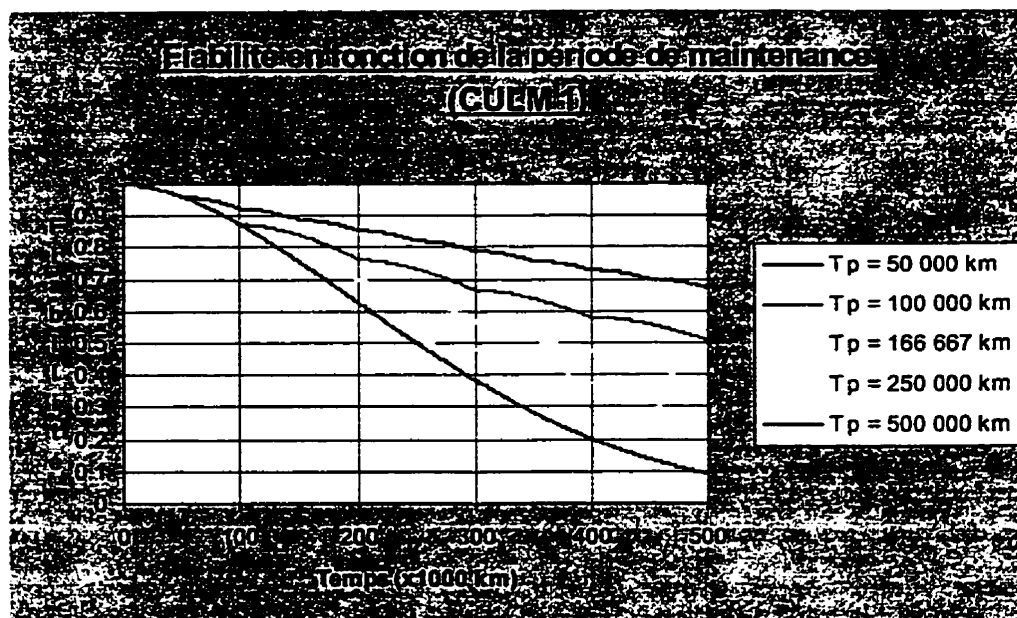


Figure C.4 : Optimisation des intervalles de maintenance.

Tableau C.4 : Variation de la fiabilité (CULM1)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.674	33 %
100 000 km	0.507	39 %
166 667 km	0.365	46 %
250 000 km	0.250	169 %
500 000 km	0.093	-----

C.1.5 Culasse modèle 2 ($\beta = 2.43$, $\theta = 319\,771$ km)

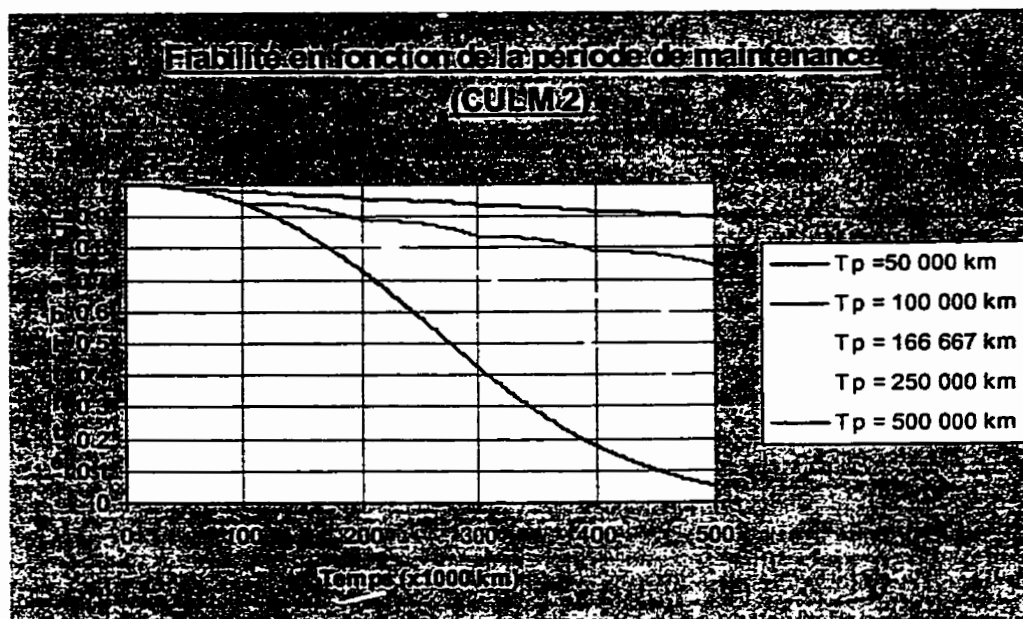


Figure C.5 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.5 : Variation de la fiabilité (CULM2)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.896	20 %
100 000 km	0.744	37 %
166 667 km	0.543	62 %
250 000 km	0.335	544 %
500 000 km	0.052	-----

C.1.6 Injecteur modèle 1 ($\beta = 1.77$, $\theta = 255\,617$ km)

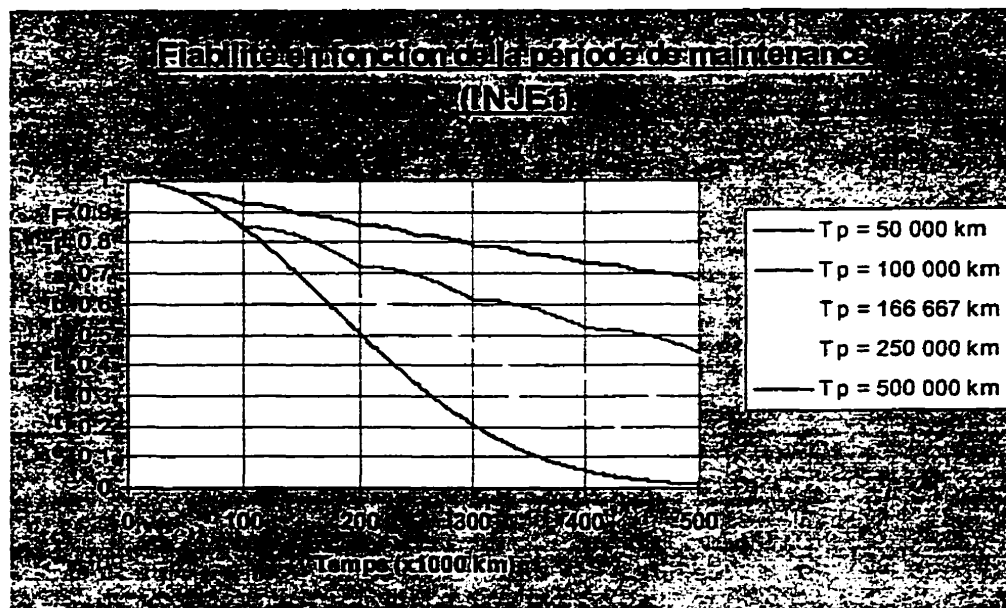


Figure C.6 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.6 : Variation de la fiabilité (INJE1)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.679	53 %
100 000 km	0.444	80 %
166 667 km	0.247	115 %
250 000 km	0.115	946 %
500 000 km	0.011	-----

C.1.7 Injecteur modèle 2 ($\beta = 2.33$, $\theta = 305\,718$ km)

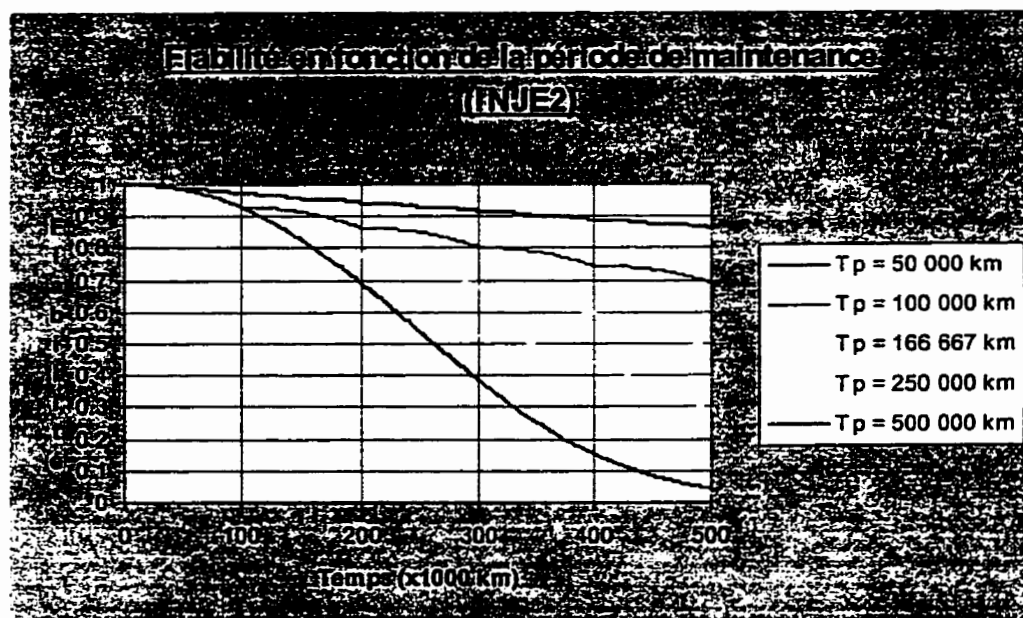


Figure C.7 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.7 : Variation de la fiabilité (INJE2)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.864	25 %
100 000 km	0.692	43 %
166 667 km	0.485	69 %
250 000 km	0.288	555 %
500 000 km	0.044	-----

C.1.8 Soufflante modèle 1 ($\beta = 2.23$, $\theta = 195\,301$ km)

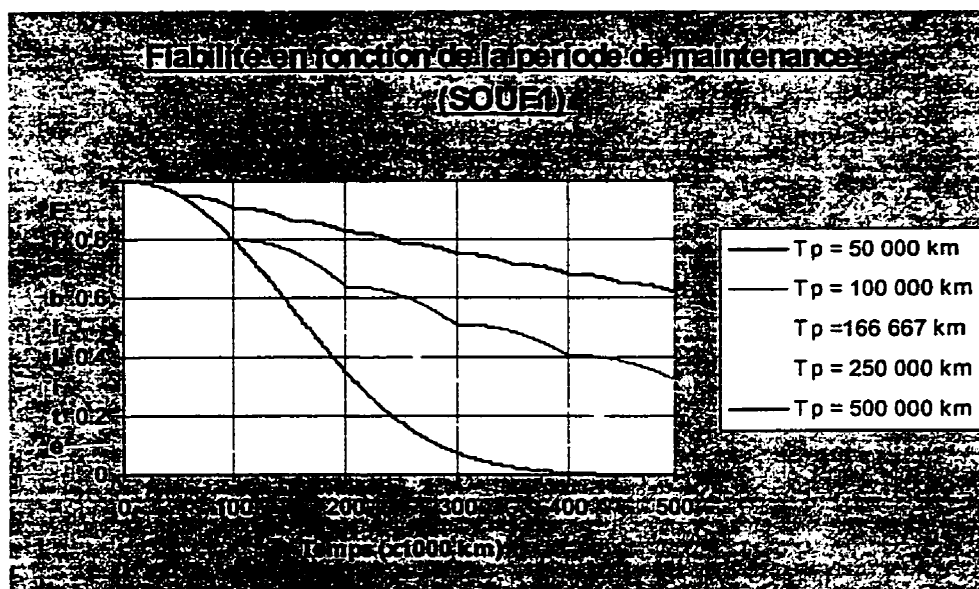


Figure C.8 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.8 : Variation de la fiabilité (SOUE1)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.621	90 %
100 000 km	0.327	164 %
166 667 km	0.124	288 %
250 000 km	0.032	-----
500 000 km	0.000	-----

C.1.9 Soufflante modèle 2 ($\beta = 1.56$, $\theta = 423\,156$ km)

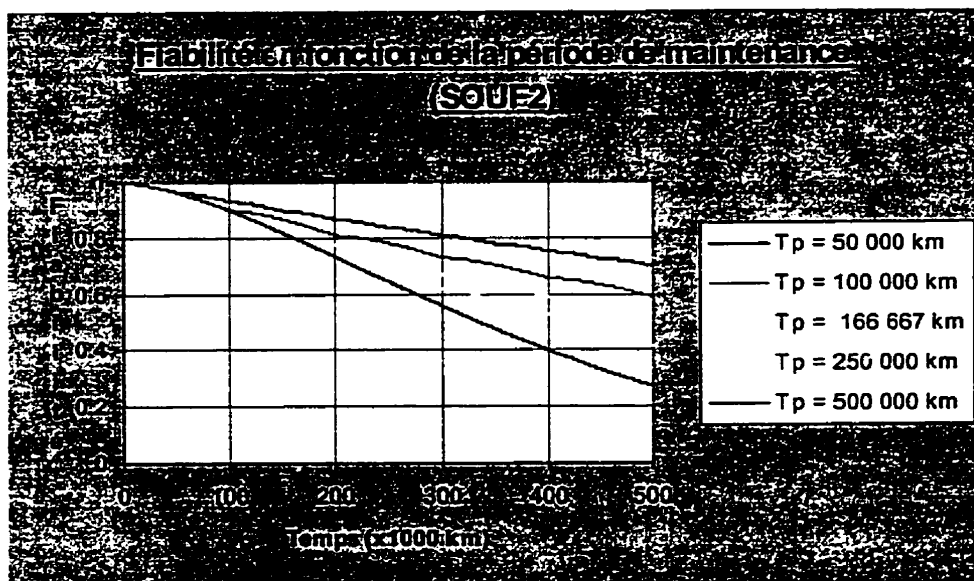


Figure C.9 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.9 : Variation de la fiabilité (SOUE2)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.700	18 %
100 000 km	0.592	19 %
166 667 km	0.498	20 %
250 000 km	0.416	52 %
500 000 km	0.274	-----

C.1.10 Transmission modèle 1 ($\beta = 1.14$, $\theta = 315\,183$ km)

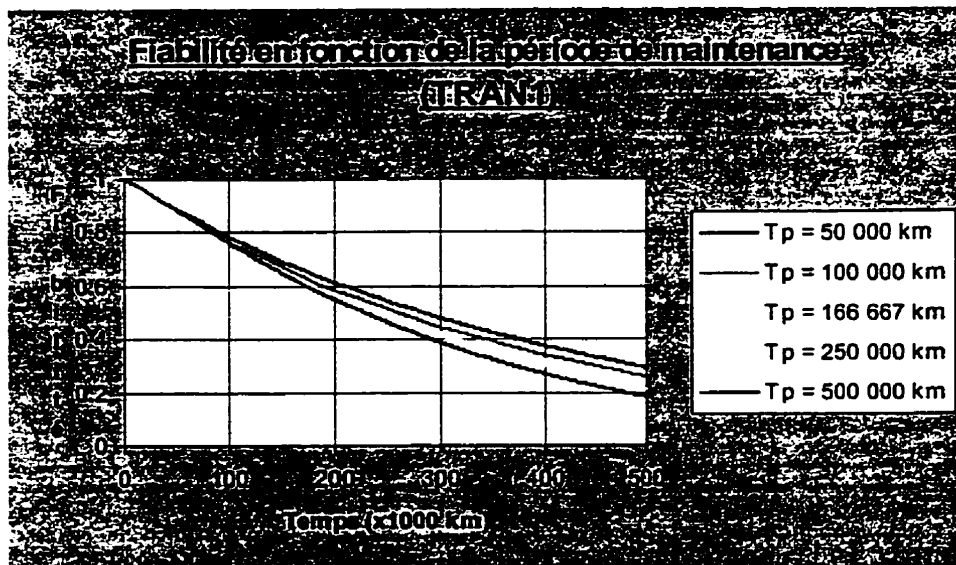


Figure C.10 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.10 : Variation de la fiabilité (TRAN1)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.294	13 %
100 000 km	0.260	10 %
166 667 km	0.236	9 %
250 000 km	0.216	17 %
500 000 km	0.185	-----

C.1.11 Transmission modèle 2 ($\beta = 1.55$, $\theta = 347\,638$ km)

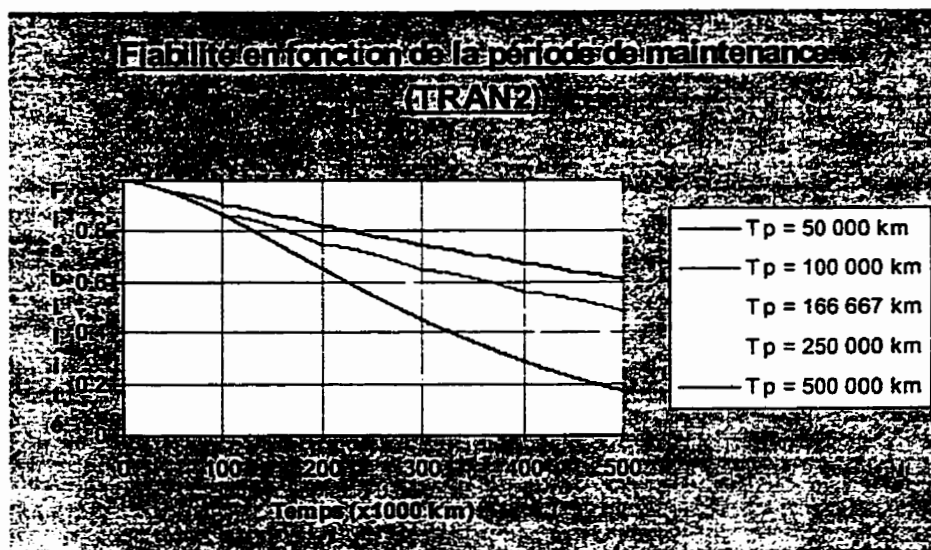


Figure C.11 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.11 : Variation de la fiabilité (TRAN2)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.610	26 %
100 000 km	0.486	26 %
166 667 km	0.385	28 %
250 000 km	0.302	74 %
500 000 km	0.174	-----

C.1.12 Transmission modèle 3 ($\beta = 1.34$, $\theta = 182\,682$ km)

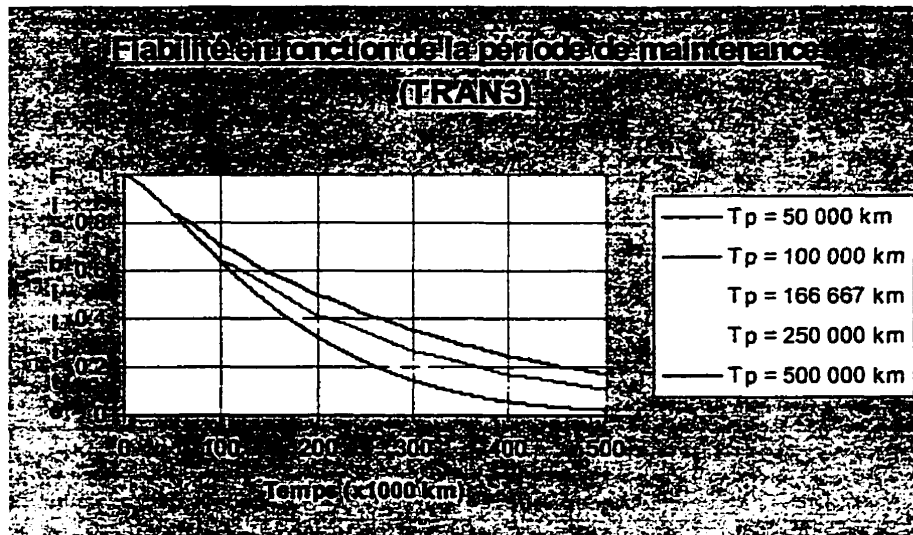


Figure C.12 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.12 : Variation de la fiabilité (TRAN3)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.173	60 %
100 000 km	0.108	52 %
166 667 km	0.071	48 %
250 000 km	0.048	129 %
500 000 km	0.021	-----

C.1.13 Turbocompresseur ($\beta = 2.22$, $\theta = 304\,523$ km)

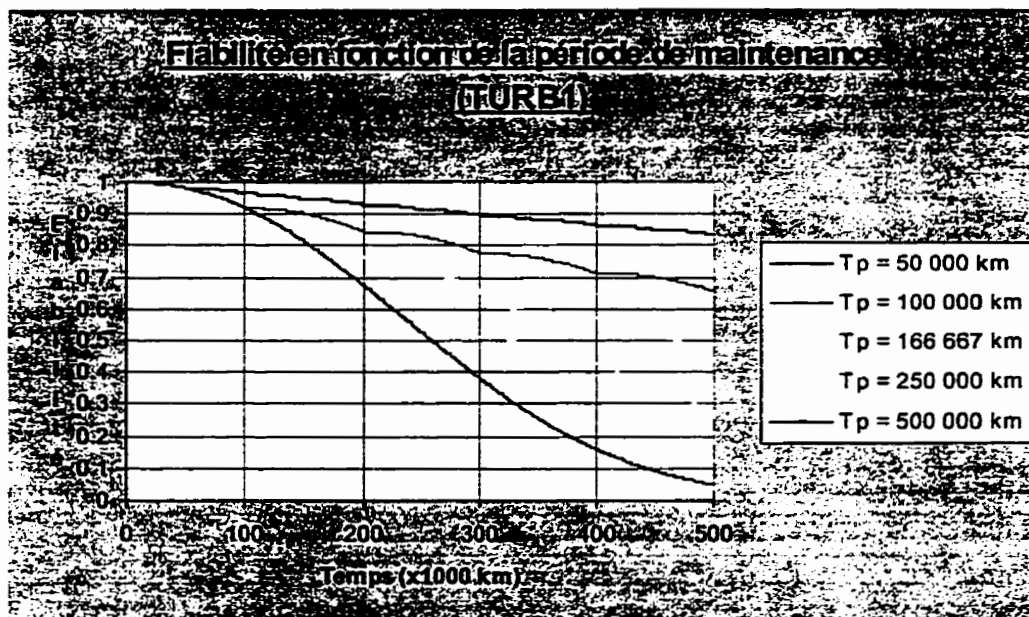


Figure C.13 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.13 : Variation de la fiabilité (TURB1)

Période T_p	Fiabilité $R(500\,000)$	Variation δR
50 000 km	0.835	27 %
100 000 km	0.657	43 %
166 667 km	0.458	65 %
250 000 km	0.277	454 %
500 000 km	0.050	-----

C.2 Unités contrôlées

C.2.1- Boyau moteur modèle 1 ($\beta = 0.75$, $\theta = 617\,352$ km)

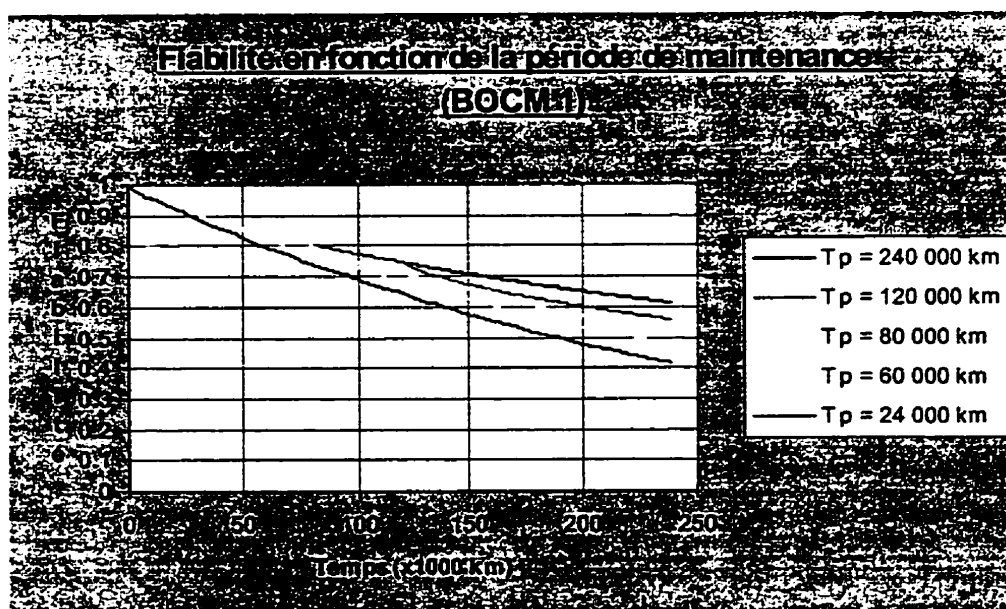


Figure C.14 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.14 : Variation de la fiabilité (BOCM1)

Période T_p	Fiabilité $R(240\,000)$	Variation δR
24 000 km	0.418	-13 %
60 000 km	0.480	-8 %
80 000 km	0.524	-6 %
120 000 km	0.558	-9 %
240 000 km	0.612	-----

C.2.2- Boyau moteur modèle 2 ($\beta = 1.14$, $\theta = 953\,960$ km)

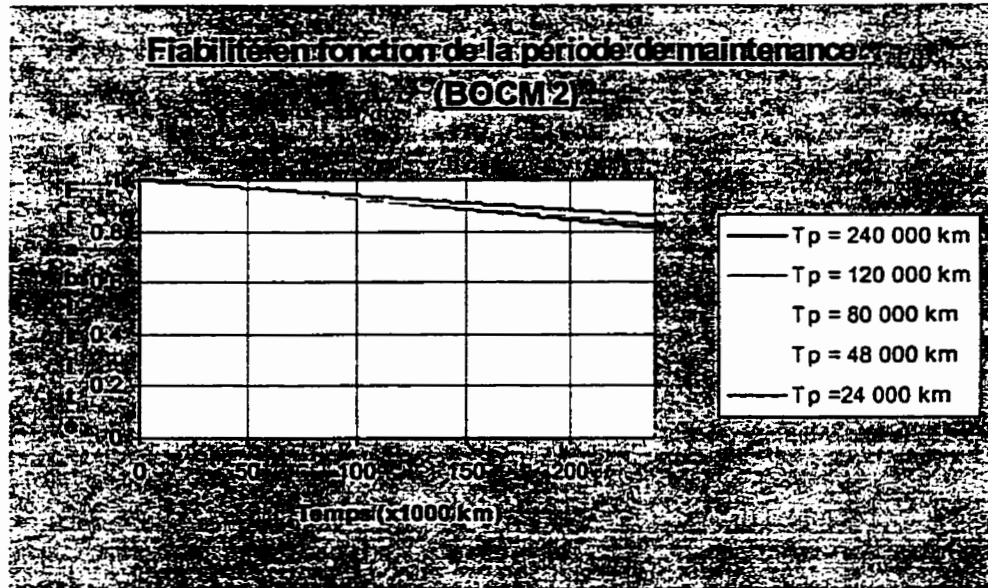


Figure C.15 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.15 : Variation de la fiabilité (BOCM2)

Période T_p	Fiabilité $R(240\,000)$	Variation δR
24 000 km	0.861	2 %
60 000 km	0.848	1 %
80 000 km	0.838	1 %
120 000 km	0.829	2 %
240 000 km	0.814	-----

C.2.3- Compresseur d'air modèle 1 ($\beta = 1.44$, $\theta = 154\,560$ km)

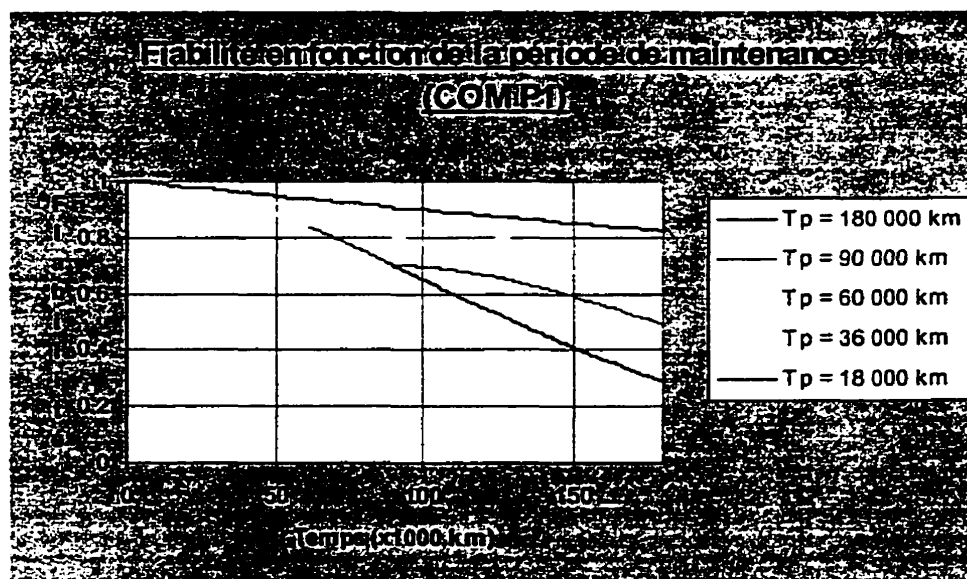


Figure C.16 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.16 : Variation de la fiabilité (COMP1)

Période T_p	Fiabilité $R(180\,000)$	Variation δR
18 000 km	0.823	15 %
36 000 km	0.713	19 %
60 000 km	0.601	21 %
90 000 km	0.495	68 %
180 000 km	0.294	-----

C.2.4- Compresseur d'air modèle 2 ($\beta = 1.54$, $\theta = 150\,945$ km)

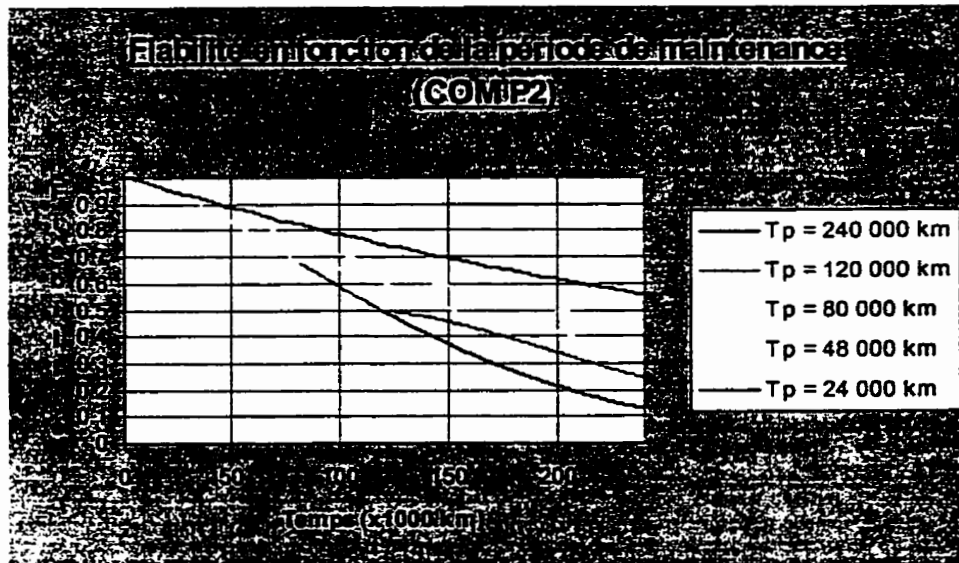


Figure C.17 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.17 : Variation de la fiabilité (COMP2)

Période T_p	Fiabilité $R(240\,000)$	Variation δR
24 000 km	0.557	30 %
60 000 km	0.427	31 %
80 000 km	0.326	32 %
120 000 km	0.247	89 %
240 000 km	0.131	-----

C.2.5- Démarreur modèle 1 ($\beta = 1.20$, $\theta = 222\ 095\text{ km}$)

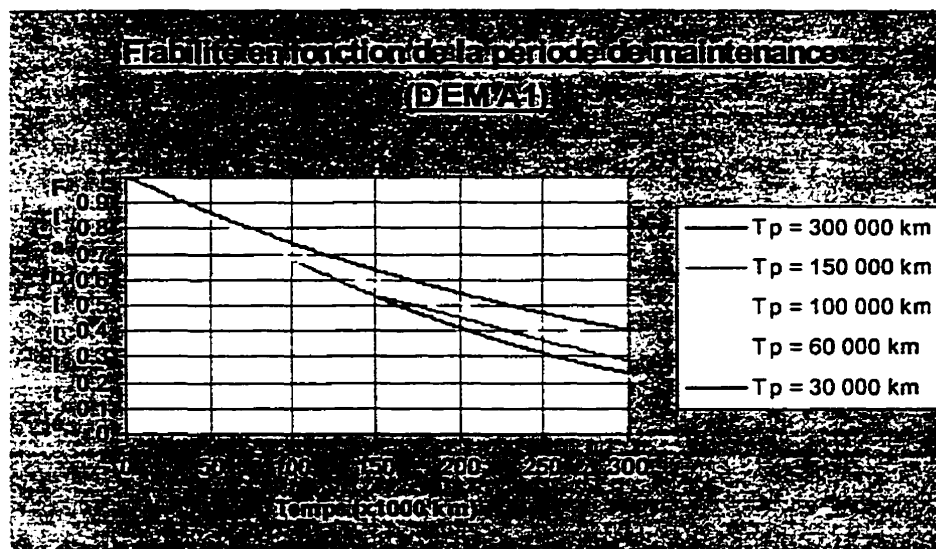


Figure C.18 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.18 : Variation de la fiabilité (DEMA1)

Période T_p	Fiabilité $R(300\ 000)$	Variation δR
30 000 km	0.406	14 %
60 000 km	0.355	12 %
100 000 km	0.318	10 %
150 000 km	0.288	20 %
300 000 km	0.240	-----

C.2.6- Démarreur modèle 2 ($\beta = 1.24$, $\theta = 243\,272$ km)

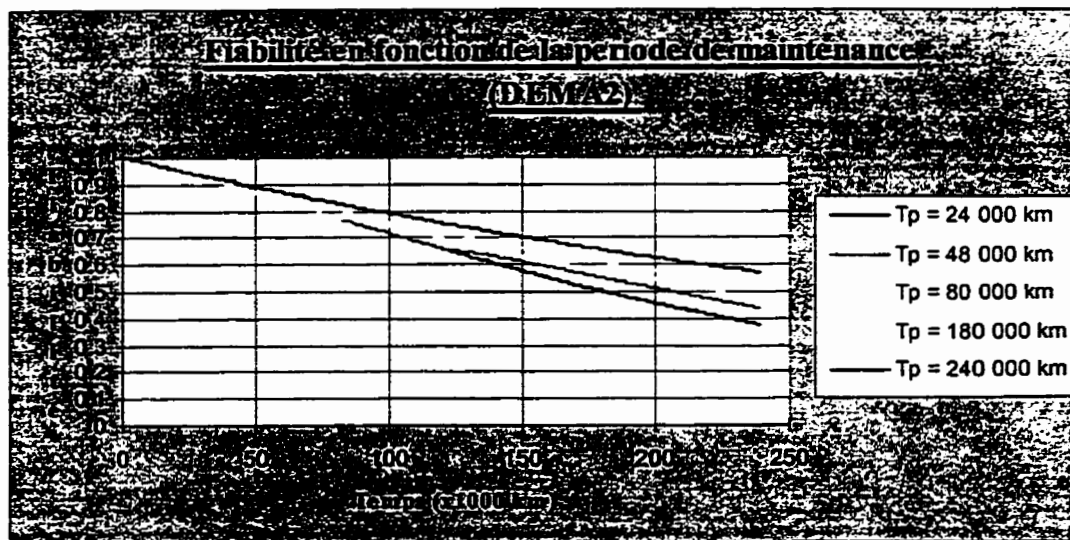


Figure C.19 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.19 : Variation de la fiabilité (DEMA2)

Période T_p	Fiabilité $R(240\,000)$	Variation δR
24 000 km	0.570	11 %
60 000 km	0.514	9 %
80 000 km	0.472	8 %
120 000 km	0.437	16 %
240 000 km	0.376	-----

C.2.7- Pompe à eau modèle 1 ($\beta = 2.89$, $\theta = 163\,181$ km)

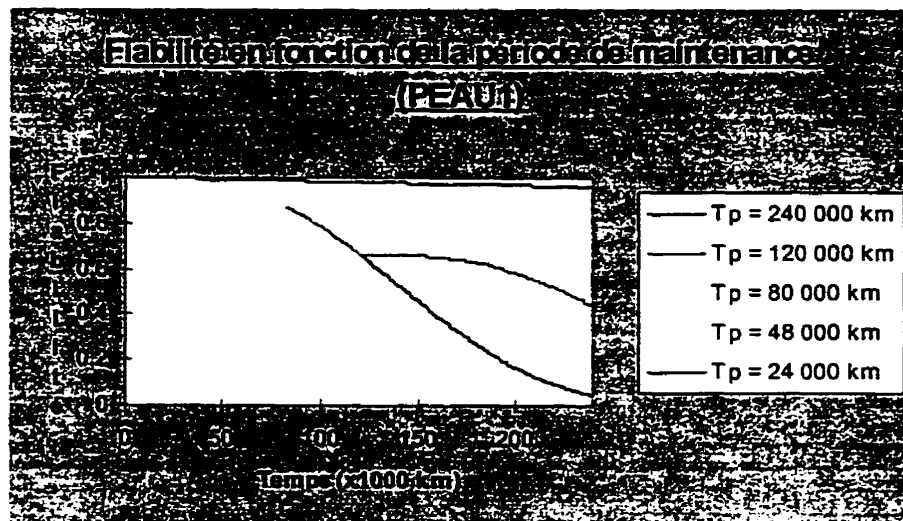


Figure C.20 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.20 : Variation de la fiabilité (PEAU1)

Période T_p	Fiabilité $R(240\,000)$	Variation δR
24 000 km	0.962	11 %
60 000 km	0.866	26 %
80 000 km	0.686	55 %
120 000 km	0.444	806 %
240 000 km	0.049	-----

C.2.8- Pompe à eau modèle 2 ($\beta = 1.21$, $\theta = 220\ 180$ km)

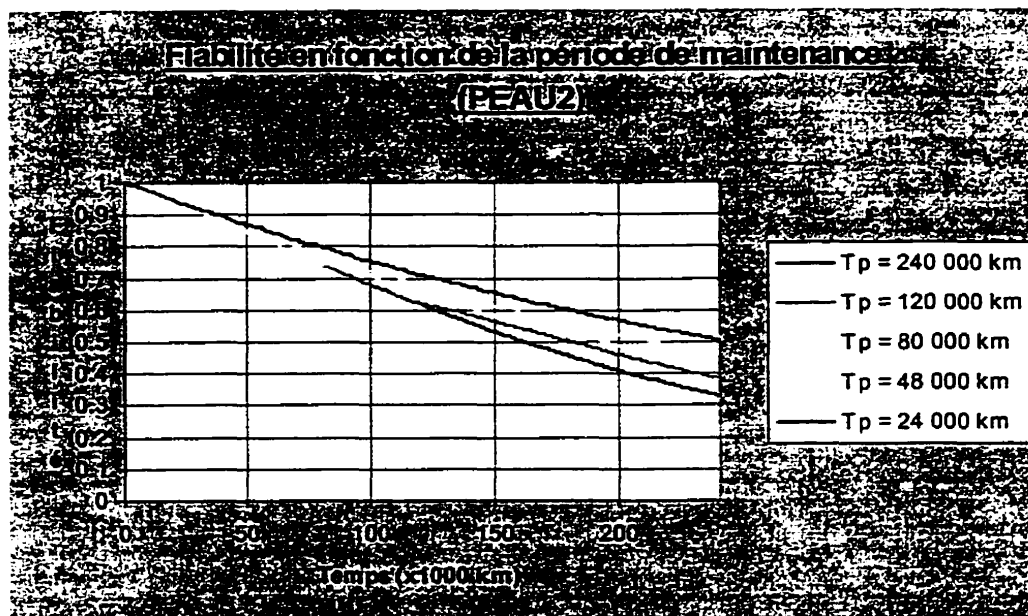


Figure C.21 : Optimisation des intervalles de maintenance

Tableau C.21 : Variation de la fiabilité (PEAU2)

Période T_p	Fiabilité $R(240\ 000)$	Variation δR
24 000 km	0.506	11 %
60 000 km	0.455	9 %
80 000 km	0.416	8 %
120 000 km	0.385	16 %
240 000 km	0.332	-----

Annexe D: Optimisation des périodes de remplacement selon le coût

Annexe D: Optimisation des périodes de remplacement préventif selon le coût

D.1- Unités suivies

D.1.1- Alternateur modèle 1

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

ALTE MODELE 1p	
Preventive Replacement Cost	482.00
Failure Replacement Cost	952.00
Cheapest Preventive Replacement Age (KILOMETRES)	308000.00
Cost \$/KILOMETRES is then .....	.0034
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure .....	.0036
Saving \$/KILOMETRES .....	.0001
Preventive Replacements as Percent of all Replacements.	35
Failure Replacements as Percent of all Replacements ...	65

Ratio du coût préventif et correctif

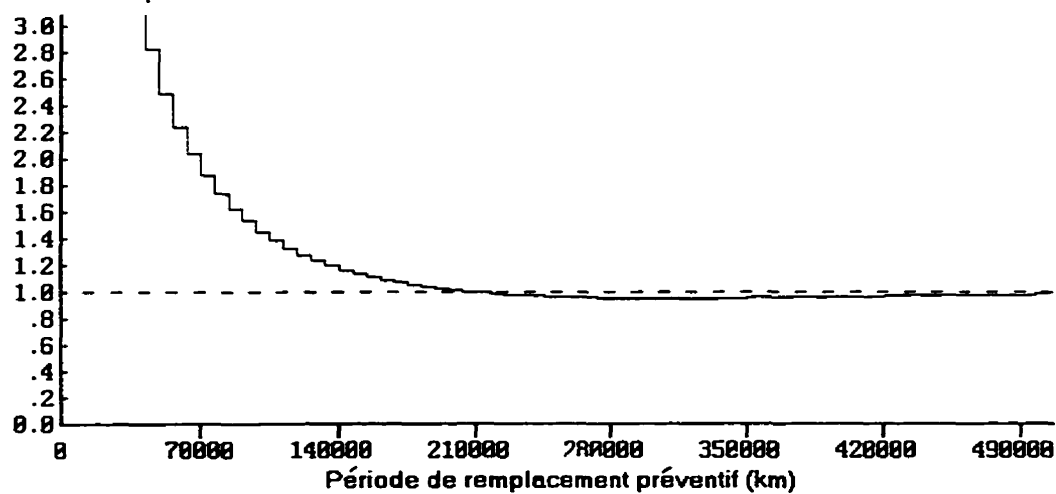


Figure D.1: Optimisation par le coût

D.1.2- Alternateur modèle 2

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

ALTE MODELE 2p	
Preventive Replacement Cost	482.00
Failure Replacement Cost	952.00
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure.....	.00
The Cheapest Policy is to Replace Only On Failure	

D.1.3- Alternateur modèle 3

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

ALTE MODELE 3p	
Preventive Replacement Cost	482.00
Failure Replacement Cost	952.00
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure.....	.00
The Cheapest Policy is to Replace Only On Failure	

D.1.4- Culasse modèle 1

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

CULM 6V71 1P	
Preventive Replacement Cost	985.00
Failure Replacement Cost	1455.00
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure.....	.01
The Cheapest Policy is to Replace Only On Failure	

D.1.5- Culasse modèle 2

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

CULM 6V92	
Preventive Replacement Cost	985.00
Failure Replacement Cost	1455.00
Cheapest Preventive Replacement Age (KILOMETRES)	406000.00
Cost \$/KILOMETRES is then .....	.0051
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure .....	.0051
Saving \$/KILOMETRES .....	.0001
Preventive Replacements as Percent of all Replacements.	17
Failure Replacements as Percent of all Replacements ...	83

Ratio du coût préventif

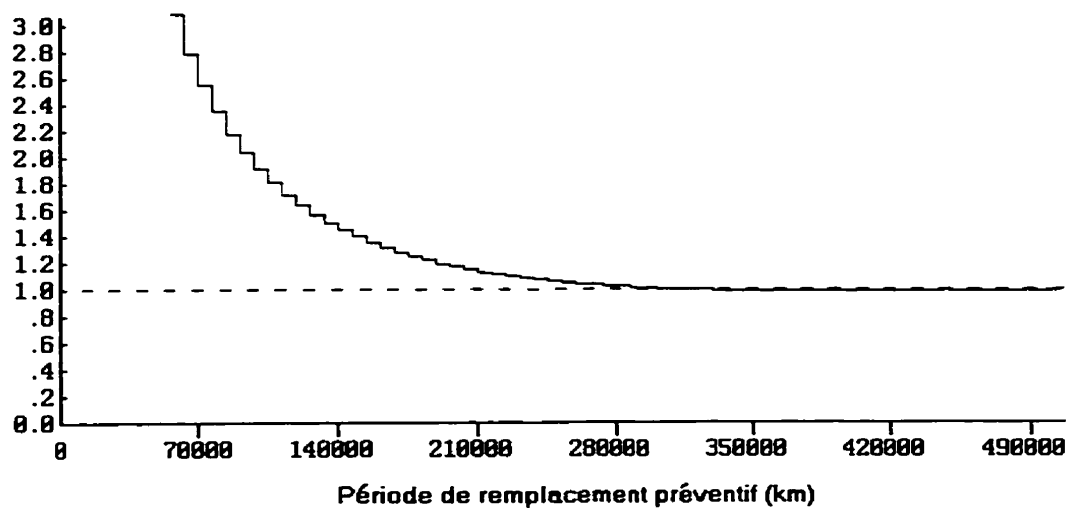


Figure D.2: Optimisation par le coût

D.1.6- Injecteurs modèle 1

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

INJE 6V71 1p	
Preventive Replacement Cost	420.00
Failure Replacement Cost	890.00
Cheapest Preventive Replacement Age (KILOMETRES)	235000.00
Cost \$/KILOMETRES is then .....	.0040
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure .....	.0042
Saving \$/KILOMETRES .....	.0002
Preventive Replacements as Percent of all Replacements.	39
Failure Replacements as Percent of all Replacements ...	61

Ratio du coût préventif

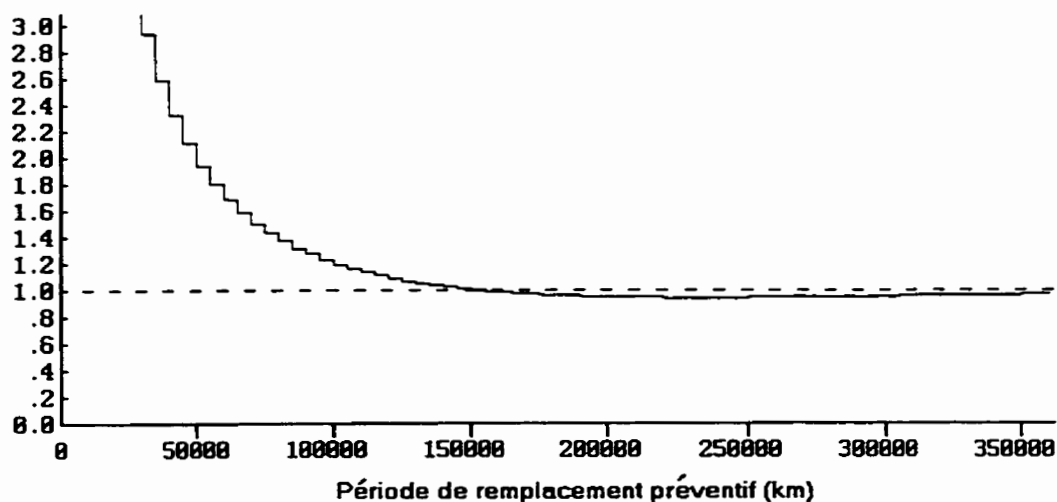


Figure D.3: Optimisation par le coût

D.1.7- Injecteurs modèle 2

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

INJE 6V92 2c	
Preventive Replacement Cost	420.00
Failure Replacement Cost	890.00
Cheapest Preventive Replacement Age (KILOMETRES)	329000.00
Cost \$/KILOMETRES is then .....	.0029
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure .....	.0030
Saving \$/KILOMETRES .....	.0001
Preventive Replacements as Percent of all Replacements.	38
Failure Replacements as Percent of all Replacements ...	62

Ratio du coût préventif

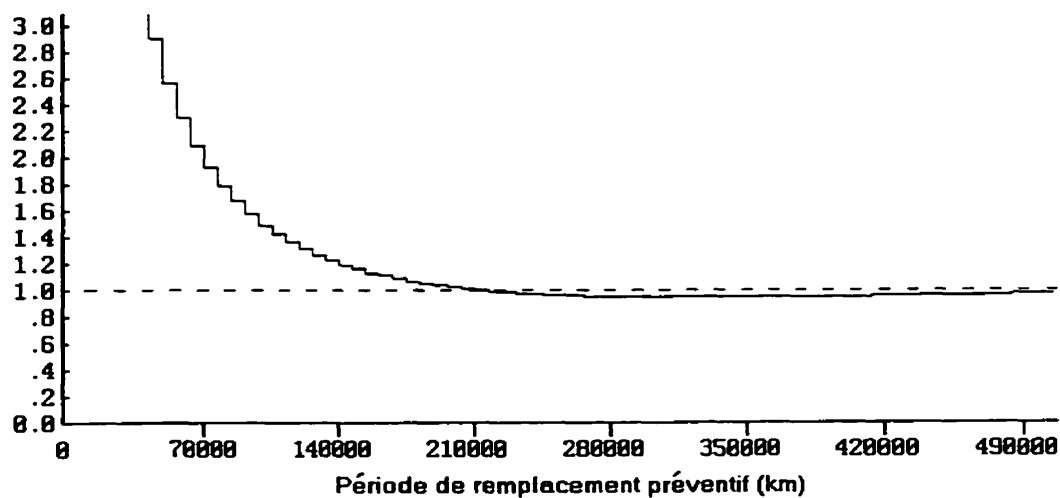


Figure D.4: Optimisation par le coût

D.1.8- Soufflante modèle 1

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

SOUF 6V71 1p	
Preventive Replacement Cost	439.00
Failure Replacement Cost	909.00
Cheapest Preventive Replacement Age (KILOMETRES)	184000.00
Cost \$/KILOMETRES is then .....	.0049
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure .....	.0053
Saving \$/KILOMETRES .....	.0003
Preventive Replacements as Percent of all Replacements.	42
Failure Replacements as Percent of all Replacements ...	58

Ratio du coût préventif

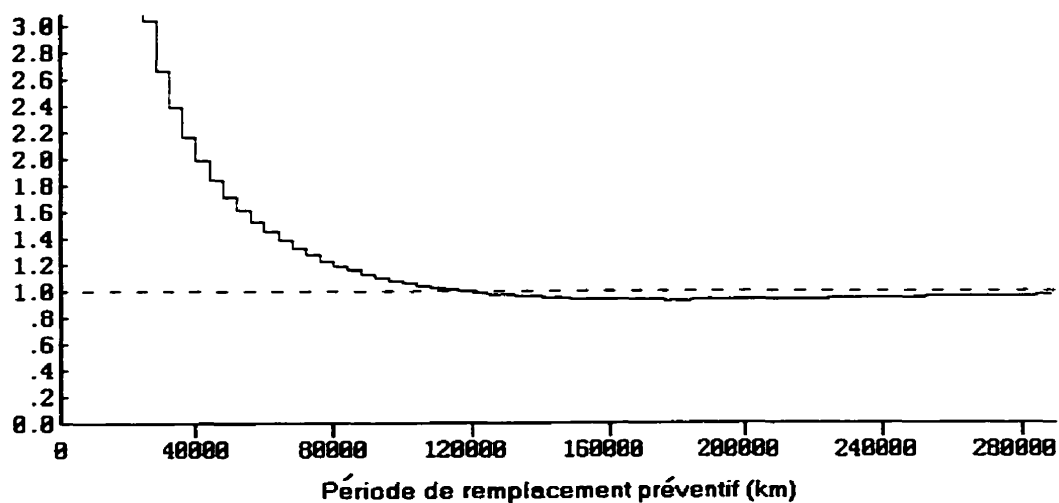


Figure D.5: Optimisation par le coût

D.1.9- Soufflante modèle 2

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

SOUF 6V92 2p	
Preventive Replacement Cost	439.00
Failure Replacement Cost	909.00
Cheapest Preventive Replacement Age (KILOMETRES)	648000.00
Cost \$/KILOMETRES is then .....	.0024
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure .....	.0024
Saving \$/KILOMETRES .....	.0000
Preventive Replacements as Percent of all Replacements.	15
Failure Replacements as Percent of all Replacements ...	85

Ratio du coût préventif

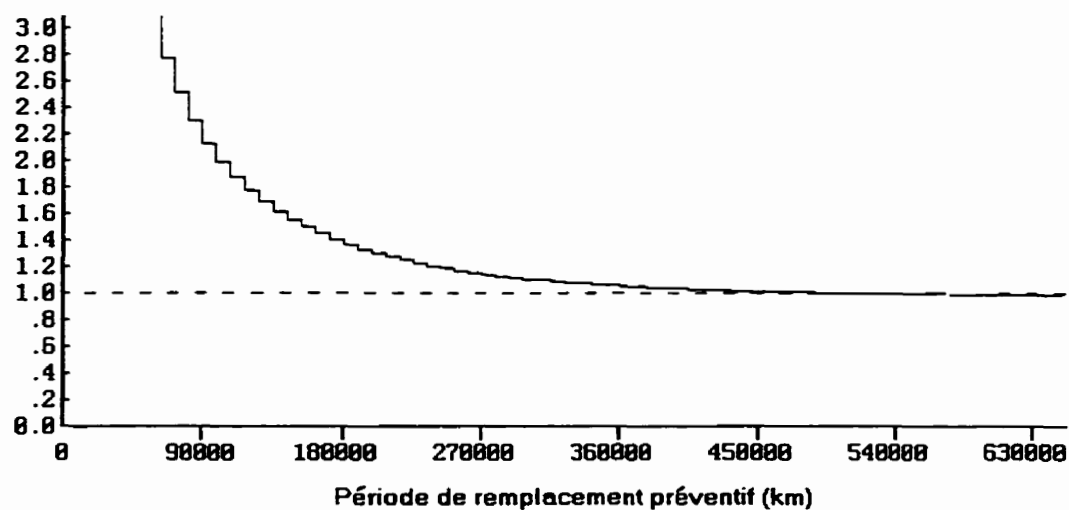


Figure D.6: Optimisation par le coût

D.1.10- Transmission modèle 1

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

TRAN V730-D 1p	
Preventive Replacement Cost	2574.00
Failure Replacement Cost	3044.00
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure.....	.01
The Cheapest Policy is to Replace Only On Failure	

D.1.11- Transmission modèle 2

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

TRAN V731-D 2p	
Preventive Replacement Cost	2574.00
Failure Replacement Cost	3044.00
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure.....	.01
The Cheapest Policy is to Replace Only On Failure	

D.1.12- Transmission modèle 3

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

TRAN VR731-D	
Preventive Replacement Cost	958.00
Failure Replacement Cost	1428.00
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure.....	.01
The Cheapest Policy is to Replace Only On Failure	

D.2 Unités contrôlées

D.2.1- Boyaux du moteur modèle 1

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

BOCM mod 1P	
Preventive Replacement Cost	338.00
Failure Replacement Cost	808.00
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure.....	.00
The Cheapest Policy is to Replace Only On Failure	

D.2.2- Boyaux du moteur modèle 2

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

BOCM mod 2P	
Preventive Replacement Cost	338.00
Failure Replacement Cost	808.00
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure.....	.00
The Cheapest Policy is to Replace Only On Failure	

D.2.3- Compresseur d'air modèle 1

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

COMP TUFLO-700 1p	
Preventive Replacement Cost	301.00
Failure Replacement Cost	771.00
Cheapest Preventive Replacement Age (KILOMETRES)	152000.00
Cost \$/KILOMETRES is then .....	.0051
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure .....	.0054
Saving \$/KILOMETRES .....	.0003
Preventive Replacements as Percent of all Replacements.	41
Failure Replacements as Percent of all Replacements ...	59

Ratio du coût préventif

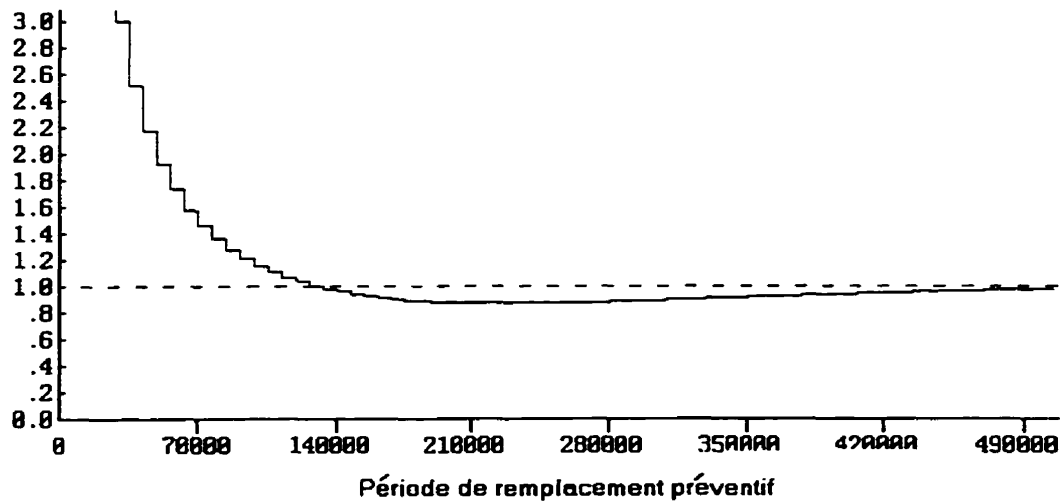


Figure D.7: Optimisation par le coût

D.2.4- Compresseur d'air modèle 2

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

COMP TUFLO-750 2p	
Preventive Replacement Cost	301.00
Failure Replacement Cost	771.00
Cheapest Preventive Replacement Age (KILOMETRES)	180000.00
Cost \$/KILOMETRES is then .....	.0054
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure .....	.0056
Saving \$/KILOMETRES .....	.0002
Preventive Replacements as Percent of all Replacements.	28
Failure Replacements as Percent of all Replacements ...	72

Ratio du coût préventif

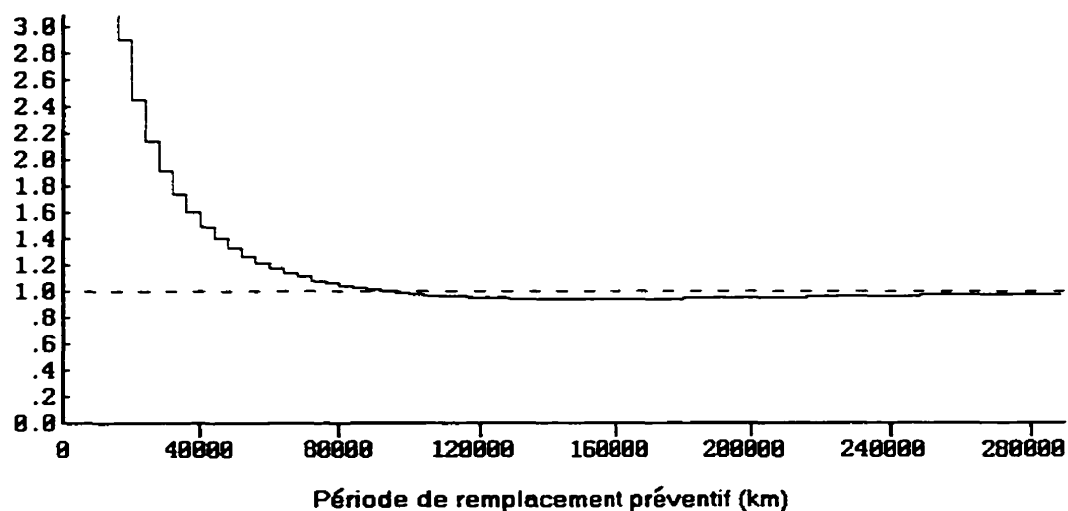


Figure D.8: Optimisation par le coût

D.2.5- Démarreur modèle 1

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

DEMA 6V71 1p		
Preventive Replacement Cost	218.00	
Failure Replacement Cost	688.00	
Cheapest Preventive Replacement Age (KILOMETRES)	225000.00	
Cost \$/KILOMETRES is then .....	.0029	
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure .....	.0031	
Saving \$/KILOMETRES .....	.0002	
Preventive Replacements as Percent of all Replacements.	42	
Failure Replacements as Percent of all Replacements ...	58	

Ratio du coût préventif

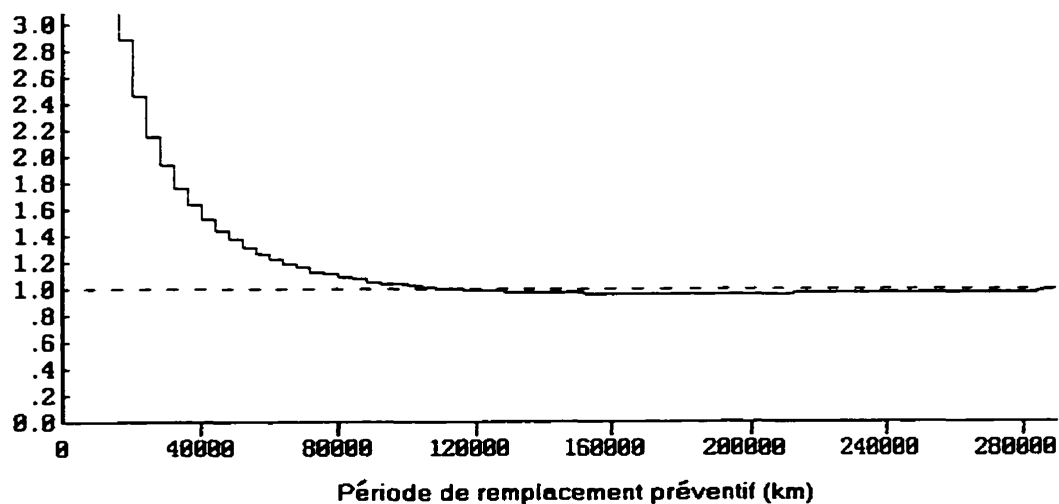


Figure D.9: Optimisation par le coût

D.2.6- Démarreur modèle 2

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

DEMA 6V92 2p	
Preventive Replacement Cost	218.00
Failure Replacement Cost	688.00
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure.....	.00
The Cheapest Policy is to Replace Only On Failure	

D.2.7- Pompe à eau modèle 1

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

Preventive Replacement Cost		163.00
Failure Replacement Cost		633.00
Cheapest Preventive Replacement Age ()		92000.00
Cost \$/ is then .....		.0028
Cost \$/ for Replacement Only On Failure .....		.0044
Saving \$/ .....		.0016
Preventive Replacements as Percent of all Replacements.		83
Failure Replacements as Percent of all Replacements ...		17

Ratio du coût préventif

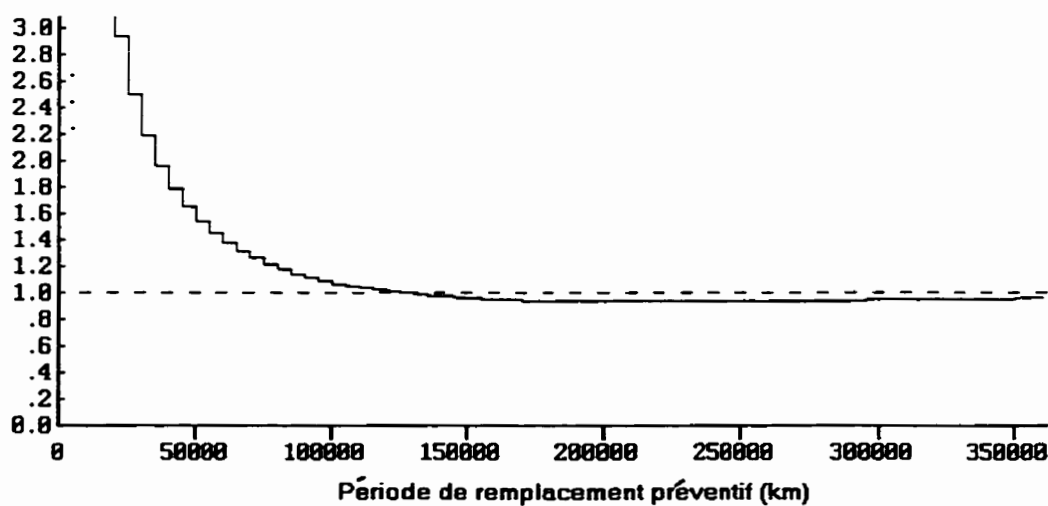


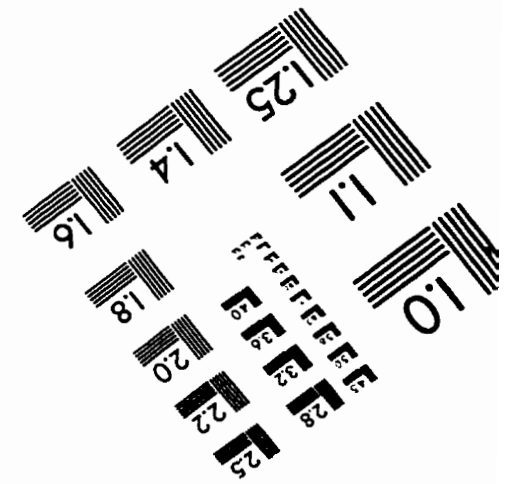
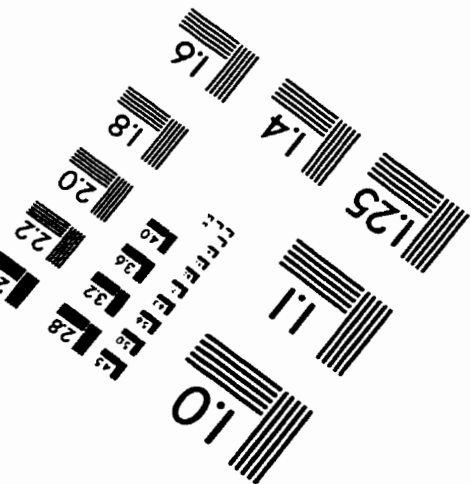
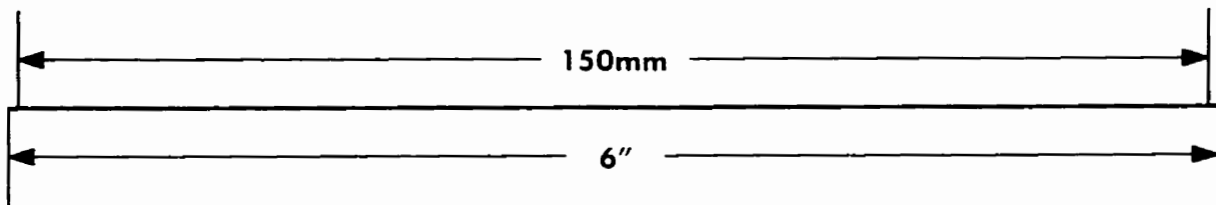
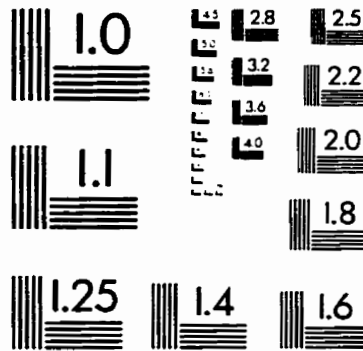
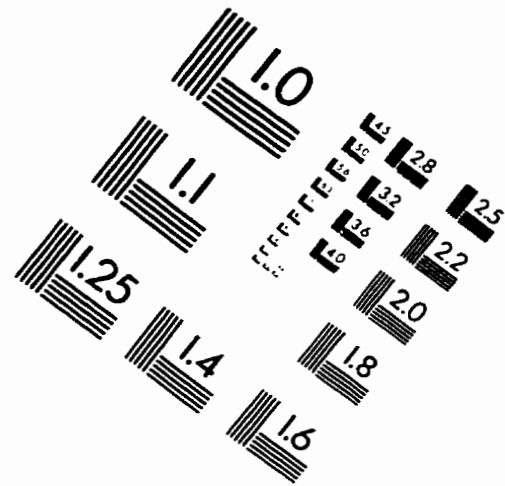
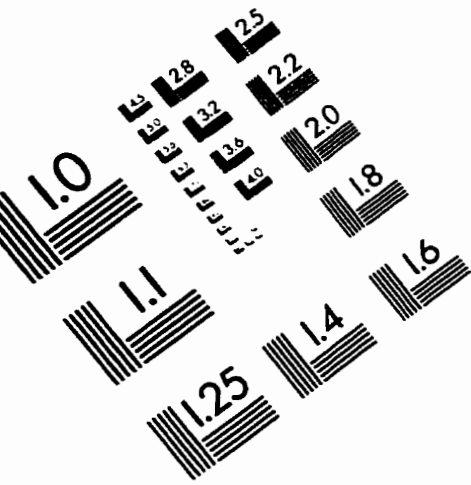
Figure D.10: Optimisation par le coût

D.2.8- Pompe à eau modèle 2

CHEAPEST AGE-BASED REPLACEMENT POLICY

PEAU 6V92 2P	
Preventive Replacement Cost	163.00
Failure Replacement Cost	633.00
Cost \$/KILOMETRES for Replacement Only On Failure.....	.00
The Cheapest Policy is to Replace Only On Failure	

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc.
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved