HAL open science

Modélisation et optimisation de la maintenance et de la surveillance des systèmes multi-composants - Applications à la maintenance et à la conception de véhicules industriels

Romain Lesobre

▶ **To cite this version:**

Romain Lesobre. Modélisation et optimisation de la maintenance et de la surveillance des systèmes multi-composants - Applications à la maintenance et à la conception de véhicules industriels. Automatique / Robotique. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. NNT : 2015GREAT022 . tel-01169295

HAL Id: tel-01169295

https://theses.hal.science/tel-01169295v1

Submitted on 2 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Automatique - Productique**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Romain LESOBRE

Thèse dirigée par **Christophe BERENGUER** et
codirigée par **Vincent COCQUEMPOT**

préparée au sein du **Laboratoire Grenoble, Images, Parole, Signal, Automatique (GIPSA-lab)**
dans **l'École Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal (EEATS)**

Modélisation et optimisation de la maintenance et de la surveillance des systèmes multi-composants

Applications à la maintenance et à la conception de véhicules industriels

Thèse soutenue publiquement le **26 Mars 2015**,
devant le jury composé de:

Mr. Bruno CASTANIER
Professeur des Universités, Université d'Angers, Rapporteur
Mr. François PERES
Professeur des Universités, ENI Tarbes, Rapporteur
Mr. Antoine GRALL
Professeur des Universités, UTT, Examinateur
Mr. Van Phuc DO
Maître de Conférences, Université de Lorraine, Examinateur
Mme. Keomany BOUVARD
Ingénieur recherche (Dr.), Volvo, Examinateur
Mme. Anne BARROS
Professeur des Universités, NTNU Trondheim, Invitée & Co-encadrante
Mr. Vincent COCQUEMPOT
Professeur des Universités, Université Sciences et Technologies Lille 1, Co-directeur de thèse
Mr. Christophe BERENGUER
Professeur des Universités, Grenoble INP, Directeur de thèse

Résumé

Ces travaux de thèse traitent des problèmes de maintenance associés aux véhicules industriels. Ils se concentrent sur la planification des opérations de maintenance et sur le développement d'une méthodologie de conception pour la maintenance. Le but est de proposer une offre de maintenance personnalisée en fonction de chaque véhicule et capable de s'adapter aux contraintes des utilisateurs. Dans l'industrie du transport, ces contraintes se caractérisent par un nombre d'opportunités de maintenance limité et des immobilisations à fortes conséquences financières. Cette offre a vocation à garantir un niveau de disponibilité élevé tout en réduisant l'impact de la maintenance sur les coûts globaux d'exploitation.

Dans ce cadre, la politique de maintenance développée vise à assurer, moyennant un certain risque, l'autonomie d'un système multi-composant sur des périodes d'opérations données. Pendant ces périodes, aucune opération de maintenance et aucune défaillance du système ne doivent venir perturber la réalisation des missions. A la fin de chaque période, la politique considérée évalue la nécessité d'une intervention de maintenance pour assurer la prochaine période avec un niveau de confiance spécifié. Lorsque la maintenance est jugée indispensable, des critères intégrant les coûts et l'efficacité de la maintenance sont introduits pour sélectionner les opérations à réaliser.

Cette forme originale de regroupement dynamique s'appuie à la fois sur les modèles de fiabilité des composants, sur la structure fiabiliste du système et sur les informations de surveillance disponibles en ligne. Celles-ci se composent d'informations liées à l'état de santé des composants mais également à leurs conditions d'utilisation. La flexibilité du processus permet d'intégrer, dans la décision, des niveaux d'informations différents suivant les composants. Les paramètres de cette politique, à savoir la longueur de la période et le niveau de confiance, sont optimisés en fonction du coût total de maintenance. Ce coût, évalué sur un horizon fini, intègre les coûts directs associés aux opérations de maintenance et les coûts indirects engendrés par les immobilisations.

Pour envisager une réduction significative des coûts d'exploitation du système, l'optimisation de la politique de maintenance seule ne suffit pas. Il est primordial de mener une réflexion plus large associant le système et sa maintenance dès la conception. Pour diriger cette réflexion, la méthodologie de conception proposée hiérarchise, à l'aide d'un facteur d'importance original, l'impact des composants sur les coûts d'exploitation. Différentes options de conceptions sont ensuite évaluées, par simulation, sur les composants jugés prioritaires. Les options retenues conduisent à réduire les coûts globaux d'exploitation.

Des résultats de simulation permettent d'illustrer les méthodes développées. Une application sur un sous-système du véhicule industriel est également réalisée.

Abstract

This thesis research work focuses on the maintenance operations scheduling and the development of a design methodology for maintenance. The aim is to suggest a customized maintenance service offer for each vehicle and able to adapt to user constraints. In the transport industry, these constraints are defined by a limited number of maintenance opportunities and vehicle unplanned stops with significant financial consequences. This service offer should enable both to improve the vehicle uptime and to reduce the maintenance impact on operating costs.

In this framework, the developed maintenance policy ensures, with a given risk probability, maintenance free operating periods for a multi-component system. During these periods, the system should be able to carry out all its assigned missions without maintenance actions and system fault. At the end of each period, the considered policy evaluates if a maintenance action is required to ensure maintenance-free and fault-free operation on the next period with a specified confidence level. When a maintenance action is mandatory, decision criteria considering the maintenance costs and the maintenance efficiency are used to select the operations to be performed.

This form of dynamic clustering, called time-driven clustering, integrates both the component reliability models, the system structure and the available monitoring information. In our case, the monitoring information refers to the component state information and information on the component operating conditions. The process flexibility makes possible to make a maintenance decision in using different information levels for system components. The policy parameters, namely the period length and the confidence level value, are optimized based on the total maintenance cost. This cost, evaluated on a finite horizon, is composed of directs costs related to maintenance operations and indirect costs generated by system immobilizations.

In order to reach a significant operating costs reduction, the maintenance policy optimization alone is not sufficient. It is essential to have a broader approach to involve the system and its maintenance since the conception. In this context, the developed design methodology suggests to prioritize the components impact on the operating costs. This prioritization is performed thanks to a defined importance factor. Then, multiple design options are evaluated by simulation in priority component. The selected options lead to reduce the operating costs.

This work contains simulation results that illustrate the methods mentioned above. Moreover, a heavy vehicle sub-system is used as a test-case.

Résumé vulgarisé

Ces travaux traitent des problèmes de maintenance associés aux véhicules industriels. Le but est de proposer aux utilisateurs une offre de maintenance personnalisée et adaptée à leurs contraintes tout en réduisant l'impact sur les coûts d'exploitation. Dans ce cadre, une politique originale de regroupement dynamique qui utilise à la fois les informations de surveillance disponibles et la connaissance du système multi-composant est développée. Elle vise à garantir à l'utilisateur l'autonomie de son système sur des périodes d'opérations données tout en minimisant le coût total de maintenance. Pour réduire significativement les coûts d'exploitation, l'optimisation de la politique de maintenance seule ne suffit pas. Une réflexion plus large associant le système et sa maintenance est primordiale dès la conception. Une méthodologie est ainsi proposée pour évaluer différentes options de conception et retenir celles qui minimisent les coûts d'exploitation.

Abstract

This thesis deals with the maintenance issues of commercial heavy vehicles. The main objective is to suggest to customers a customized maintenance service offer, adapted to theirs constraints and able to reduce the impact on operating costs. In this framework, a maintenance policy based on dynamic operations clustering is developed by using the component reliability models, the multi-component system structure and the available monitoring information. This policy aims at ensuring maintenance free operating periods for a multi-component system in minimizing the total maintenance cost. In order to reach a significant operating costs reduction, the maintenance policy optimization alone is not sufficient. It is essential to have a broader vision to involve the system and its maintenance since the conception. A methodology is proposed to evaluate multiple design options and select the ones that reduce the operating costs.

Table des matières

Résumé iii
Abstract v
Résumé vulgarisé vii
Table des matières ix
Table des figures xv
Table des tableaux xix
Abréviations et Notations xxi
Chapitre 1 1
Introduction générale 1
1.1 Panorama du transport routier 1
1.1.1 Etat des lieux en quelques chiffres 1
1.1.2 Coût d'exploitation : un indicateur clé 2
1.2 La maintenance dans le groupe AB Volvo 4
1.2.1 Principaux acteurs 4
1.2.2 Elaboration des contrats d'entretien 6
1.2.3 Construction du planning de maintenance 8
1.3 Vers une amélioration de l'offre de service 10
1.3.1 Besoins des utilisateurs: évolutions 10
1.3.2 Cahier des charges 11
1.4 Le projet MoDe: une première réponse 13
1.4.1 Objectifs du projet 13
1.4.2 Algorithme de planification dynamique 15
1.4.3 Résultats et limites 16
1.5 Contribution de la thèse 18
1.5.1 Objectifs industriels 18
1.5.2 Enjeux méthodologiques 19
1.6 Plan de la thèse 21
Chapitre 2 23
Modélisation de la fiabilité des systèmes 23
2.1 Rappels de fiabilité 23

2.1.1 Fiabilité et sûreté de fonctionnement 23
2.1.2 Fiabilité et grandeurs caractéristiques 25
2.1.3 Fiabilité et méthodes d'évaluation 28
2.2 Modèles de survie 29
2.2.1 La loi exponentielle 30
2.2.2 La loi de Weibull 31
2.2.3 Autres lois usuelles 32
2.2.4 Modèles de survie et environnement dynamique 34
2.3 Modèles de dégradation 35
2.3.1 Différentes classes de dégradation 35
2.3.2 Processus de Lévy 37
2.3.3 Dégradation et environnement dynamique 39
2.4 Fiabilité des systèmes 39
2.4.1 Analyse et représentation de la structure fiabiliste 40
2.4.2 Calculs de fiabilité pour des structures élémentaires 41
2.5 Conclusion 43
Chapitre 3 45
Modélisation de la maintenance 45
3.1 Notions générales 45
3.1.1 Types de maintenance 46
3.1.2 Moyens d'action de la maintenance 48
3.1.3 Evaluation et optimisation des performances 49
3.2 Maintenance et surveillance 51
3.2.1 Informations de surveillance 51
3.2.2 Surveillance et processus de décision 54
3.3 Politiques de maintenance appliquées à un composant élémentaire 56
3.3.1 Politiques basées sur la loi de durée de vie du composant 56
3.3.2 Politiques basées sur l'état courant du composant 59
3.4 Maintenance des systèmes multi-composant 62
3.4.1 Politiques de regroupement stationnaires 63
3.4.2 Politiques de regroupement dynamiques 64
3.5 Conclusion 65

Chapitre 4 67
Politique de maintenance dynamique basée sur le concept de la MFOP 67
4.1 Concept de la MFOP 67
4.1.1 Définitions générales 68
4.1.2 La MFOP dans la littérature 69
4.2 Description de la politique de maintenance 71
4.2.1 Processus de décision de maintenance 72
4.2.2 Evaluation de la politique de maintenance 74
4.3 Sélection des opérations de maintenance 76
4.3.1 Définition des critères de décision 77
4.3.2 Dépendances des opérations de maintenance 79
4.3.3 Méthodes de résolution 80
4.4 Illustration 84
4.4.1 Définition du système et convergence 84
4.4.2 Evaluation de l'algorithme génétique 86
4.4.3 Comparaison des critères de décision 87
4.5 Conclusion 89
Chapitre 5 91
Prise en compte de l'information de surveillance pour la maintenance 91
5.1 Surveillance et état de santé des composants 91
5.1.1 Définition des niveaux de surveillance considérés 92
5.1.2 Intégration dans le processus de décision 93
5.1.3 Impact sur les coûts de maintenance 98
5.2 Surveillance et conditions d'utilisations des composants 99
5.2.1 Conditions d'utilisation: Définition et problématique 100
5.2.2 Conditions d'utilisation et modèles de durée de vie 101
5.2.3 Conditions d'utilisation et modèles de dégradation 105
5.3 Exemple numérique 108
5.3.1 Procédure de simulation 108
5.3.2 Description des cas de surveillance considérés 110
5.3.3 Présentation du système étudié 112
5.3.4 Résultats et analyses 113

5.4 Conclusion 115
Chapitre 6 117
Méthodologie de conception pour la maintenance 117
6.1 Maintenance et conception: le duo gagnant 117
6.1.1 Place de la maintenance: évolution 118
6.1.2 MFOP et problématiques de conception 120
6.2 Présentation de la méthodologie développée 122
6.2.1 Description générale 122
6.2.2 Une boite à outils pour la conception 124
6.3 Priorisation des actions de conception 126
6.3.1 Facteurs d'importance fiabilistes et coût de maintenance 126
6.3.2 Un facteur d'importance basé sur les coûts 127
6.4 Illustration 129
6.4.1 Définition du système de référence 130
6.4.2 Résultats initiaux 131
6.4.3 Recommandations pour la conception 132
6.5 Conclusion 137
Chapitre 7 139
Application à un sous-système du véhicule industriel 139
7.1 Présentation du contexte de notre étude 139
7.1.1 Sélection du système multi-composant 139
7.1.2 Inventaire des données disponibles 140
7.1.3 Nettoyage des données disponibles 141
7.2 Construction du modèle de maintenance 145
7.2.1 Modélisation de la fiabilité du système 145
7.2.2 Modélisation de la politique de maintenance 148
7.3 Analyse et comparaison des résultats 149
7.3.1 Définition du système 150
7.3.2 Résultats issus du modèle de maintenance 150
7.3.3 Comparaison avec la politique actuelle 151
7.4 Conclusion 153
Chapitre 8 155

Conclusions et perspectives 155
8.1 Conclusions 155
8.2 Perspectives 158
Bibliographie 161

Table des figures

Figure 1.1: Répartition des modes de transport terrestre de marchandises dans l'Union Européenne en 2012 2
Figure 1.2: Les coûts annuels d'exploitation dans le transport longue distance en 2013 3
Figure 1.3: Les parties prenantes de la maintenance et leurs interactions 5
Figure 1.4: La disponibilité opérationnelle sur un cycle d'utilisation du véhicule 7
Figure 1.5: Illustration de la fonction "Automerge" 9
Figure 1.6: La maintenance dans le cycle de vie du système 13
Figure 1.7: Consortium du projet MoDe 14
Figure 1.8: Plateforme de maintenance du projet MoDe 14
Figure 1.9: Méthode de planification dynamique et adaptative 16
Figure 2.1: Les concepts associés à la SdF 24
Figure 2.2: Densité de probabilité et fonction de répartition 25
Figure 2.3: Allure générale du taux de défaillance 27
Figure 2.4: Fonctionnement d'une entité à deux états 29
Figure 2.5: Taux de défaillance de la loi de Weibull, $\lambda = 1$ 32
Figure 2.6: Forme générale du taux de défaillance d'une loi Lognormale 33
Figure 2.7: Représentation d'un modèle à dégradation discrète 36
Figure 2.8: Représentation d'un modèle à dégradation continue 36
Figure 2.9: Illustration de trajectoires de dégradation issues d'un processus Gamma de paramètre $\alpha = 2$ et $\beta = 4$ 38
Figure 2.10: Représentation d'un diagramme de fiabilité 40
Figure 2.11: Diagramme de fiabilité d'un système série 42
Figure 2.12: Diagramme de fiabilité d'un système parallèle 42
Figure 3.1: Les différents types de maintenance 46
Figure 3.2: Equilibre entre maintenance préventive et maintenance corrective 50
Figure 3.3: Illustration de la mise à jour de la fiabilité conditionnelle basée sur les informations de surveillance 55
Figure 3.4: Schéma d'une politique de maintenance basée sur l'âge 57
Figure 3.5: Coûts moyens asymptotiques de maintenance pour une politique de maintenance basée sur l'âge 58
Figure 3.6: Schéma d'une politique de remplacement par bloc 58
Figure 3.7: Schéma d'une politique de maintenance conditionnelle 60
Figure 3.8: Schéma d'une politique de maintenance prévisionnelle basée sur le risque 61
Figure 4.1: Motivations pour la MFOP 69
Figure 4.2: Evolution de la $MFOPS$ sur plusieurs cycles de MFOP 70
Figure 4.3: Synthèse de la politique de maintenance proposée 73
Figure 4.4: Détermination de $DR(X)$ 78
Figure 4.5: Description de l'algorithme génétique 82

Figure 4.6: Structure du système multi-composant 84
Figure 4.7: Illustration de la convergence de l'estimation du C_{TM} en fonction du nombre d'histoires (MFOP=10000 km et un NC=80%) 85
Figure 4.8: Illustration de la convergence de l'estimation du C_{TM} en fonction du nombre d'histoires (MFOP=50000 km et un NC=90%) 85
Figure 4.9: Répartition des C_{TM} pour les deux couples de paramètres MFOP et NC 86
Figure 4.10: Evolution du C_{TM} moyen pour les différents couples de paramètres considérés avec le critère $J1$ 87
Figure 4.11: Répartition des C_{TM} moyens sur l'ensemble des couples de paramètres considérés pour les critères $J1$ et $J3$ 88
Figure 5.1: Evolution de la dégradation des composants du système (Exemple 1) 95
Figure 5.2: Densité de probabilité conditionnelle du système en fonction du niveau d'information (Exemple 1) 95
Figure 5.3: $MFOPS$ du système à $t = 60\ 000\text{km}$ en fonction du niveau d'information disponible (Exemple 1) 96
Figure 5.4: Evolution de la dégradation des composants du système (Exemple 2) 96
Figure 5.5: Densité de probabilité conditionnelle du système en fonction du niveau d'information (Exemple 2) 97
Figure 5.6: $MFOPS$ du système à $t = 60\ 000\text{km}$ en fonction du niveau d'information disponible (Exemple 2) 97
Figure 5.7: Structure du système multi-composant 98
Figure 5.8: Illustrations de l'environnement opérationnel d'un véhicule industriel 100
Figure 5.9: Répartition des pannes pour le composant i 104
Figure 5.10: Modèles de durée de vie obtenus avec $s = 1$ et $s = 2$ 104
Figure 5.11: Allocation des pannes répertoriées dans la base de données simulée 105
Figure 5.12: Comparaison entre la fonction de répartition empirique et l'approximation proposée (FR=Fonction de répartition) 107
Figure 5.13: Dégradation d'un composant dans un environnement dynamique (Env. N = Environnement normal, Env. S = Environnement stressé) 109
Figure 5.14: Définition de la structure du système multi-composant étudié 112
Figure 5.15: Evolution du C_{TM} moyen en fonction des paramètres MFOP/NC considérés (Cas 1) 113
Figure 6.1: Conception pour la maintenance 119
Figure 6.2: Méthodologie de conception proposée par Relf 120
Figure 6.3: Méthodologie de conception pour la maintenance 122
Figure 6.4: Boite à outils de conception pour la maintenance 124
Figure 6.5: Structure du système multi-composant de référence 130
Figure 6.6: Coûts d'exploitation du système pour différents niveaux de confiance 131
Figure 6.7: Modèles de fiabilité des composants du système 132
Figure 6.8: Coûts d'exploitation du système pour différentes propositions de conception . 133
Figure 6.9: Coûts d'exploitation du système pour différentes propositions de conception . 134

Figure 7.1: Diagramme de fiabilité du système retenu pour l'application 140
Figure 7.2: Illustration des valeurs aberrantes rencontrées sur les données disponibles 142
Figure 7.3: Illustration des données complètes et incomplètes 143
Figure 7.4: Régression linéaire robuste appliquée à un véhicule donné 144
Figure 7.5: Fonction de répartition obtenue pour le composant $A2$ avec prise en compte des données de survie censurées 146
Figure 7.6: Fonctions de répartition obtenues avec et sans prise en compte des données de survie censurées pour le composant $A2$ 147
Figure 7.7: Fonctions de répartition obtenues avec et sans prise en compte des données de survie censurées pour le composant $A4$ 148
Figure 7.8: Diagramme de fiabilité du système utilisé pour la décision de maintenance 149
Figure 7.9: Coût total de maintenance pour différents niveaux de confiance 151
Figure 7.10: Politique de maintenance conditionnelle appliquée sur les composants $\{\mathrm{A15}, \mathrm{A16}, \mathrm{A17}, \mathrm{A18}\}$ 152

Table des tableaux

Tableau 1.1: Définition des intervalles de maintenance 8
Tableau 4.1: Propriétés des composants du système (W=Loi de Weibull, G=Processus Gamma, L=Limite de dégradation) 84
Tableau 4.2: Comparaison des différents indicateurs pour les critères considérés 88
Tableau 5.1: Définition des niveaux d'informations relatifs à l'état des composants 92
Tableau 5.2: Comparaison des C_{TM} optimaux suivant les hypothèses de surveillance considérées 99
Tableau 5.3: Evolution du C_{TM} pour trois scénarii fixés 99
Tableau 5.4: Définition des différents cas de surveillance considérés 110
Tableau 5.5: Propriétés des composants du système (W=Loi de Weibull, G=Processus Gamma, L=Limite de dégradation) 112
Tableau 5.6: Comparaison des différents cas de surveillance considérés 114
Tableau 6.1: Propriétés des composants du système (W=Loi de Weibull, G=Processus Gamma, L=Limite de dégradation) 130
Tableau 6.2: Facteurs d'importance pour le système de référence (MFOP=50000; NC=80) 131
Tableau 6.3: Caractéristiques des composants appartenant au premier groupe 133
Tableau 6.4: Caractéristiques des composants appartenant au second groupe 134
Tableau 6.5: Facteurs d'importance pour le système après remplacement du composant $A1$ par la Conception 4 (MFOP=50000; NC=80) 135
Tableau 6.6: Facteurs d'importance pour le système après ajout d'un capteur sur le composant $A1$ (MFOP=50000; NC=80) 135
Tableau 6.7: Facteurs d'importance pour le système après ajout d'une redondance sur le composant $A1$ (MFOP=50000; NC=80) 136
Tableau 6.8: Facteurs d'importance pour le système après amélioration de l'accessibilité du composant $A1$ (MFOP=50000; NC=80) 137
Tableau 7.1: Propriétés des composants du système (W=Loi de Weibull, G=Processus Gamma, L=Limite de dégradation) 150
Tableau 7.2: Comparaison de C_{TM} des deux politiques de maintenance considérées 153

Abréviations et Notations

A_i	Composant i
ABAO	As Bad As Old
AG	Algorithme Génétique
AGAN	As Good As New
c	Coût unitaire de remplacement d'une entité
$C(t)$	Coût global cumulé sur une durée d'exploitation t
$C_{Ex}(t)$	Coût d'exploitation du système sur l'intervalle de temps [0, t]
C_i	Coût du composant i
C_I	Coûts initiaux du système
$C_{I,a}$	Coût initial du composant a
c_{insp}	Coût d'une inspection
C_{Log}	Coût logistique lié à l'entrée du système en atelier de maintenance
$C_{NI,i}$	Coût lié au niveau d'information disponible sur le composant i
$C_R(t)$	Coût de remplacement des composants du système sur [0, t]
$C_{R,a}(t)$	Coût associé aux remplacements du composant a sur l'intervalle de temps [0, t]
C_{Remor}	Coût de remorquage du système
$C_{SC}(t)$	Surcoût lié à la maintenance corrective lorsque le système est en panne sur l'intervalle de temps [0, t]
$C_{SC,a}(t)$	Surcoût correctif pour le système lié à la panne du composant a sur l'intervalle de temps [0, t]
C_{SC}^l	Surcoût correctif lié à la panne l du système
$C_{SD}(t)$	Surcoût lié au diagnostic lorsque le système est en panne sur l'intervalle de temps [0, t]
$C_{SD,a}(t)$	Surcoût lié au diagnostic du composant a sur l'intervalle de temps [0, t]
$C_{TM}(t)$	Coût total de maintenance du système sur l'intervalle de temps [0, t]
$C_{TM,a}(t)$	Coût total de maintenance du composant a sur l'intervalle de temps [0, t]
C_{UD}	Coût unitaire de diagnostic pour un composant
C_∞	Coût moyen asymptotique
CM_l	Coupe minimale responsable de la panne l du système
D_i	Durée de remplacement du composant i
D_{Log}	Durée logistique de prise en charge du système à son entrée en atelier
D_{Remor}	Durée de remorquage du système
$D_{TM}(t)$	Durée totale de maintenance sur l'intervalle de temps [0, t]
D_{UD}	Durée unitaire de diagnostic pour un composant
$DR(X)$	Distance restante en kilomètres avant que la fiabilité conditionnelle du système n'atteigne le niveau de confiance spécifié NC (pour un ensemble de remplacement X)
DS_v	Durée économisée si la maintenance est effectuée simultanément sur les composants d'un ensemble U_v
$f(t)$	Densité de probabilité d'une entité
$F(t)$	Fonction de répartition d'une entité

$H_{i,t}$	Information disponible sur l'état de santé du composant i à l'instant t
$Horizon$	Horizon de simulation
$I_a(t)$	Ratio des coûts d'exploitation engendrés par le composant a sur l'ensemble des coûts sur l'intervalle de temps [0, t]
J	Critère de décision de maintenance
k	Coût additionnel
L	Seuil limite de dégradation d'une entité
$L(X_1, \dots X_N\,;\phi)$	Fonction de vraisemblance
M_l	Ensemble comprenant les remplacements effectués pendant un arrêt de maintenance l
MAP	Maximum A Posteriori
MFOP	Maintenance Free Operating Period
$MFOPS$	Maintenance Free Operating Period Survivability
$MFOPS(X,t)$	$MFOPS$ du système à t après remplacement de l'ensemble X
MRP	Maintenance Recovery Period
$MTTF$	Mean Time To Failure
n	Nombre de composants dans le système
$N_{AM}(t)$	Nombre d'arrêts de maintenance sur l'intervalle de temps [0, t]
N_{CM_l}	Nombre de composants dans CM_l
$N_{cor}(t)$	Nombre de remplacements correctifs sur l'intervalle $[0,t]$
N_d	Nombre de données
$N_{insp}(t)$	Nombre d'inspections sur l'intervalle $[0,t]$
N_{M_l}	Nombre de composants dans l'ensemble M_l
$N_{prev}(t)$	Nombre de remplacements préventifs sur l'intervalle $[0,t]$
$N_P(t)$	Nombre de pannes du système sur l'intervalle de temps [0, t]
N_{SIF}	Nombre de composants dans le système dont l'information de surveillance (état de fonctionnement) n'est pas disponible
NC	Niveau de confiance
O	Opportunité de maintenance
$P\ et\ Q$	Populations (Parents et enfants) dans l'algorithme génétique
r	Seuil limite de risque
R^2	Coefficient de détermination
$R(t)$	Fiabilité d'une entité
$R_i(t)$	Fiabilité du composant i
$R_{syst}(t)$	Fiabilité du système
RRW	Risk Reduction Worth
RUL_r	Durée de vie résiduelle d'une entité pour un risque r donné
T	Durée de fonctionnement d'une entité avant observation de la défaillance
T_{cycle}	Durée ou distance totale du cycle
T_i	Durée de bon fonctionnement du composant i
T_{syst}	Durée de bon fonctionnement du système
T_0	Période de remplacement
T_0^*	Période de remplacement optimale
U_v	Ensemble incluant le $v$ième ensemble d'opérations de maintenance dépendantes

$z(t)$	Taux de défaillance d'une entité
$Z(t)$	Niveau de dégradation d'une entité
Z^{prev}	Seuil préventif de dégradation
α	Paramètre de forme du processus Gamma
β	Paramètre d'échelle du processus Gamma
$\Gamma(.)$	Fonction gamma
δ	Variable binaire
η	Paramètre de forme de la loi de Weibull
θ	Paramètre de la loi exponentielle
$\bar{\vartheta}$	Moyenne des variables ϑ_e
ϑ_e	Fréquence relative associée à la donnée e
$\widehat{\vartheta_e}$	Estimation de la variable ϑ_e
λ	Paramètre d'échelle de la loi de Weibull
π_ε	Proportion de la ε-ième sous-population dans le mélange
ρ_{aB}	Probabilité a posteriori que l'individu a soit dans la population B
τ	Période d'inspection
τ_I	Coût de la perte d'exploitation par heure d'immobilisation
$\tau_{i,panne}^S$	Ratio de la distance passée par un composant i dans un environnement « stressé » sur la distance totale parcourue à la panne
$\tau_{i,t}^S$	Ratio de la distance passée par un composant i dans un environnement « stressé » sur la distance totale parcourue à l'instant t
τ_{MO}	Taux horaire de la main d'œuvre
Ψ_{CD}	Ensemble de données censurées à droite
Ψ_{NC}	Ensemble de données non censurées

Chapitre 1

Introduction générale

Ce premier chapitre introduit les problématiques liées à la gestion des opérations de maintenance dans le secteur du transport routier. L'objectif est de présenter la situation et le positionnement actuel du groupe AB Volvo sur ces problématiques et l'environnement dans lequel il évolue.

La première partie dresse un panorama général de ce secteur d'activités. En s'appuyant sur quelques chiffres représentatifs, un état des lieux de ce secteur est réalisé. Nous illustrons ensuite l'impact de la maintenance sur les coûts d'exploitation. La deuxième partie traite de la maintenance des véhicules industriels. Nous commençons par présenter les principaux acteurs impliqués dans les activités de maintenance. Nous évoquons ensuite l'élaboration des contrats de maintenance et la méthode de planification actuellement utilisée. Dans une troisième partie, les objectifs du groupe AB Volvo concernant la maintenance et les services associés sont présentés. Nous débutons par une analyse des besoins des utilisateurs puis nous détaillons le cahier des charges spécifié par l'entreprise. La quatrième partie se concentre sur le projet européen Maintenance On Demand considéré comme une première réponse aux besoins des utilisateurs. Nous détaillons ensuite les principales contributions de ce travail de thèse. Enfin, la dernière partie se concentre sur l'organisation du mémoire.

1.1 Panorama du transport routier

Fin 2008, la crise financière mondiale a profondément ébranlé le secteur du transport et plus particulièrement le transport routier. Le groupe AB Volvo évalue la baisse d'activité sur le marché européen, toutes marques confondues, à environ 47% pendant cette période. Dans cette partie, nous dressons un panorama de ce secteur d'activités quelques années après le début de cette crise.

1.1.1 Etat des lieux en quelques chiffres

En 2012, le transport routier de marchandises représentait plus de 70% des activités de transport terrestre dans l'Union Européenne (Commission européenne, 2014). Comme le montre la figure 1.1 ci-dessous, ce mode de transport précède d'une manière assez nette le chemin de fer (17%) et les voies navigables (6%). Cette part du transport routier est restée assez stable au cours de ces dix dernières années.

Au niveau de l'activité, le transport de marchandises par route a représenté près de 1 700 milliards de tonnes-kilomètres dans l'Union Européenne en 2012. En comparaison, ce chiffre

est en baisse de 4% par rapport à 2004 et environ de 13% par rapport à 2007, année record pour cet indicateur.

Concernant les emplois dans l'Union, le secteur du transport routier de marchandises employait environ trois millions de personnes en 2011 réparties dans 600 000 entreprises. Globalement, entre 2005 et 2011, le nombre de salariés dans le secteur a augmenté malgré certaines baisses entre 2009 et 2010. En 2011, les résultats au niveau de l'emploi sont revenus à des niveaux observés avant la crise.

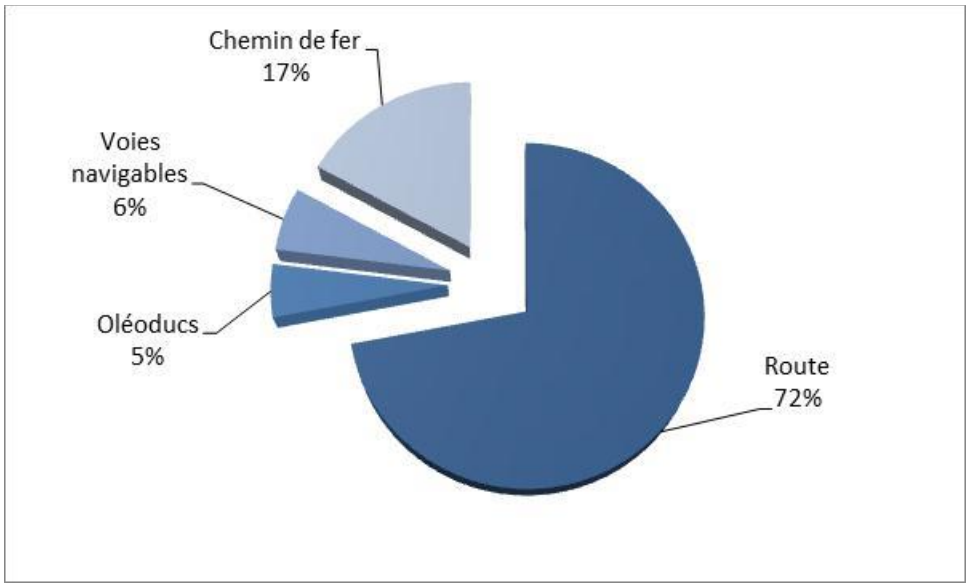

Figure 1.1: Répartition des modes de transport terrestre de marchandises dans l'Union Européenne en 2012 (Commission européenne, 2014)

Ce secteur d'activités a la réputation de s'adapter rapidement aux mutations de l'économie mondiale. Malgré un contexte économique encore fragile, le transport par route reste le mode privilégié pour transiter de grandes quantités de marchandises. Parmi les avantages énoncés, la flexibilité mais surtout le coût reviennent de façon récurrente. Pendant la période de ralentissement économique et encore aujourd'hui, les marges bénéficiaires des transporteurs se sont réduites. Cette pression sur les prix conduit les transporteurs à se focaliser de plus en plus sur les coûts d'exploitation pour pérenniser leurs activités.

1.1.2 Coût d'exploitation : un indicateur clé

Pour l'industrie du transport routier, le véhicule est perçu comme un véritable outil de travail permettant aux utilisateurs de réaliser des profits. Dans un secteur de plus en plus concurrentiel, la gestion du coût d'exploitation de leur matériel est primordiale pour optimiser ce profit. Il est donc important d'identifier les principaux leviers qui influent sur ce coût d'exploitation.

Dans son rapport annuel, le Comité National Routier observe l'évolution des coûts du transport routier de marchandises à longue distance. Ce rapport renseigne sur la répartition des différents postes de dépenses pour un véhicule (Comité National Routier, 2014). Ceux-ci se regroupent de la façon suivante:

- Conducteur (rémunérations et cotisations employeurs),
- Gazole professionnel (coût du carburant et remboursement partiel de la taxe sur les produits énergétiques),
- Charges de structure (charges de structure et coûts indirects de gestion),
- Matériel (renouvellement, financement et assurance),
- Maintenance (pneumatiques, entretiens et réparations),
- Frais de déplacement,
- Infrastructures (taxe à l'essieu et péages).

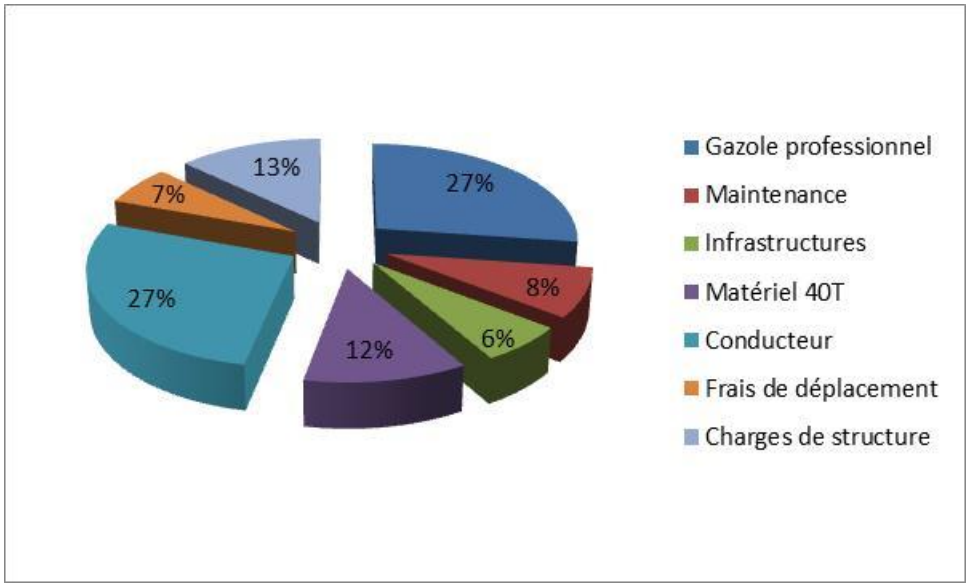

Figure 1.2: Les coûts annuels d'exploitation dans le transport longue distance en 2013 (Comité National Routier, 2014)

La figure 1.2, ci-dessus, présente les résultats de cette répartition pour l'année 2013. Les postes de dépenses les plus importants sont occupés par les frais liés aux salaires et aux carburants. Pour influer sur les coûts d'exploitation, les constructeurs de poids lourds doivent se concentrer sur les postes directement liés aux véhicules, dans le cas présent le carburant et la maintenance. Beaucoup de travaux sont réalisés aujourd'hui pour optimiser la performance du moteur et réduire sa consommation de carburant (Stanton, 2013) (Franke et al., 2014). En contrepartie, très peu de travaux se concentrent sur les coûts liés à la maintenance.

Pour optimiser leurs profits, les entreprises de transport de marchandises travaillent à flux tendu. Dans ce type d'organisation, la disponibilité et la fiabilité des matériels sont des éléments primordiaux pour éviter toute interruption de la chaine. Dans ce contexte, il

apparaît important de s'intéresser à la problématique de la maintenance pour garantir le bon fonctionnement du véhicule.

Toujours d'après cette figure, la maintenance représente environ 8% du coût d'exploitation d'un véhicule longue distance. Ce coût ne prend pas en compte les frais indirects entrainés par une immobilisation du véhicule. Ces frais correspondent, par exemple, aux pénalités liées à un retard, à une perte de cargaison ou encore à une dégradation de l'image de marque de la société. Ne pas comptabiliser ces coûts supplémentaires, certes très complexes à calculer, conduit à sous-estimer la part de la maintenance. En conséquence, des travaux sur la maintenance des véhicules industriels représentent un levier très intéressant en vue de réduire le coût d'exploitation.

1.2 La maintenance dans le groupe AB Volvo

Dans la partie précédente, la maintenance des véhicules industriels est apparue comme l'un des principaux leviers pour réduire significativement les coûts d'exploitation. Au-delà de l'impact sur les coûts, les activités de maintenance représentent probablement le dernier endroit où le constructeur peut rencontrer ses clients en face à face. Ainsi la capacité d'un constructeur à développer un système de gestion efficace de la maintenance est primordiale pour la réussite de l'entreprise.

Dans cette partie, un état des lieux des activités de maintenance du groupe AB Volvo est présenté. Premièrement, les principaux acteurs internes et externes de la maintenance sont détaillés. Nous nous focalisons par la suite sur l'élaboration des contrats d'entretien et sur la création du planning de maintenance.

1.2.1 Principaux acteurs

Avant de détailler plus précisément l'organisation des activités de maintenance du groupe, il est important de faire un point sur les principaux acteurs intervenant dans la maintenance des véhicules industriels. La figure 1.3 présente les différents acteurs et leurs interactions. Le rôle et les objectifs de chacun de ces acteurs dans les activités de maintenance sont présentés ci-dessous:

- Acheteur de transport: Son objectif est de s'assurer d'un service de transport de qualité, respectant les délais spécifiés et à un prix attractif. Il interagit uniquement avec le transporteur pour contractualiser le service de transport.

- Atelier de réparation: Il doit réaliser la maintenance planifiée des véhicules conformément au planning de maintenance élaboré à l'achat. Il doit également prendre en charge les immobilisations non planifiées suite à une panne ou à un accident. Son objectif est d'exécuter les activités de maintenance en un minimum de temps afin de réduire le temps d'indisponibilité du véhicule. Pour réduire ce

temps d'immobilisation, une gestion efficace des stocks est nécessaire. Au-delà des activités de maintenance, son rôle est de faire remonter un maximum d'informations sur les véhicules afin de constituer une base d'expérience solide. L'atelier de réparation communique avec le conducteur et le transporteur pour la planification des activités de maintenance et avec les fournisseurs pour les commandes de pièces détachées.

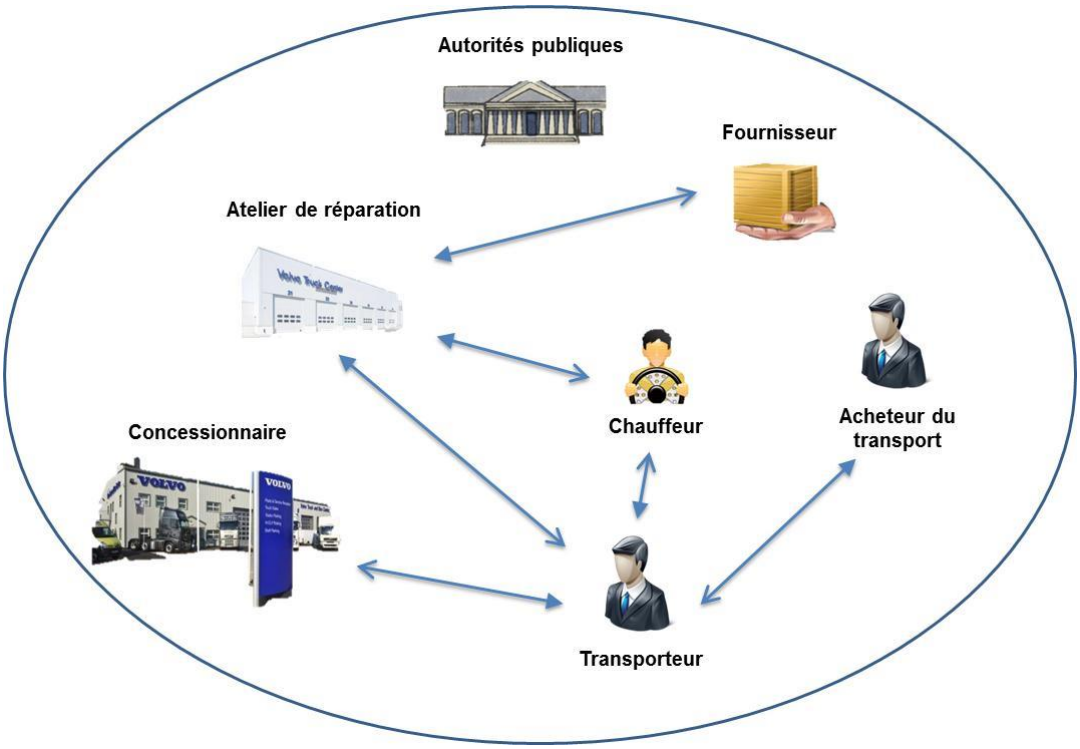

Figure 1.3: Les parties prenantes de la maintenance et leurs interactions

- Autorités publiques: Elles imposent des dispositions légales afin de réguler le transport de marchandises par route. Ces dispositions touchent un périmètre très large allant de la maintenance à des contraintes en termes d'émission, de sécurité ou concernant les infrastructures environnantes. Elles impactent tous les acteurs en définissant le cadre à suivre.

- Chauffeur: Son rôle est de s'assurer du bon fonctionnement du véhicule. Pour respecter les délais et les services contractualisés, le chauffeur doit respecter le calendrier de maintenance et prévenir tous signes préventifs d'un dysfonctionnement du véhicule. Il est en relation avec le transporteur pour la gestion des activités de maintenance et avec l'atelier de réparation pour tous les renseignements relatifs à l'état du véhicule.

- Concessionnaire: Le rôle du concessionnaire est de satisfaire ses clients en leur proposant des véhicules et des services adaptés à leurs besoins. Le contrat de

maintenance fait partie des services proposés à ses clients. Il a pour but d'assurer la disponibilité de leurs véhicules. Afin de définir le planning de maintenance optimal lors de l'achat du véhicule, le concessionnaire interagit avec le transporteur pour définir ses besoins et l'utilisation prévue de son véhicule.

- Fournisseur : Son rôle est de fournir des pièces détachées à l'atelier de réparation et d'en garantir leur qualité. Outre les réapprovisionnements normaux liés aux maintenances préventives planifiées, les fournisseurs peuvent être amenés à effectuer des livraisons en urgence. Ces livraisons sont utilisées lors d'immobilisations non planifiées des véhicules afin de réduire au maximum le temps d'indisponibilité.

- Transporteur : Son objectif est de satisfaire les attentes de ses clients en garantissant un service de transport efficace et compétitif. Pour ce faire, son rôle est de surveiller les coûts d'exploitation sans renier la qualité du service rendu. Le transporteur interagit avec son chauffeur pour l'informer de ses missions et de son planning de révision. Il est aussi en relation avec le concessionnaire pour configurer au mieux le véhicule en fonction des besoins. Il contractualise les missions de transport avec ses clients et il dialogue avec l'atelier de réparation pour gérer le planning de maintenance.

1.2.2 Elaboration des contrats d'entretien

Lors de l'achat d'un véhicule industriel, le concessionnaire propose aux transporteurs de configurer et de personnaliser le véhicule selon leurs besoins. Les différentes adaptations demandées par le client sont validées par l'ingénieur avant-vente afin de garantir leurs viabilités. Même si la configuration du véhicule est toujours une question primordiale pour la plupart des utilisateurs, la disponibilité opérationnelle de leur véhicule est dorénavant une priorité.

La figure 1.4 illustre les différentes phases d'un cycle d'utilisation du véhicule. En situation stationnaire, la disponibilité opérationnelle peut être exprimée comme une proportion de temps de bon fonctionnement pendant lequel le véhicule peut réaliser ses missions. Pendant un arrêt de maintenance préventif ou correctif ou pendant le temps d'attente avant réparation, le véhicule est indisponible. La disponibilité dépend ainsi des caractéristiques intrinsèques du véhicule mais également des conditions dans lesquelles le véhicule est exploité et maintenu. Cette mesure renseigne sur la capacité d'un véhicule à être disponible pour le service commercial. Elle peut être utilisée pour évaluer l'efficacité de l'entretien du véhicule mais aussi comme un indicateur de rentabilité.

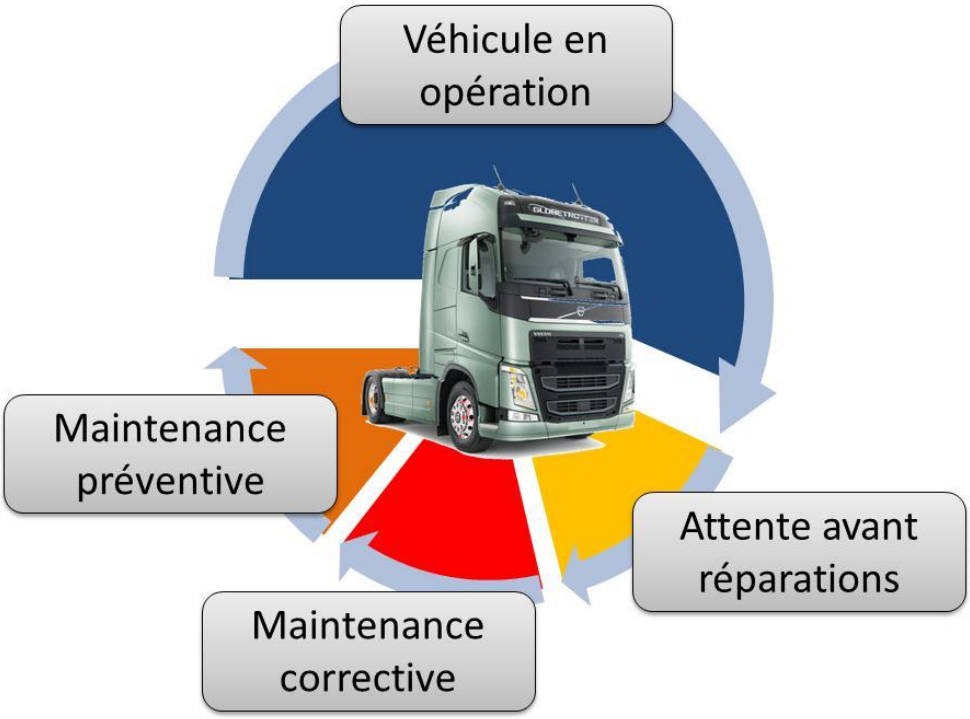

Figure 1.4: La disponibilité opérationnelle sur un cycle d'utilisation du véhicule

Conscient des enjeux autour de cette thématique, les constructeurs proposent aux utilisateurs de souscrire à des contrats de maintenance. Ces contrats visent à assurer un entretien des véhicules industriels dans le but d'optimiser la disponibilité. Du point de vue de l'utilisateur, le contrat apparaît comme une garantie que son véhicule maintienne quotidiennement un niveau constant de performances. Les contrats de maintenance actuels sont définis lors de l'achat du véhicule à partir de sa configuration et des conditions d'utilisation spécifiées par l'utilisateur. Pour spécifier ces conditions, le concessionnaire et l'utilisateur évaluent des variables liées notamment à l'environnement opérationnel (topographie, état de la route…), à l'utilisation du véhicule (kilométrage annuel, changement de vitesse…) ou encore aux types de missions réalisées. Ces informations sont ensuite combinées pour sélectionner les intervalles de maintenance à considérer pour chaque opération.

Un intervalle de maintenance définit l'âge de remplacement optimal ou préconisé pour une opération. Plusieurs types de grandeurs sont utilisés pour définir un intervalle. Celui-ci peut être exprimé par un intervalle de temps fixe (nombre de jours), par une durée d'utilisation (nombre d'heures moteur) ou encore par un kilométrage (cf. tableau 1.1). L'intervalle retenu correspond à la grandeur minimale en fonction de l'utilisation du véhicule.

Pour la plupart des opérations, ces intervalles ont été obtenus après la réalisation de tests de durabilité en cellule couplée avec une étude sur le coût de maintenance. Dans les autres cas, ces intervalles reposent sur l'expérience et la connaissance technique du véhicule ou

plus simplement sur des dispositions légales. Un planning est finalement construit en s'appuyant sur ces informations pour informer l'utilisateur de la fréquence des opérations de maintenance.

Op. code	Label	Coverage	Mileage/time (km/days)					
			L	M	H	S	VS	VS+
1 – Chassis								
11211 – On-board documentation								
10107	Operation 1	all	At every service occasion					
11310 – Inspection and controls								
11301 11302 11303	Operation 2	all	At every service occasion					
11320 – Periodical service								
11304	Operation 3	all	90 000/365	75 000/365	60 000/365	45 000/365	20 000/365	- /365

Tableau 1.1: Définition des intervalles de maintenance

1.2.3 Construction du planning de maintenance

Comme mentionné précédemment, la première étape dans la construction du planning de maintenance est d'allouer un intervalle à chaque opération prise en charge par le contrat. La seconde étape du processus consiste à définir, avec le client, le service de planification souhaité. Deux modes sont proposés: un mode dit « statique » et un mode dit « adaptatif ». Les différences notables entre ces deux modes résident dans la façon dont la mise à jour du planning est effectuée. A noter que le mode dit « statique » est aujourd'hui le mode majoritairement utilisé pour les contrats de maintenance.

Avec le mode « statique », l'algorithme de planification utilise les informations définies à l'achat du véhicule pour planifier les opérations de maintenance à réaliser. Parmi les informations utilisées, on retrouve le kilométrage annuel moyen, le nombre d'heures moteur annuel mais aussi des informations sur les conditions opératoires. Le planning est statique dans le sens où ces informations définies initialement ne sont pas mises à jour automatiquement.

Contrairement au mode précédent, le mode « adaptatif » met à jour automatiquement le planning de maintenance si un changement est détecté. Ce changement concerne soit les informations relatives au kilométrage ou aux heures moteur, soit les informations sur les conditions d'utilisation. L'algorithme de planification recalcule automatiquement, sur un horizon roulant de 6 mois, le kilométrage annuel moyen et le nombre d'heures moteur annuel moyen. Au niveau des conditions opératoires, la mise à jour est effectuée en se basant uniquement sur la consommation de carburant. A noter, que ce mode implique que

les véhicules soient équipés de boitiers télématiques capables de faire remonter l'information.

Hormis la mise à jour du planning de maintenance, la suite de l'algorithme de planification est identique pour les deux modes proposés. L'objectif de cet algorithme est de réduire le nombre d'arrêts de maintenance du véhicule en regroupant certaines opérations. Pour ce faire, le concept général de la méthode est de construire le planning en quatre étapes:

- Etape 1: Premièrement, les opérations dites « primaires » sont positionnées sur le planning. Elles correspondent généralement aux opérations de maintenances classiques comme les visites annuelles ou périodiques. Elles sont utilisées pour diriger la planification des autres opérations.

- Etape 2: L'opération désignée comme la plus fréquente est ensuite positionnée. Elle se définit comme l'opération possédant l'intervalle minimal de maintenance. La planification de cette opération doit être adaptée aux opérations primaires. L'idée est de regrouper les différentes occurrences de cette opération avec les opérations primaires déjà positionnées.

- Etape 3: Les opérations à date fixe sont ensuite positionnées à leur date spécifique sans autre adaptation. Ces opérations correspondent à toutes celles possédant un intervalle de maintenance défini uniquement en jours.

- Etape 4: Finalement, les opérations de maintenance restantes sont adaptées à celles déjà planifiées.

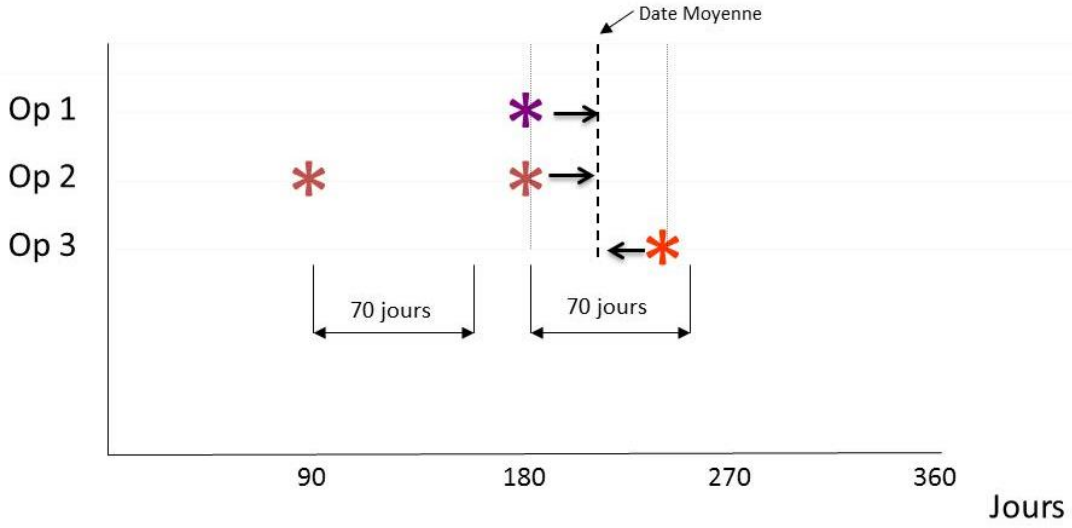

Figure 1.5: Illustration de la fonction "Automerge"

Pour compléter cet algorithme, une fonction nommée « Automerge » est utilisée pour regrouper les opérations de maintenance situées à l'intérieur d'une fenêtre de temps. L'objectif est d'éviter de faire revenir l'utilisateur plusieurs fois sur une courte période. L'idée est de parcourir le planning initial en utilisant une fenêtre de temps (cf. figure 1.5). Si plusieurs opérations apparaissent à l'intérieur de cette fenêtre, celles-ci sont regroupées au niveau de la date moyenne entre la première et la dernière opération situées à l'intérieur de cette fenêtre de temps.

1.3 Vers une amélioration de l'offre de service

Un état des lieux de la maintenance dans le groupe AB Volvo a été effectué dans la partie précédente. Ce constat a permis de faire ressortir les enjeux associés aux activités de maintenance.

Dans cette partie, nous nous consacrons à la présentation des objectifs du groupe au niveau de la maintenance. La compétition grandissante et les attentes toujours plus importantes des clients conduisent le constructeur à modifier sa stratégie. La clientèle ne se contente plus uniquement d'acheter des véhicules de qualité, elle souhaite dorénavant acheter des solutions de transport complètes. Nous détaillons l'évolution des besoins des utilisateurs, puis nous présentons le cahier des charges du groupe.

1.3.1 Besoins des utilisateurs: évolutions

Pour développer des solutions de transport attractives, la première étape consiste à comprendre les besoins actuels des utilisateurs. Ces besoins ont été identifiés lors de différentes enquêtes réalisées par le groupe AB Volvo auprès de ses clients.

La compétition mondiale sur le marché du transport de marchandises conduit les utilisateurs à se focaliser de plus en plus sur leur activité principale. Cette nécessité les amène à rechercher des solutions de transport complètes regroupant le véhicule et les services associés. Parmi les services les plus demandés, on retrouve effectivement la prise en charge de la maintenance. Comme mentionné dans la première partie de ce chapitre, le véhicule industriel est un outil permettant aux utilisateurs de réaliser des profits. Pour maximiser ce profit, l'un des objectifs est de diminuer le coût global d'exploitation en réduisant notamment le poste maintenance.

Dans ce contexte, le premier besoin exprimé par les utilisateurs est d'avoir accès à un service de maintenance flexible qui s'adapte à leurs stratégies. Une entreprise de transport fonctionne dans la majorité des cas en flux tendus. Dans ce type de fonctionnement, l'ennemi principal est l'incertitude. La maintenance du véhicule doit donc être planifiée à l'avance afin de pouvoir gérer l'utilisation de la flotte et pallier l'indisponibilité d'un véhicule. Cette capacité à planifier conduit à réduire l'impact de la maintenance sur les activités de

l'utilisateur. Une bonne planification permet également de contrôler facilement le budget alloué à la maintenance en évitant les mauvaises surprises.

Toujours dans la même logique, les utilisateurs souhaitent éviter au maximum les immobilisations de leurs véhicules pendant les missions. Quand une panne survient sur le véhicule, des coûts additionnels viennent s'ajouter aux réparations. Cette panne, par définition non planifiée, conduit le transporteur à revoir son planning. Cette situation est gérée facilement par les transporteurs qui disposent d'une flotte importante de véhicules mais elle est beaucoup plus contraignante pour les autres. Une panne impacte également l'image de marque du transporteur. Lorsque le véhicule est immobilisé, celui-ci ne termine pas la mission qui lui avait été confiée. A terme, des immobilisations à répétition altèrent la confiance entre le transporteur et son client.

Enfin, il ressort que les utilisateurs souhaitent voir baisser l'impact de la maintenance préventive sur leurs activités. Toujours dans l'objectif d'optimiser la disponibilité opérationnelle des véhicules, les utilisateurs veulent réduire au maximum le nombre d'arrêts préventifs. Au-delà du nombre, ils souhaitent réduire les temps de réparation.

1.3.2 Cahier des charges

Pour répondre aux besoins exprimés par les utilisateurs, l'objectif du constructeur est de proposer une nouvelle offre de service. Cette nouvelle offre a pour ambition de proposer une solution de transport complète et efficace. La vision du groupe est d'être en position d'offrir aux utilisateurs la disponibilité opérationnelle de leur véhicule comme un produit. Selon le type de contrat choisi, l'objectif est de garantir un certain niveau de disponibilité opérationnelle pour le véhicule. Dans le cas où les objectifs ne sont pas respectés, le constructeur doit s'engager à dédommager l'utilisateur.

Cette nouvelle forme de relation conduit à se rapprocher de l'utilisateur et de ses activités. Notons que la compétition sur le marché de l'après-vente s'amplifie avec la mise en place d'un nouveau règlement européen dans le secteur automobile. La commission européenne souhaite ouvrir ce marché en renforçant la concurrence entre réparateurs indépendants et agréés. Le règlement européen n°461/2010, adopté le 27 mai 2010, prévoit que les réparateurs indépendants puissent avoir accès aux pièces de rechange du constructeur mais également à toutes les informations techniques nécessaires à la maintenance. Le développement de nouveaux services apparaît comme l'unique solution permettant de conserver un avantage compétitif sur les concurrents et de s'assurer des revenus sur le long terme.

Dans ce contexte, le groupe AB Volvo souhaite développer une politique de maintenance permettant de passer d'une maintenance réactive à une véritable maintenance préventive. Pour atteindre cet objectif, la politique de maintenance actuelle et, par extension, la construction du planning de maintenance doivent considérablement évoluer. Premièrement,

le mode de planification statique proposé actuellement à une grande partie des utilisateurs est à bannir. Avec ce mode, la politique de maintenance est basée uniquement sur des informations spécifiées à l'achat du véhicule. Cela signifie que la planification des opérations de maintenance n'est pas adaptée aux conditions d'utilisations réelles du véhicule. En effet, si les conditions d'utilisations définies initialement sont sous-estimées par rapport à la situation réelle, cela conduit à augmenter significativement la maintenance corrective. A l'inverse, si les conditions d'utilisations sont surestimées, les arrêts de maintenance auront lieu trop tôt, augmentant ainsi le coût de la maintenance préventive. Dans les deux cas, la disponibilité opérationnelle du véhicule diminue fortement.

L'idée est alors de développer une maintenance capable de s'adapter automatiquement à l'état du véhicule et à son cadre d'utilisation. A partir de la configuration initiale du véhicule et des informations de surveillance disponibles en ligne, l'objectif est de proposer un planning de maintenance personnalisé en fonction des activités de chaque utilisateur. Ce planning, optimisé sur la durée du contrat de maintenance, vise à éviter les immobilisations du véhicule entre deux arrêts de maintenance planifiés. Notons ici que le mode « adaptatif » proposé actuellement va dans ce sens. Néanmoins, les informations utilisées sont encore trop limitées et ne permettent pas de retranscrire assez finement l'utilisation réelle du véhicule.

La qualité de la politique de maintenance mise en place dépend fortement de l'accès à l'information. En effet, adapter la politique de maintenance à un véhicule spécifique impose l'intégration de nouveaux moyens technologiques. Ces moyens tels que les capteurs physiques ou logiciels engendrent des coûts importants d'implémentation. Dans ce cadre, un outil d'aide à la décision doit être développé afin d'évaluer la limite d'investissement à considérer pour conserver une rentabilité des services. Au-delà de l'aspect technologique pur, le challenge est de développer une méthodologie capable d'interpréter les informations du véhicule rendues disponibles. Cette méthodologie devra intégrer les données réelles du véhicule dans le processus de décision de maintenance afin de planifier les actions de maintenance à réaliser.

Hormis l'optimisation de la politique de maintenance actuelle, la réalisation des objectifs spécifiés par le groupe conduit à reconsidérer la place occupée par la maintenance. La fonction maintenance ne peut décemment plus se réduire uniquement à la seule activité d'entretien du véhicule, mais, a vocation à intervenir dans l'ensemble du cycle de vie du système (cf. figure 1.6). Traditionnellement, les activités de maintenance se limitent à la phase d'opérations. Cette phase peut être schématisée par une boucle incluant le planning de maintenance, les activités de diagnostic, l'exécution des opérations de maintenance et l'évaluation des résultats. Suivant les résultats obtenus, la stratégie de maintenance peut être modifiée pour pallier les éventuels problèmes observés. En considérant dorénavant la maintenance dans le cycle de vie du système, des relations entre les activités de maintenance et la conception du système apparaissent assez nettement (Takata et al.,

2004). Ces relations créent la nécessité d'intégrer les problématiques de maintenance dès la conception du système pour impacter significativement le coût global d'exploitation.

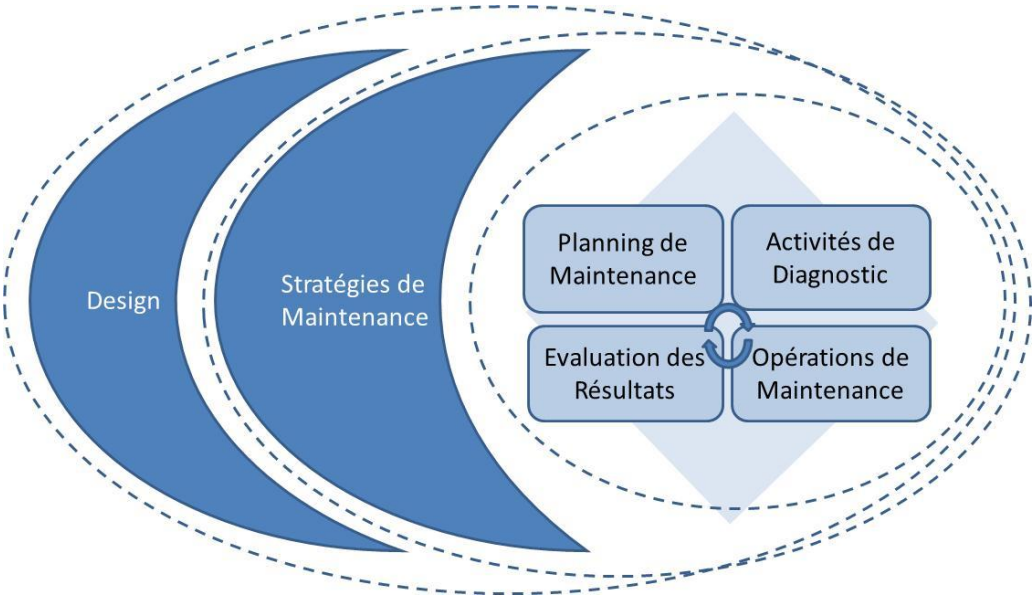

Figure 1.6: La maintenance dans le cycle de vie du système

1.4 Le projet MoDe: une première réponse

Dans cette partie, nous présentons les travaux effectués par le groupe AB Volvo dans le cadre du projet européen Maintenance On Demand (MoDe). Ce projet (Artus & Bein, 2009) soutenu par l'union européenne par l'intermédiaire de son programme FP7 (Seventh Framework Programme for Research and Technological Development) est considéré comme une première réponse apportée aux besoins des utilisateurs.

Dans un premier temps, la vision globale et les objectifs du projet sont introduits. Nous nous concentrons ensuite sur les travaux relatifs à l'algorithme de planification dynamique. Nous analysons enfin les résultats obtenus et les limites observées.

1.4.1 Objectifs du projet

Le projet MoDe (2009-2012) a été réalisé au sein du septième programme cadre de l'union européenne portant sur les transports durables. Ce projet (cf. figure 1.7) regroupe une dizaine de partenaires industriels ou académiques spécialisés dans des domaines d'applications assez larges. Cette diversité permet de couvrir les différents aspects du projet.

L'objectif principal est d'accroitre la compétitivité du transport en améliorant la disponibilité opérationnelle des véhicules. Pour atteindre cet objectif, l'ambition du projet est de fournir aux utilisateurs des services sur mesure adaptés à la configuration de leur véhicule et en adéquation avec leurs missions. Ces services s'appuient sur la construction d'une plateforme

de maintenance. Celle-ci intègre des technologies innovantes de surveillance (capteur sans fil) mais également de transfert et d'analyse de données. (cf. figure 1.8).

Figure 1.7: Consortium du projet MoDe

Les réponses apportées par ce projet sont illustrées par l'intermédiaire de trois scénarii (Bein et al., 2014). Ces scénarii décrivent des situations concrètes impactant la disponibilité opérationnelle du véhicule et les actions déployées pour y remédier. Le premier scénario appelé « maintenance on demand » se concentre sur la planification des activités maintenance. Le but étant de sortir de l'aspect statique des plannings proposés actuellement pour aller vers une planification dynamique. Des informations relatives aux conditions d'utilisation du véhicule, à l'état des composants ainsi que des contraintes utilisateur sont automatiquement intégrées pour mettre à jour et optimiser le plan de maintenance.

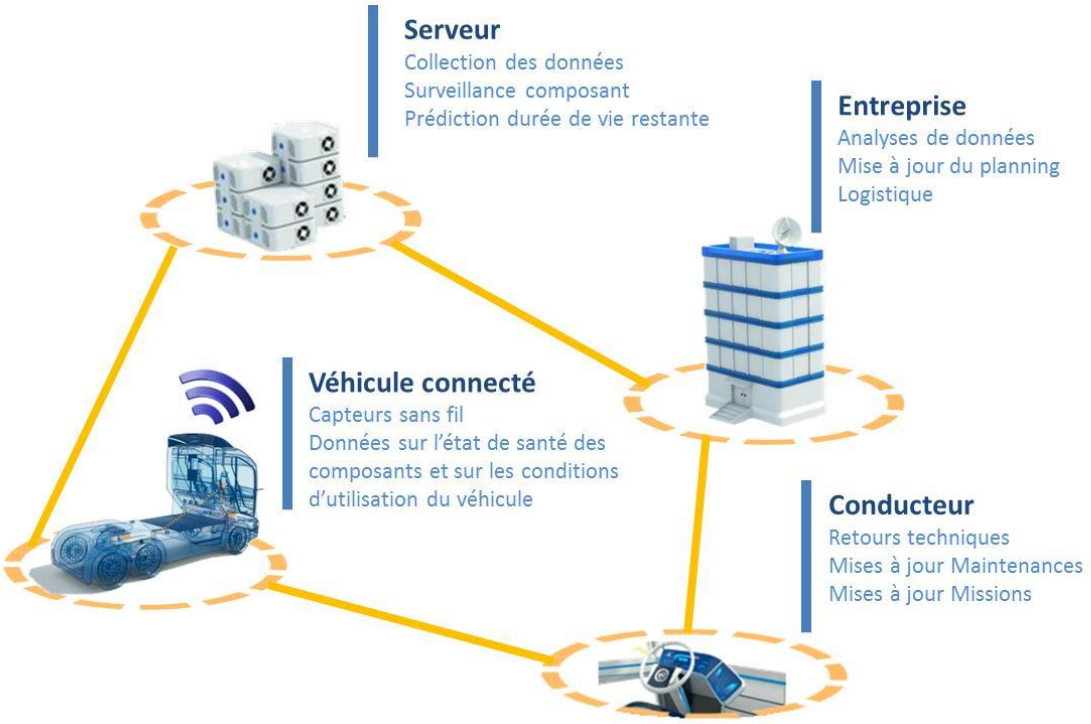

Figure 1.8: Plateforme de maintenance du projet MoDe

Le second scénario « maintenance on the fly » a pour but d'améliorer l'efficacité de la réparation en cours de mission quand l'état réel d'un composant l'impose. En utilisant les

informations fournies par les outils de surveillance, la distance restante avant immobilisation est évaluée. En se basant sur cette évaluation et sur la localisation du véhicule, le service propose à l'utilisateur un itinéraire vers l'atelier de réparation le plus proche.

Néanmoins, parfois, la distance restante avant immobilisation ne permet pas de rejoindre un atelier. Cette situation est présentée dans le dernier scénario appelé « repair on the fly ». Dans ce cas, le service informe le conducteur du meilleur emplacement sécurisé pour immobiliser son véhicule. Cet emplacement est proposé afin de minimiser le temps d'intervention de l'atelier mobile le plus proche. Un atelier mobile est ici un atelier qui offre la possibilité d'intervenir sur le bord de la route.

1.4.2 Algorithme de planification dynamique

L'une des contributions majeure de ce projet a été le développement d'un algorithme de planification dynamique des opérations de maintenance (Bouvard et al., 2011). La plupart des outils de planification actuels sont des outils réactifs dans le sens où ils subissent aussi bien les événements non planifiés que les changements de conditions d'utilisation. Pour pallier ce constat, l'idée est de proposer un outil de planification capable d'utiliser le flux d'informations dynamiques pour mettre à jour le planning de maintenance. Cet outil s'appuie sur les informations de surveillance des composants et sur l'estimation des conditions d'utilisation du véhicule. Pour diminuer l'impact de la maintenance sur la disponibilité opérationnelle du véhicule, une méthode de regroupement est intégrée. Cette méthode, optimisée en fonction du coût de maintenance, est capable de regrouper dynamiquement les opérations sur un horizon donné.

La figure 1.9 illustre les grandes étapes de cet algorithme de planification dynamique (Bouvard, 2010):

- La première étape consiste à estimer la loi de probabilité de panne pour chaque composant du système pris individuellement. Pour cela, le niveau de détérioration de chaque composant est récupéré. En se basant sur cette information, un modèle de dégradation est construit pour prédire la dégradation future du composant. En utilisant un modèle et une limite de dégradation, la loi de probabilité de panne peut être estimée.

- La seconde étape utilise cette loi de probabilité pour déterminer la date optimale de maintenance de chaque composant du système. Cette date est définie en supposant qu'une politique de maintenance préventive basée sur l'âge est appliquée aux différents composants. La période de maintenance spécifiée représente un compromis entre le coût correctif lié à une panne et le coût préventif. A noter que, la connaissance de cette date optimale pour chaque composant est nécessaire pour la mise en place de la méthode de regroupement.

- La troisième étape a pour objectif de regrouper plusieurs opérations de maintenance à la même date afin d'améliorer la disponibilité opérationnelle du véhicule. L'idée est de considérer que le regroupement entraine une diminution du nombre d'arrêts de maintenance. En conséquence, les coûts fixes liés à l'entrée en atelier sont réduits. En contrepartie, le coût total de maintenance est pénalisé par des maintenances préventives effectuées avant leurs dates optimales. Une maintenance effectuée trop tôt entraine une réduction de la durée de vie utile du composant. Des fonctions de pénalités ont été introduites afin d'évaluer pour chaque composant, le coût additionnel lié au déplacement de la maintenance de sa date optimale. Une heuristique a été développée afin de déterminer la structure groupante optimale qui respecte les contraintes du système. Cette structure minimise le coût total de maintenance sur un horizon de planification donné. Elle est constituée de groupes d'opération de maintenance dont les dates individuelles et optimales de remplacement sont consécutives.

- La quatrième et dernière étape entraine la remise à jour du planning de maintenance en fixant les groupes d'opérations à réaliser et les dates associées.

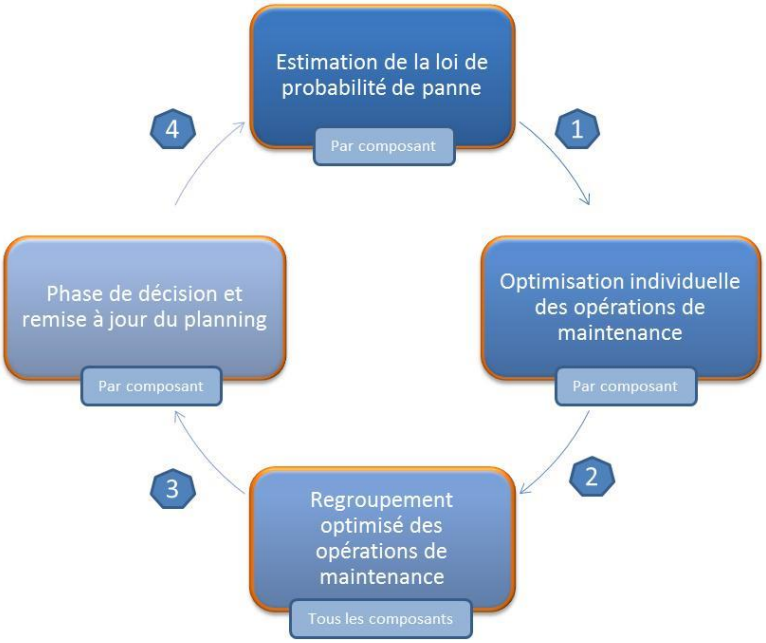

Figure 1.9: Méthode de planification dynamique et adaptative (Bouvard, 2010)

1.4.3 Résultats et limites

Les avancées réalisées dans ce projet européen ont conduit à la mise en place d'une offre de maintenance globale basée sur la disponibilité opérationnelle du véhicule. La capacité à proposer une telle offre de services s'appuie sur un ensemble de technologies parmi lesquelles un réseau de capteurs sans fil ou encore une plateforme de maintenance. Celles-ci

assurent un meilleur suivi des conditions d'utilisation du véhicule et une meilleure surveillance de l'état de santé des composants.

En s'appuyant sur ces informations, la notion de maintenance prédictive a été introduite dans l'algorithme de planification dynamique. Ce type de maintenance a pour but de modéliser la dégradation des composants grâce à des modèles stochastiques et d'évaluer en ligne l'état courant de composants « critiques ». Le principal avantage de cette approche est de pouvoir estimer la durée de vie résiduelle du composant sans disposer d'une connaissance exacte de la physique du processus d'usure. La mise en place d'une politique de regroupement des opérations de maintenance basée sur les usures mesurées permet de minimiser le coût de maintenance.

En conséquence, les méthodologies développées dans l'algorithme de planification dynamique permettent d'offrir aux utilisateurs des services personnalisés en lien avec les contraintes de leurs activités. L'offre de service proposée dans ce projet permet selon les cas d'améliorer la disponibilité opérationnelle du véhicule de l'ordre de 15% à 30% (Bein et al., 2014) (Lesobre et al., 2012). Les technologies implémentées conduisent à la réduction des coûts de garantie de 10% à 15% en s'appuyant sur une meilleure détection des dégradations sur les véhicules.

Ce projet a aussi permis de mettre en relief certaines limites dans la façon de maintenir le véhicule industriel. La politique de maintenance proposée s'appuie sur une logique « composant » dans laquelle les interactions et la structure du système ne sont pas prises en compte. Pour illustrer cette limite, prenons l'exemple du système de freinage du véhicule. Dans le projet MoDe, une politique de maintenance a été développée afin de décider du meilleur moment pour remplacer la plaquette de frein selon son niveau de dégradation. Or, le système de freinage ne se compose pas uniquement des plaquettes de freins. Une politique de maintenance qui ne tient pas compte des interactions ne peut donc pas garantir le meilleur niveau de performance pour la fonction freinage. C'est pourquoi, il est indispensable de travailler avec une vision « système » et non composant par composant pour assurer la réalisation de fonctions telles que le freinage.

La seconde limite concerne le regroupement des opérations de maintenance. Il s'appuie sur le concept de la maintenance basée sur l'opportunité. Avec ce concept, la réparation ou l'inspection d'un composant vont pouvoir déclencher des activités de maintenance sur d'autres composants du système. Saisir l'opportunité est avantageux dans le sens où l'on va économiser des coûts fixes liés à l'entrée en atelier de maintenance. Néanmoins, ce concept ne permet pas de prévoir précisément les moments où le système va être maintenu et ne permet pas d'assurer aux clients une période d'utilisation sans défaillance.

Enfin, la dernière limite observée fait référence à la place occupée par la maintenance. Dans ce projet, la maintenance est cantonnée aux activités d'entretien du véhicule. Les connaissances acquises sur les modes de défaillance et sur la dégradation des composants

sont utilisées uniquement pour optimiser la décision de maintenance. La maintenance n'est pas intégrée dans le cycle de vie du système et aucun retour sur la conception du véhicule n'est envisagé.

1.5 Contribution de la thèse

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre le groupe AB Volvo et les laboratoires GIPSA-lab de l'université de Grenoble, CRIStAL (ex LAGIS) de l'université Lille 1 et LM2S de l'université de technologie de Troyes. Le but de cette collaboration est de répondre aux problématiques de maintenance spécifiées par l'industriel en proposant des contributions académiques novatrices.

Cette partie précise, dans un premier temps, les objectifs industriels à suivre. Ces objectifs découlent du cahier des charges spécifié par le groupe AB Volvo et des limites observées dans le projet MoDe. Dans un deuxième temps, ces problèmes de planification des opérations de maintenance et de retour sur la conception sont positionnés dans la littérature existante. Cet état de l'art fait émerger les enjeux méthodologiques de cette thèse.

1.5.1 Objectifs industriels

La volonté du groupe AB Volvo est de proposer à ses clients une offre de maintenance personnalisée en fonction de leurs activités et adaptée à leurs contraintes. Cette offre a vocation à garantir un niveau de disponibilité élevé du véhicule tout en réduisant l'impact de la maintenance sur le coût d'exploitation.

Ces objectifs nécessitent, premièrement de faire évoluer l'approche « composant » utilisée dans le projet MoDe vers une approche « système ». On entend ici par système, un ensemble de composants en interaction capable d'accomplir une fonction spécifique dans le but de fournir une valeur ajoutée à l'utilisateur. La structure du système doit faire partie intégrante de la politique de maintenance et des décisions associées. L'application de cette approche « système » impacte également la façon de regrouper les opérations de maintenance. Cela signifie que le regroupement ne doit plus être pensé autour des composants mais autour du système lui-même. C'est le système qui doit être utilisé pour diriger le regroupement.

Dans un planning de maintenance personnalisé, la politique de maintenance s'adapte dynamiquement aux conditions réelles d'utilisations de chaque véhicule. Pour se faire, il est nécessaire de mettre en place des moyens technologiques au niveau des composants pour avoir accès à des informations de surveillance sur le système. Ces informations prennent la forme d'indications sur l'état de santé des composants et sur leurs conditions d'utilisations. De façon évidente, cette instrumentation ne peut pas être mise en place sur l'ensemble des composants pour des raisons à la fois technique et de coût. Cela implique que le véhicule est

un système hétérogène, c'est-à-dire que le niveau d'information disponible est différent selon les composants. Dans ce contexte, la principale difficulté est d'arriver à utiliser l'ensemble de ces informations pour adapter le processus de décision de maintenance.

L'offre de maintenance doit également être en mesure de s'adapter aux contraintes du transport routier. Dans ce secteur, la maintenance préventive est effectuée uniquement quand le véhicule retourne à l'atelier. En dehors de ces interventions, c'est-à-dire en mission, la maintenance est presque impossible ou génère des coûts importants d'immobilisation. Pour pallier ces contraintes, la politique de maintenance doit garantir la disponibilité et l'autonomie du système sur des périodes d'opérations données. Les opérations de maintenance doivent donc être effectuées avant ou après ces périodes.

Pour réduire l'impact de la maintenance sur les coûts d'exploitation, l'optimisation de la politique de maintenance seule ne suffit pas. Il est primordial de mener une réflexion plus large associant le système et sa maintenance dès la conception. L'idée est de proposer une méthodologie permettant de guider le concepteur dans ces choix. En s'appuyant sur le comportement du système et la politique de maintenance qui lui est appliquée, le principe est d'évaluer différentes options de conception. Investir dans une instrumentation de surveillance plus performante, travailler sur la fiabilité des composants, mettre en place des redondances sont autant de solutions de conception envisageables à évaluer.

1.5.2 Enjeux méthodologiques

Pour répondre aux problèmes industriels énoncés précédemment, nous nous intéressons aux modèles de maintenance développés dans la littérature. Un modèle de maintenance se compose, par définition, d'un modèle de fiabilité du système et d'une politique de maintenance. Son but est de reproduire les effets des opérations de maintenance sur l'état du système. Il fonctionne ainsi comme un outil d'aide à la décision permettant de comparer les différentes stratégies de maintenance entre elles.

Depuis plusieurs décennies, la modélisation de la maintenance a fait l'objet de nombreux travaux de recherche comme en attestent les nombreuses publications sur ce sujet (Sheriff & Smith, 1981) (Valdez-Flores & Feldman., 1989). Cependant, dans leur très grande majorité, les travaux existants visent à quantifier les effets et les coûts d'une politique de maintenance sur des systèmes mono-composant. Optimiser ces politiques consiste, le plus souvent, à définir les meilleurs moments pour réaliser les opérations (ou les inspections) de maintenance en vue de trouver le meilleur compromis entre maintenances préventive et corrective (Dekker, 1996). Même si ces modèles peuvent servir de base à des politiques de maintenance plus complexes, ils ne permettent pas de proposer une solution globale au problème posé. En effet, l'élaboration d'un modèle de maintenance pour un système multi-composant ne se résume pas à la simple juxtaposition de modèles élémentaires pour chacun de ces composants.

En s'appuyant sur ce constat, des modèles spécifiques ont été développés pour des systèmes multi-composant (Wang, 2002) (Nicolai & Dekker, 2008) (Cho & Parlar, 1991). Dans la plupart des cas, ces travaux proposent des politiques de regroupement afin de profiter des dépendances économiques et de minimiser les coûts de maintenance. Ces politiques se décomposent en deux grandes catégories : les politiques de regroupement stationnaire et les politiques de regroupement dynamique.

Les politiques de regroupement stationnaire considèrent que les règles de maintenance sont statiques au cours du temps. Elles conviennent pour des systèmes qui évoluent dans un environnement stable avec des caractéristiques de fiabilité supposées connues et fixes pour l'ensemble des composants. Ces hypothèses simplifient énormément la problématique de planification des opérations de maintenance. Ces modèles ne sont pas applicables pour des systèmes qui évoluent dans un contexte dynamique, comme les véhicules industriels.

Plus récemment, des auteurs se sont intéressés à des politiques de regroupement dynamique (Wildeman, 1996) (Wildeman et al., 1997) (Bouvard, 2010). Celles-ci utilisent l'information court terme pour optimiser et mettre à jour le planning de maintenance. Cette remise à jour est basée sur des informations telles que la mesure de détérioration d'un composant, la variation d'environnement opérationnel ou encore la panne du système. En conséquence, le planning de maintenance est adapté à l'état réel du véhicule et à ses conditions d'utilisation.

Cependant, hormis des travaux récents (Vu et al., 2014), ces politiques de regroupement ne prennent pas en compte la structure du système comme énoncé dans la problématique. L'autre restriction importante concerne le respect des contraintes de l'utilisateur. Ces politiques s'appuient principalement sur le concept d'opportunité et de maintenance opportuniste. Par définition, une opportunité est difficilement prévisible et ne permet pas de garantir à l'utilisateur l'autonomie de son système sur une période donnée. La sous-partie précédente évoque également la nécessité de développer une méthodologie permettant de guider le concepteur dans ces choix. De nombreux auteurs démontrent l'intérêt de penser la maintenance dès les premières phases du cycle de vie du produit (Markeset & Kumar, 2001). Néanmoins, très peu de travaux définissent une méthodologie claire et détaillée pour faire évoluer la conception du système.

Ces différents constats illustrent la nécessité de développer de nouvelles méthodes pour atteindre les objectifs du groupe AB Volvo. L'idée qui va être défendue dans cette thèse est de développer une forme originale de regroupement dynamique (Tinga & Janssen, 2013) basée sur le concept de la Maintenance Free Operating Period (MFOP) (Hockley, 1998). Cette politique vise à assurer le bon fonctionnement du système multi-composant sur une succession de périodes spécifiées. A la fin de chaque période, la politique considérée évalue la nécessité d'une intervention de maintenance pour assurer la prochaine période avec un niveau de confiance spécifié. Lorsqu'une intervention de maintenance est jugée nécessaire, la politique sélectionne les opérations à réaliser pour atteindre le niveau souhaité. Le

processus de décision intègre à la fois les modèles de fiabilité des composants, la structure fiabiliste du système et les informations de surveillance disponibles. Un planning de maintenance personnalisé est ainsi établi en fonction de l'état réel des différents composants et de leurs conditions d'utilisations. A noter que des politiques basées sur la MFOP ont été présentées récemment (Long et al., 2009). Cependant, elles ont été développées pour des systèmes mono-composant sans considérer d'information de surveillance. Cette thèse envisage donc d'étendre les performances de celles-ci. Enfin, une méthodologie de conception pour la maintenance est proposée pour évaluer les différentes propositions de conception. Un facteur d'importance basé sur le coût est proposé dans le but de diriger les actions de conception.

1.6 Plan de la thèse

Pour répondre à ces problèmes de maintenance, il est souvent nécessaire de s'appuyer sur une modélisation stochastique de la réalité afin de traduire la complexité des problèmes abordés. Dans ce contexte, les chapitres 2 et 3 introduisent les éléments nécessaires à la construction d'un modèle de maintenance.

Le chapitre 2 traite de la modélisation de la fiabilité des systèmes, soit la première composante d'un modèle de maintenance. Après quelques rappels rapides sur la fiabilité et ses grandeurs caractéristiques, ce chapitre se focalise sur la modélisation stochastique de la défaillance. Dans ce cadre, les modèles de survie et les modèles de dégradation sont présentés. Ils peuvent être vus comme deux modélisations possibles d'un même système, avec des niveaux d'information différents. Nous abordons également les outils méthodologiques à notre disposition pour intégrer la structure du système dans les calculs de fiabilité.

Le chapitre 3 présente les enjeux de la maintenance et de la modélisation de la maintenance. La modélisation de la politique de maintenance appliquée à un système est la seconde composante du modèle de maintenance. Ce chapitre vise, premièrement, à présenter les notions générales associées à la maintenance. Nous nous intéressons ensuite à l'utilisation de la surveillance pour la maintenance. Un état de l'art sur les politiques de maintenance pour des systèmes mono-composant et multi-composant est établi. Nous insistons sur le besoin de modélisation pour évaluer les performances et éventuellement optimiser la maintenance.

En s'appuyant sur les notions évoquées précédemment et sur les limites des méthodologies actuelles, le chapitre 4 détaille la politique de maintenance dynamique développée dans cette thèse. On introduit ainsi la notion de MFOP et le cadre de son utilisation actuelle. Nous définissons ensuite le processus de décision de maintenance utilisé. Cette politique a la particularité de s'appuyer sur la MFOP pour diriger le regroupement des opérations de maintenance. Nous présentons également le modèle de coût utilisé au sein du modèle de maintenance pour évaluer et optimiser la politique.

Le chapitre 5 se concentre sur l'aspect dynamique de la politique proposée. Nous précisons ainsi comment les informations de surveillance disponibles sur l'état de santé des composants ou sur leurs conditions d'utilisation sont intégrées dans le processus de décision. Tout au long de ce chapitre, nous illustrons l'impact de l'information de surveillance sur les prises de décisions de maintenance.

Le chapitre 6 présente une méthodologie de conception intégrant les problématiques liées à la maintenance. Elle vise à fournir un outil d'aide à la décision permettant de statuer entre diverses propositions de conception pour un système donné. Dans un premier temps, nous justifions l'intérêt de prendre en compte les problématiques de maintenance dès la conception du système. Un état des lieux est ensuite réalisé sur l'utilisation de la notion de MFOP pour la conception. La méthodologie retenue repose sur l'évaluation des coûts globaux d'exploitation d'un système soumis à une politique de maintenance spécifiée. Pour prioriser les actions de conception à mener, un facteur d'importance basé sur les coûts est introduit. Cette méthodologie est enfin appliquée sur un système multi-composant donné.

Dans le chapitre 7, nous appliquons la politique de maintenance développée sur un sous-système du véhicule industriel. Nous précisons, dans un premier temps, comment le sous-système a été sélectionné et quelles sont les données à notre disposition. Nous détaillons ensuite la construction du modèle de maintenance et les différentes hypothèses effectuées. En s'appuyant sur ce modèle, une évaluation de la politique est présentée. Les résultats sont comparés avec la politique de maintenance appliquée actuellement sur ce sous-système.

Le chapitre 8 conclut et propose des perspectives à nos travaux.

Chapitre 2

Modélisation de la fiabilité des systèmes

Un système est un ensemble de composants en interaction capable d'accomplir une fonction spécifique (Villemeur, 1988). Une défaillance intervient quand le système n'est plus en mesure de délivrer la fonction requise. Par conséquent, une panne est toujours la résultante d'une défaillance. La maintenance vise à prévenir les défaillances du système et à intervenir sur celui-ci quand une panne survient pour rétablir ses fonctionnalités. Le premier objectif de la maintenance est donc de maintenir et d'améliorer la fiabilité du système. Dans ce cadre, la capacité à modéliser la défaillance et plus généralement la dégradation du système apparaît comme un élément primordial dans l'élaboration et l'optimisation de la politique de maintenance.

En s'appuyant sur ce constat, ce chapitre commence par donner une définition précise de la fiabilité et de ses grandeurs caractéristiques. Nous nous focalisons ensuite sur la modélisation stochastique de la défaillance. Pour ce faire, nous distinguons les modèles de survie et les modèles de dégradation. Ce type de modélisation est recommandé lorsqu'il est impossible de traduire la complexité du mécanisme de défaillance par des modèles physiques. Nous présentons, enfin, les outils à notre disposition pour intégrer la structure du système dans les calculs de fiabilité.

2.1 Rappels de fiabilité

Dans le chapitre précèdent, le terme de fiabilité a été employé sans qu'il soit précisément défini. Pour éviter toute ambiguïté, nous proposons dans cette partie une définition générale de la fiabilité et des concepts associés. Nous abordons également les méthodes à notre disposition pour évaluer cette fiabilité dans un contexte industriel.

2.1.1 Fiabilité et sûreté de fonctionnement

La Sûreté de Fonctionnement (SdF) représente au sens large la science des défaillances. Elle vise à mettre en place des systèmes dans lesquels les défaillances sont prévues et tolérables. Derrière ce concept, la notion de confiance est fondamentale. Cette notion se retrouve dans la définition de Laprie (Laprie, 1996) où il mentionne que la SdF d'un système est la propriété qui permet de placer une confiance justifiée dans le service qu'il délivre.

Définition 1 *La SdF correspond à l'ensemble des aptitudes d'un bien qui lui permet de remplir une fonction requise au moment voulu, pendant la durée prévue, sans dommage pour lui-même et son environnement.*

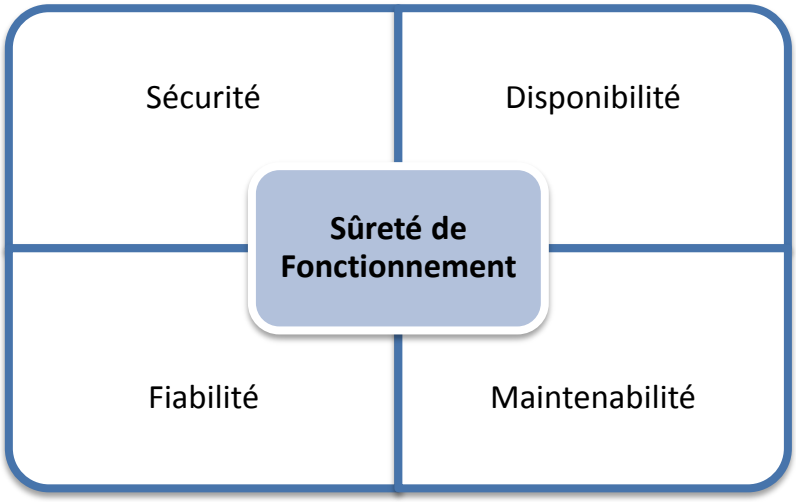

Figure 2.1: Les concepts associés à la SdF

La SdF s'appuie généralement sur quatre concepts majeurs: la sécurité, la disponibilité, la fiabilité et enfin la maintenabilité (cf. figure 2.1). Il convient de définir succinctement ces différents concepts pour replacer la fiabilité dans son contexte.

Définition 2 *La sécurité d'une entité est définie comme son aptitude à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.*

Cette composante de la SdF s'avère primordiale pour les entités où le risque de dommages corporels à l'encontre de l'utilisateur ou de l'environnement est jugé important.

Définition 3 *La disponibilité d'une entité est définie comme son aptitude à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné, en supposant que la fourniture de moyens extérieurs nécessaires soit assurée* (AFNOR, 1988).

A partir du moment où l'on constate un problème au niveau de la sécurité ou de la disponibilité de l'entité, la fiabilité se retrouve au centre des débats. Au sens populaire, la fiabilité se définit par une entité sur laquelle on peut compter, qui a la caractéristique d'être fiable. On retrouve cette notion dans l'étymologie anglaise du mot « reliability » avec le verbe « to rely on » qui signifie avoir confiance en quelqu'un ou quelque chose. Une définition plus scientifique et standardisée est donnée ci-dessous.

Définition 4 *La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ou à satisfaire les besoins des utilisateurs, dans des conditions données, pendant une durée donnée* (AFNOR, 1988).

Cette aptitude se mesure par la probabilité que l'entité remplisse sa fonction sur une période de temps donnée (Smith, 1997). Enfin, quand un dysfonctionnement apparait sur l'entité et qu'il faut intervenir pour rétablir ses fonctionnalités, le concept de la maintenabilité est introduit.

Définition 5 *La maintenabilité d'une entité est définie comme son aptitude à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et moyens prescrits* (AFNOR, 1988).

2.1.2 Fiabilité et grandeurs caractéristiques

Dans la sous partie précédente, la fiabilité a été définie d'un point de vue qualitatif. La définition quantitative (ici probabiliste) de ce concept et de ses grandeurs caractéristiques est donnée ci-dessous (Barlow & Proschan, 1996) (Pagès & Gondran, 1980) (Rausand & Høyland, 2004).

Dans le but d'illustrer ces différents concepts, considérons tout d'abord une entité en fonctionnement. Une entité représente soit le système complet, soit un composant élémentaire d'un système. Posons T une variable aléatoire qui mesure la durée de fonctionnement de cette entité avant observation de la défaillance. Cette variable est positive et supposée absolument continue.

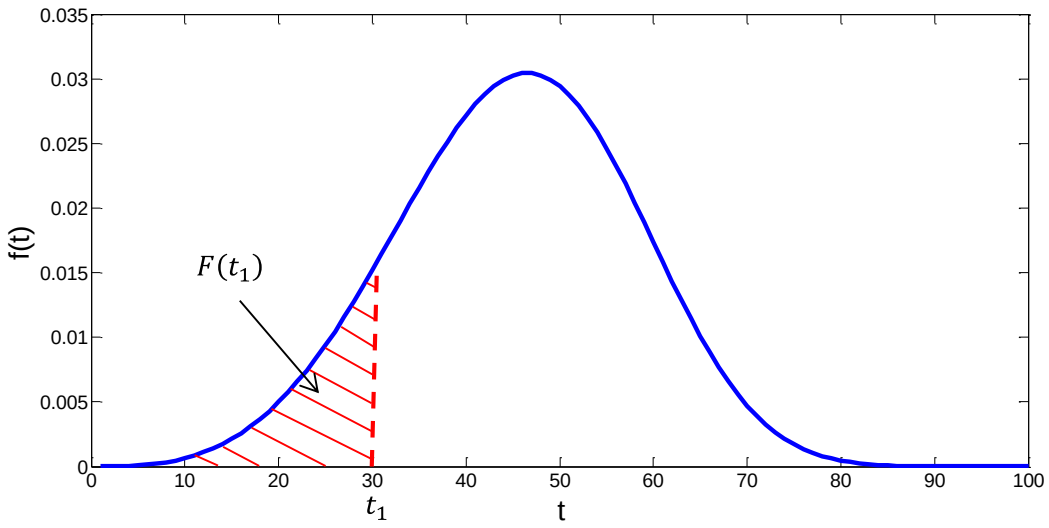

Figure 2.2: Densité de probabilité et fonction de répartition

La fonction de répartition $F(t)$ de la variable aléatoire T est donnée par:

$$\forall\, t \geq 0, \qquad F(t) = P(T \leq t) \tag{2.1}$$

Elle représente la probabilité que l'entité tombe en panne dans l'intervalle $[0, t]$. Cette fonction possède les propriétés suivantes:

$$\lim_{t \to 0} F(t) = 0 \; et \; \lim_{t \to \infty} F(t) = 1 \tag{2.2}$$

La densité de probabilité $f(t)$ de la variable aléatoire T est définie comme:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \tag{2.3}$$

Quand Δt est petit, $f(t) \times \Delta t$ représente la probabilité de défaillance de l'entité sur un petit intervalle de temps après l'instant t. La fonction de répartition $F(t)$ et la densité de probabilité $f(t)$ sont illustrées dans la figure 2.2. Graphiquement, la fonction de répartition $F(t_1)$ est l'aire sous la courbe de la densité de probabilité entre $[0, t_1]$.

La fiabilité $R(t)$ d'une entité est la probabilité qu'elle ne tombe pas en panne dans l'intervalle de temps $[0, t]$. Autrement dit, la probabilité qu'elle survive l'intervalle de temps $[0, t]$ et qu'elle soit encore en fonctionnement à t. La fiabilité $R(t)$ est définie par:

$$\forall\, t \geq 0, \qquad R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) = 1 - \int_0^t f(u)du \tag{2.4}$$

La probabilité conditionnelle que l'entité tombe en panne dans l'intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$ sachant qu'elle est encore en fonctionnement à t est définie par:

$$P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} \tag{2.5}$$

En divisant cette probabilité par la longueur de l'intervalle de temps Δt, et en faisant tendre $\Delta t \to 0$, nous obtenons la définition du taux de défaillance (ou taux de panne) $z(t)$:

$$\forall\, t \geq 0, \qquad z(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t} \times \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{2.6}$$

Le taux de défaillance permet de renseigner sur l'usure ou le vieillissement de l'entité. Un taux de défaillance croissant signale une entité qui « vieillit ». Dans ce contexte, vieillir signifie que la probabilité conditionnelle de défaillance de l'entité augmente à mesure que le temps avance. A l'inverse, quand le taux de défaillance décroit, cette probabilité diminue à mesure que le temps passe. On parlera ici d'un « rajeunissement » de l'entité.

De nombreux travaux ont montré que l'allure du taux de défaillance $z(t)$ pour une entité non réparable a généralement une forme en baignoire (cf. figure 2.3). Dans ce cas, la fonction $z(t)$ se décompose en trois parties:

- La période de jeunesse, synonyme de rodage ou de déverminage, illustre les défaillances précoces que l'on peut observer sur une entité neuve. Pendant cette période, le taux de défaillance est initialement assez fort puis décroit progressivement.

- La période de vie utile, représente la phase la plus importante de la vie d'une entité car c'est le moment où le nombre de pannes est le plus faible. Il est généralement admis de représenter $z(t)$ par une constante pendant cette période.

- La période de vieillissement, identifie la phase d'usure de l'entité pendant laquelle le risque de défaillance va augmenter.

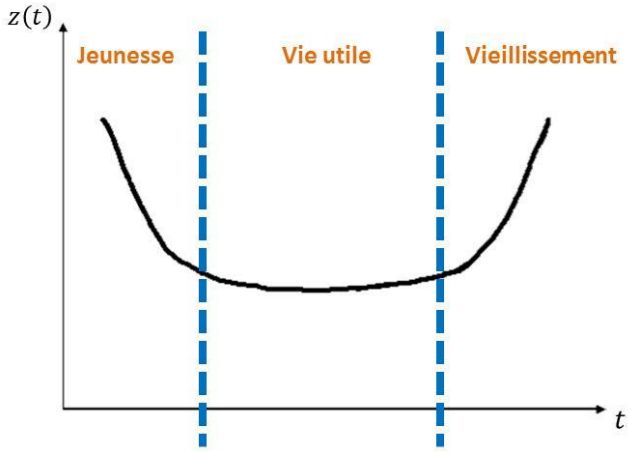

Figure 2.3: Allure générale du taux de défaillance

Enfin, pour clore cette sous partie, la dernière mesure fondamentale de la fiabilité est le $MTTF$ (Mean Time To Failure). Le $MTTF$ d'une entité est la durée moyenne de bon fonctionnement avant sa défaillance. Cette mesure est donnée par:

$$MTTF = \mathbb{E}[T] = \int_0^\infty t f(t) dt \tag{2.7}$$

$$\text{Si } MTTF < \infty, \qquad MTTF = \int_0^\infty R(t) dt \tag{2.8}$$

Dans le monde industriel, cet indicateur joue un rôle important. Il est en effet souvent utilisé pour comparer les fiabilités d'entités fournies par différents constructeurs, même si la comparaison de moyennes pour comparer des lois de durée de vie est peu pertinente.

2.1.3 Fiabilité et méthodes d'évaluation

Précédemment, la fiabilité ainsi que les concepts et grandeurs associés ont été introduits. Dans cette sous-partie, nous nous focalisons sur les méthodes employées en pratique pour évaluer cette fiabilité. Très schématiquement, trois méthodes principales peuvent être distinguées: le recours à des bases de données génériques, la réalisation d'essais et enfin l'utilisation du retour d'expérience (Berthon, 2008).

- Une première démarche employée par les industriels est d'utiliser des bases de données génériques de fiabilité (MIL-HDBK-217F, 1991). Celles-ci proposent des modèles empiriques permettant de calculer le taux de défaillance basique d'une entité donnée. Ce taux de défaillance devra ensuite être ajusté en fonction des paramètres d'utilisation.

- Une toute autre démarche consiste à réaliser des essais sur des entités données pour évaluer leur fiabilité. Ces essais ont pour objectif de mettre l'entité dans des conditions proches de la réalité pour vérifier son fonctionnement. Dans l'industrie des véhicules industriels, un grand nombre de composants possèdent une durée de vie importante. Les essais sur des composants de ce type sont particulièrement longs. Il n'est, dès lors, pas envisageable pour des contraintes de temps et d'argent de réaliser de tels essais. Dans ce contexte, les industriels privilégient des essais dits accélérés. Ces essais consistent à réduire significativement la durée de vie d'une entité par l'accélération des dégradations provoquant la défaillance. Pour retrouver la loi de fiabilité en conditions normales à partir des résultats d'essais accélérés, des modèles spécifiques sont employés (Nelson, 1990). La complexité des essais, qu'ils soient standards ou accélérés, est de reproduire fidèlement les contraintes réelles rencontrées par ces entités.

- Enfin, une autre méthode consiste à évaluer la fiabilité d'une entité à partir des données issues du retour d'expérience. Pour le groupe AB Volvo, celle-ci s'appuie principalement sur l'historique de maintenance des véhicules. Cette méthode a pour avantage de se focaliser sur la fiabilité telle qu'elle est réellement observée par les utilisateurs. Hormis la question du coût, le principal inconvénient est d'attendre plusieurs années avant d'avoir suffisamment de données exploitables. A noter que l'évaluation de la fiabilité à partir du retour d'expérience est la méthode que nous allons privilégier dans cette thèse.

  Pour exploiter ce retour d'expérience, des méthodes statistiques de traitement des données sont introduites. Elles ont pour objectif de proposer des modèles réalistes pour représenter les grandeurs caractéristiques de la fiabilité. Ces modèles seront présentés dans les parties suivantes. Au-delà des modèles proposés, ceux-ci ont des paramètres inconnus qu'il faut estimer. A partir d'un échantillon de données, ces

paramètres peuvent être estimés en utilisant des méthodes d'estimations classiques telles la méthode des moments ou la méthode du maximum de vraisemblance. Si une information a priori est disponible, typiquement un jugement d'expert, l'approche bayésienne peut également être employée. Un autre paramètre, non négligeable, est la qualité des données recueillies. Celles-ci peuvent être manquantes, erronées ou bien encore censurées. La pertinence de notre modèle dépendra fortement de notre capacité à identifier et/ou à corriger ces problèmes de qualité.

2.2 Modèles de survie

Pour évaluer les grandeurs caractéristiques de la fiabilité énoncées précédemment, nous proposons d'utiliser une modélisation stochastique de la défaillance. Dans ce cadre, deux grandes classes de modèles se distinguent: les modèles de survie et les modèles de dégradation. La distinction entre ces modèles est liée au niveau de connaissance disponible sur le fonctionnement de l'entité modélisée.

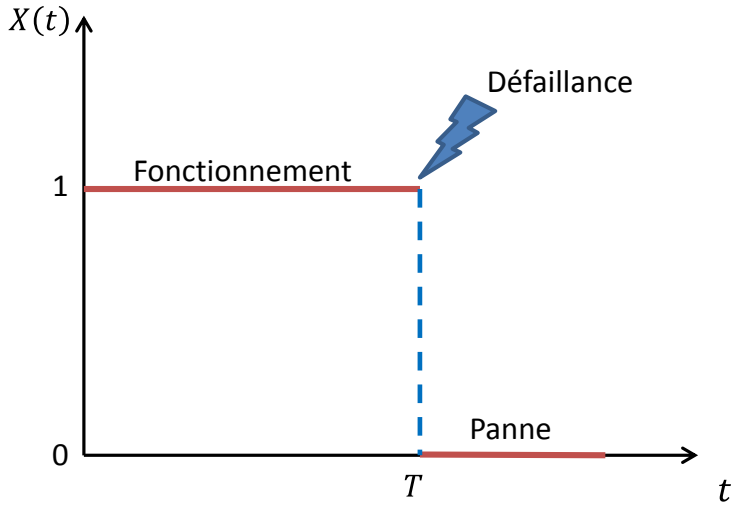

Figure 2.4: Fonctionnement d'une entité à deux états

Pour les modèles de survie, cette connaissance se limite à une information binaire, l'entité est soit en fonctionnement, soit en panne (cf. figure 2.4). Son état à un instant t peut être décrit par une variable d'état $X(t)$ tel que:

$$X(t) = \begin{cases} 1 & \text{si l'entité fonctionne} \\ 0 & \text{si l'entité est en panne} \end{cases} \tag{2.9}$$

Cette modélisation ne prend pas en compte les états intermédiaires entre l'état neuf et la défaillance. Pour ces modèles, il s'agit généralement de définir une loi de probabilité décrivant la durée de fonctionnement T de l'entité. Dans cette partie, nous nous focalisons sur les lois de probabilité les plus utilisées en fiabilité. Nous abordons également les modèles de survie qui intègrent la prise en compte d'un environnement dynamique.

2.2.1 La loi exponentielle

Cette sous-partie introduit la loi exponentielle et ses applications. Une variable aléatoire T suit une loi exponentielle de paramètre θ, notée $\exp(\theta)$, si et seulement si sa densité de probabilité $f(t)$ s'exprime de la façon suivante:

$$f(t) = \theta e^{-\theta t} \text{ pour } t \geq 0, \theta > 0 \tag{2.10}$$

La fonction de fiabilité $R(t)$ est définie par:

$$R(t) = e^{-\theta t} \text{ pour } t \geq 0 \tag{2.11}$$

La durée moyenne de bon fonctionnement correspond à:

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt = \int_0^\infty e^{-\theta t}dt = \frac{1}{\theta} \tag{2.12}$$

Enfin, le taux de défaillance $z(t)$ est donné par:

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\theta e^{-\theta t}}{e^{-\theta t}} = \theta \tag{2.13}$$

Ce résultat illustre la propriété principale de cette loi, un taux de défaillance constant. Celui-ci implique que les entités modélisées par cette loi ne se dégradent pas et ne s'améliorent pas. Si $T \sim \exp(\theta)$, alors:

$$P(T > t + x | T > t) = \frac{R(t+x)}{R(t)} = \frac{e^{-\theta(t+x)}}{e^{-\theta t}} = e^{-\theta x} = R(x) \tag{2.14}$$

Cette loi est souvent appelée loi « sans mémoire » dans le sens où la probabilité que l'entité fonctionne est « sans mémoire » du temps t écoulé. L'entité est en quelque sorte considérée comme neuve à l'instant t. Cette propriété d'absence de mémoire restreint le champ d'application de cette loi. En théorie, elle ne peut être employée que pour des entités qui ne s'usent pas. Elle est ainsi principalement utilisée pour des composants électroniques ou pour modéliser la fiabilité d'un logiciel. En pratique, elle est également utilisée pour modéliser la phase de durée de vie utile de systèmes mécaniques.

Cependant, comme la plupart des entités se dégradent, d'autres lois permettant de prendre en compte cette caractéristique doivent être introduites. Certaines de ces lois sont présentées dans les sous-parties suivantes.

2.2.2 La loi de Weibull

Autre loi prépondérante en fiabilité, la loi de Weibull et ses applications sont illustrées ci-dessous. La durée de fonctionnement T d'un système suit une loi de Weibull de paramètres $\eta > 0$ et $\lambda > 0$, si sa fonction de répartition $F(t)$ est donnée par:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\eta}} \text{ pour } t \geq 0 \tag{2.15}$$

Notons que, dans l'expression ci-dessus, η correspond au paramètre de forme et λ au paramètre d'échelle. Le paramètre d'échelle informe sur l'étendue de la distribution. Le paramètre de forme, quant à lui, est associé à la cinétique du processus observé.

La densité de probabilité correspondante est:

$$f(t) = \frac{d}{dt}F(t) = \frac{\eta}{\lambda}\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\eta-1} e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\eta}} \text{ pour } t \geq 0 \tag{2.16}$$

La fonction de fiabilité $R(t)$ pour cette loi est définie par:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\eta}} \text{ pour } t \geq 0 \tag{2.17}$$

La durée moyenne de bon fonctionnement est:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \lambda\Gamma\left(\frac{1}{\eta} + 1\right) \tag{2.18}$$

avec $\Gamma(.)$ la fonction gamma qui s'exprime de la façon suivante:

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} t^{a-1}e^{-t}dt \tag{2.19}$$

Enfin, le taux de défaillance $z(t)$ est donné par:

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\eta}{\lambda}\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\eta-1} \text{ pour } t \geq 0 \tag{2.20}$$

Contrairement à la loi exponentielle, le taux de défaillance de la loi de Weibull est fonction du temps. Cela permet, en faisant évoluer les paramètres, de modéliser des situations où l'entité s'améliore ($\eta < 1$), où l'entité se dégrade ($\eta > 1$) mais également des situations où

l'entité ne s'use pas et ne s'améliore pas ($\eta = 1$). La figure 2.5 permet d'illustrer ces différentes situations. La grande flexibilité de cette loi justifie son utilisation récurrente pour les modélisations de durées de vie.

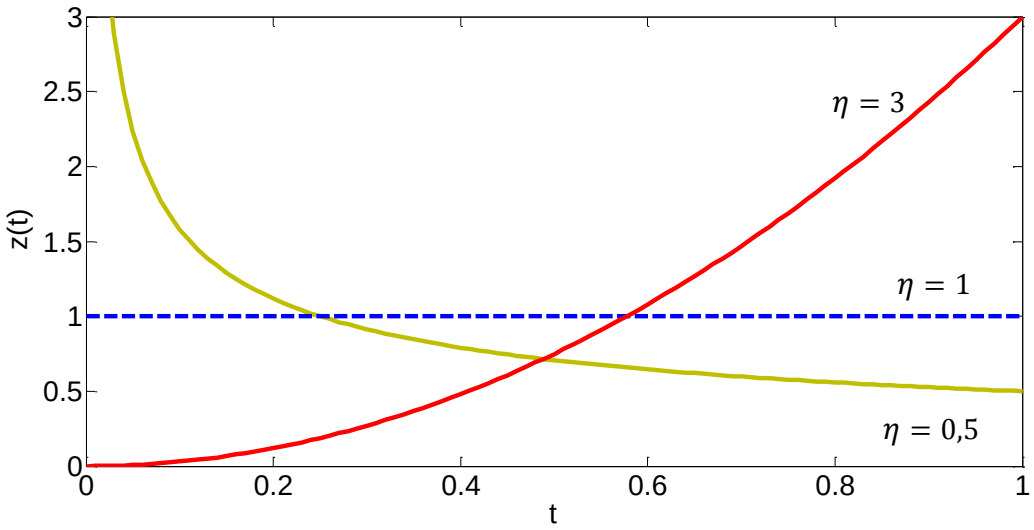

Figure 2.5: Taux de défaillance de la loi de Weibull, $\lambda = 1$

2.2.3 Autres lois usuelles

Dans cette sous-partie, nous allons présenter succinctement deux autres lois utilisées pour modéliser la fiabilité d'une entité: la loi Gamma et la loi Lognormale. La fonction de répartition, la fiabilité et le taux de défaillance de ces lois ont la particularité de ne pas avoir d'expression explicite. Seule l'expression de la densité de probabilité $f(t)$ et du $MTTF$ seront introduits.

- Loi Gamma

La durée de fonctionnement T d'une entité suit une loi Gamma de paramètre de forme $\alpha > 0$ et de paramètre d'échelle $\beta > 0$, si sa densité de probabilité $f(t)$ est donnée par:

$$f(t) = \frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} e^{-\beta t} t^{\alpha-1} \quad \text{pour } t > 0 \tag{2.21}$$

avec $\Gamma(.)$ la fonction gamma définie au paragraphe 2.2.2.

La durée moyenne de bon fonctionnement correspondante est:

$$MTTF = \frac{\alpha}{\beta} \tag{2.22}$$

En utilisant les propriétés de cette loi, on peut montrer que la loi d'une somme de $\alpha \in \mathbb{N}^*$ variables aléatoires indépendantes de loi $\exp(\beta)$ est une loi $\mathrm{Gamma}(\alpha, \beta)$. De même, la somme de deux variables aléatoires indépendantes de loi $\mathrm{Gamma}(\alpha_1, \beta)$ et $\mathrm{Gamma}(\alpha_2, \beta)$ a pour loi $\mathrm{Gamma}(\alpha_1 + \alpha_2, \beta)$.

- Loi Lognormale

La durée de fonctionnement T d'une entité suit une loi Lognormale de paramètres $m \in \mathbb{R}$ et $\sigma^2 > 0$, si $\ln T$ est de loi Normale $N(m, \sigma^2)$. En se basant sur cette définition, la densité de probabilité de la loi Lognormale est donnée par:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln t - m)^2\right)} \quad \text{pour } t > 0 \tag{2.23}$$

La durée moyenne de bon fonctionnement est:

$$MTTF = e^{\left(m + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \tag{2.24}$$

Même si le taux de défaillance n'a pas d'expression explicite, notons que sa forme générale croît dans une première phase puis décroit en tendant vers 0 dans une seconde phase (cf. figure 2.6). Cette loi a donc vocation à modéliser des entités qui se dégradent puis s'améliorent au bout d'un certain temps.

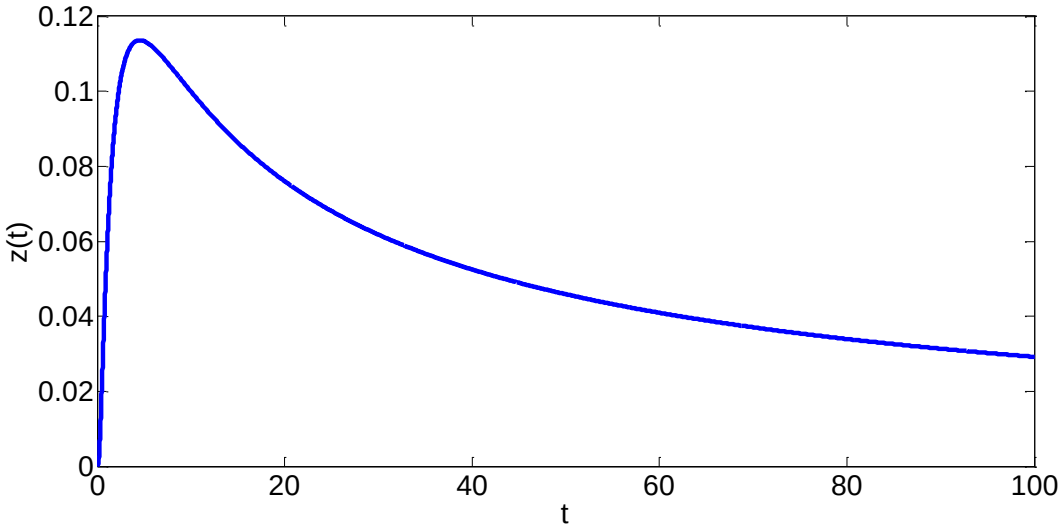

Figure 2.6: Forme générale du taux de défaillance d'une loi Lognormale

2.2.4 Modèles de survie et environnement dynamique

Un véhicule industriel est un système complexe du fait de sa mobilité mais aussi de son environnement opérationnel très changeant. Suivant les caractéristiques de cet environnement dynamique, la nature ou la vitesse de la dégradation des composants peuvent varier. Dans ce contexte, l'hypothèse simplificatrice qui consiste à négliger l'impact de l'environnement sur la dégradation de l'entité doit être abandonnée. Cela nécessite d'être en mesure de modéliser les interactions entre cet environnement dynamique et la progression du composant vers la panne.

On observe actuellement dans la littérature un intérêt accru pour la prise en compte des covariables (Singpurwalla, 1995). Une covariable se définit comme une variable externe à l'entité qui influence sa dégradation. Certaines covariables influencent plus ou moins l'état de santé des composants. Il faut donc être capable d'identifier les covariables les plus représentatives. Cette identification est souvent réalisée avec l'aide des experts composants. Pour des systèmes industriels, les covariables représentent souvent des grandeurs relatives aux conditions d'utilisation et à l'environnement opérationnel (Khoury, 2012). Typiquement, pour un véhicule industriel, ces covariables sont:

- la topographie de la route,
- l'altitude,
- la température extérieure,
- la charge du véhicule,
- le type de trajet,
- le revêtement de la route,
- etc.

Différents modèles de survie intégrant des covariables existent (Fusaro et al., 1993) (Myers, 1981). Nous présentons ici les modèles à hasard proportionnel. Ces modèles permettent d'exprimer le taux de défaillance en fonction du temps et des variables explicatives. L'hypothèse de risques proportionnels signifie que le risque d'un individu possédant une caractéristique donnée est multiplié par une constante, en comparaison avec les individus qui ne possèdent pas cette caractéristique (Deloux, 2008). Parmi les modèles à hasard proportionnel disponibles dans la littérature, le modèle de Cox (Cox, 1972) est le plus connu. Ce modèle a d'abord été utilisé en bio-statistique avant d'être utilisé en fiabilité (Ansell & Phillips, 1997).

Cependant, même si la prise en compte des covariables permet d'estimer les grandeurs de fiabilité dans un environnement dynamique, ces modèles ne sont pas en mesure de rendre compte de l'état de santé d'un composant spécifique.

2.3 Modèles de dégradation

Les modèles de survie, présentés dans la partie précédente, ne permettent pas de décrire l'évolution de l'entité vers la panne. Pour modéliser cette évolution d'une manière plus fine, une seconde classe de modèles, dit modèles de dégradation, est introduite. Contrairement aux modèles de survie, ils font référence à des modèles dont l'espace d'état ne se réduit pas uniquement à un état de marche et de panne. On suppose alors qu'il existe des états intermédiaires, appelés également états dégradés. Pour mettre en place ce genre de modélisation, la première étape consiste à définir un indicateur de dégradation directement lié à l'état de détérioration de l'entité. Le principal objectif vise ensuite à représenter l'évolution de cet indicateur, noté $Z(t)$. Une entité est considérée en panne lorsque son indicateur de dégradation dépasse un certain seuil, noté L. Dans ce cadre, les modèles de survie et les modèles de dégradation peuvent être vus comme deux modélisations possibles d'une même entité avec des niveaux d'informations différents.

Premièrement, cette partie est consacrée à la présentation des différents modèles disponibles pour décrire l'évolution de l'indicateur de dégradation. Le choix entre ces modèles est basé sur la nature de la dégradation que l'on souhaite modéliser. Nous nous focalisons ensuite sur un modèle particulier, le processus Gamma, très utilisé pour représenter la détérioration de systèmes industriels. Enfin, les problématiques liées à la modélisation de la dégradation dans un environnement dynamique sont introduites.

2.3.1 Différentes classes de dégradation

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les modèles de dégradation ne se limitent pas à un fonctionnement binaire mais intègrent des états supplémentaires entre l'état de marche et l'état de panne. Pour modéliser l'évolution de la dégradation d'une entité, il est nécessaire de déterminer des lois de passage entre les différents états. Cette modélisation devra tenir compte de la nature de l'indicateur de dégradation que l'on décide de suivre. Pour ce faire, on distingue généralement deux grandes classes de dégradation : les modèles à dégradation discrète et les modèles à dégradation continue (Deloux, 2008).

- Les modèles à dégradation discrète font référence à des dégradations de type chocs (cf. figure 2.7). Chaque choc, à occurrence aléatoire, va incrémenter la dégradation de l'entité modélisée. Cet incrément de dégradation peut être déterministe ou aléatoire. Un choc entraine un saut d'un état de dégradation à un autre. Entre deux chocs consécutifs, on considère que l'état du système reste stable. Les incréments de dégradation s'additionnent jusqu'à la défaillance totale de l'entité. Pour cette classe de dégradation, les processus markoviens ou semi-markoviens sont généralement utilisés (Castanier, 2002). En pratique, la caractérisation des transitions entre les différents états peut s'avérer délicate. De plus, un grand nombre de données est nécessaire pour garantir la pertinence de l'estimation.

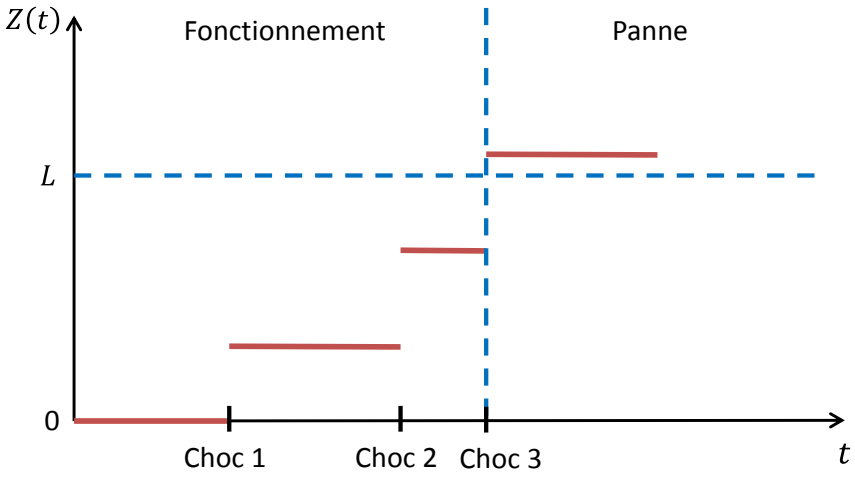

Figure 2.7: Représentation d'un modèle à dégradation discrète

- Les modèles à dégradation continue sont, quant à eux, pertinents pour modéliser des phénomènes tels que la fatigue, l'érosion graduelle d'un matériau ou encore l'usure progressive d'une pièce mécanique, etc. Pour ces modèles, il est nécessaire de connaître la loi des incréments de dégradation entre deux instants consécutifs afin de prédire le niveau de dégradation à tout instant (cf. figure 2.8). On considère généralement que le processus de dégradation est markovien. Cela implique que les incréments de détérioration ne dépendent ni de l'âge, ni de l'état de santé de l'entité mais uniquement de la durée d'observation. Cette hypothèse se justifie naturellement si la seule information disponible sur l'état de l'entité est l'accroissement de sa dégradation entre deux observations. Les propriétés d'indépendance et de stationnarité des incréments conduisent à retenir la classe des processus de Lévy (Asmussen, 2003) pour la modélisation de la dégradation d'une entité. Ces processus sont détaillés dans la sous-partie suivante.

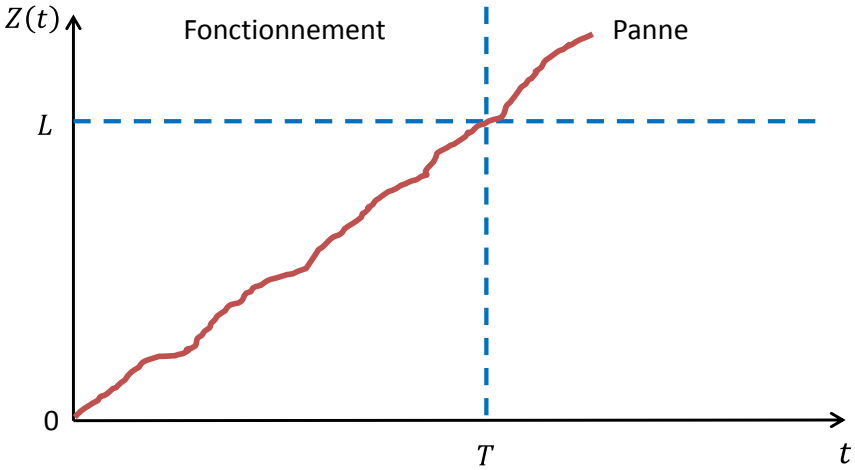

Figure 2.8: Représentation d'un modèle à dégradation continue

2.3.2 Processus de Lévy

Les modèles à dégradation continue conviennent pour représenter des phénomènes observables sur de nombreux systèmes industriels. Ce constat conduit naturellement à nous focaliser sur cette classe de dégradation et plus particulièrement sur les processus de Lévy (Bagdonavicius & Nikulin, 2009) (Singpurwalla, 1995). La famille des processus de Lévy comporte principalement deux types de processus: les processus de Wiener et les processus Gamma.

Le processus de Wiener est un processus de Lévy à trajectoire continue dont les incréments suivent des lois normales. Il permet de modéliser une dégradation continue et croissante en moyenne mais non monotone. Cela signifie que l'incrément de dégradation a une probabilité non nulle d'être négatif. Cette propriété tolérée dans certaines conditions (Whitemore, 1995) (Antelman & Savage, 1965) (Crowder & Lawless, 2007) ne permet pas de modéliser des dégradations monotones comme la propagation d'une fissure ou les phénomènes d'usure par abrasion. Il est donc nécessaire de se tourner vers des processus qui privilégient la monotonie.

En théorie, un processus de Lévy ne peut pas être utilisé pour modéliser une dégradation à la fois continue et croissante. La solution consiste alors à se placer dans le cas limite d'un processus de sauts présentant un nombre infini de sauts sur un intervalle de temps fini. Cette solution implique que la loi de probabilité des incréments soit à support positif et infiniment divisible. Cela nous amène à introduire un processus qui vérifie ces conditions: le processus Gamma.

Le processus Gamma est un processus de Lévy dont les incréments de dégradation suivent une loi Gamma (Abdel-Hameed, 1975). Cette caractéristique donne aux processus Gamma une grande flexibilité pour modéliser des comportements de dégradation très différents. Notons que la loi Gamma est à support positif. Par conséquent, le processus Gamma définit un processus à accroissements positifs, adapté à la modélisation de dégradation continue et monotone contrairement au processus de Wiener. Nous modélisons ainsi le fait que l'état de santé de l'entité ne peut pas s'améliorer sans intervention extérieure. Ce processus a été largement utilisé dans la littérature pour modéliser des phénomènes aussi variés que l'usure par abrasion, la fatigue, la corrosion, la croissance des fissures, etc (Bouvard, 2010) (Van Noortwijk, 2009) (Lawless & Crowder, 2004).

Un processus Gamma stationnaire $X(t),\ t > 0$, de paramètre de forme α et de paramètre d'échelle β est défini mathématiquement de la façon suivante (cf. figure 2.9):

- $X(0) = 0$;
- Les incréments de $X(t)$ sont indépendants ;
- Quelque soit $t > 0$ et $h > 0$, la loi d'accroissement $X(t+h) - X(t)$ suit une loi Gamma de densité:

$$f(x) = \frac{\beta^{\alpha h}}{\Gamma(\alpha h)} x^{\alpha h - 1} e^{-\beta x} \quad \text{pour } x > 0 \tag{2.25}$$

avec $\Gamma(.)$ la fonction gamma définie au paragraphe 2.2.2.

Notons que la méthode la plus courante pour l'évaluation des paramètres du processus Gamma est la méthode du maximum de vraisemblance (Van Noortwijk, 2009). On définit ensuite l'espérance E et la variance V des incréments telles que:

$$E = \frac{\alpha}{\beta} \quad et \quad V = \frac{\alpha}{\beta^2} \tag{2.26}$$

Pour les entités dont la dégradation est définie par un processus Gamma de paramètre α et β, la défaillance apparaît suite à un excès de dégradation. Autrement dit quand l'indicateur de dégradation $Z(t) > L$. Dans ce cadre, la fonction de répartition est donnée par:

$$F(t) = P(T \leq t) = \frac{\Gamma(\alpha t, L\beta)}{\Gamma(\alpha t)} \tag{2.27}$$

La fiabilité, quant à elle, s'exprime par:

$$R(t) = P(T > t) = P(Z(t) < L) = 1 - \frac{\Gamma(\alpha t, L\beta)}{\Gamma(\alpha t)} \tag{2.28}$$

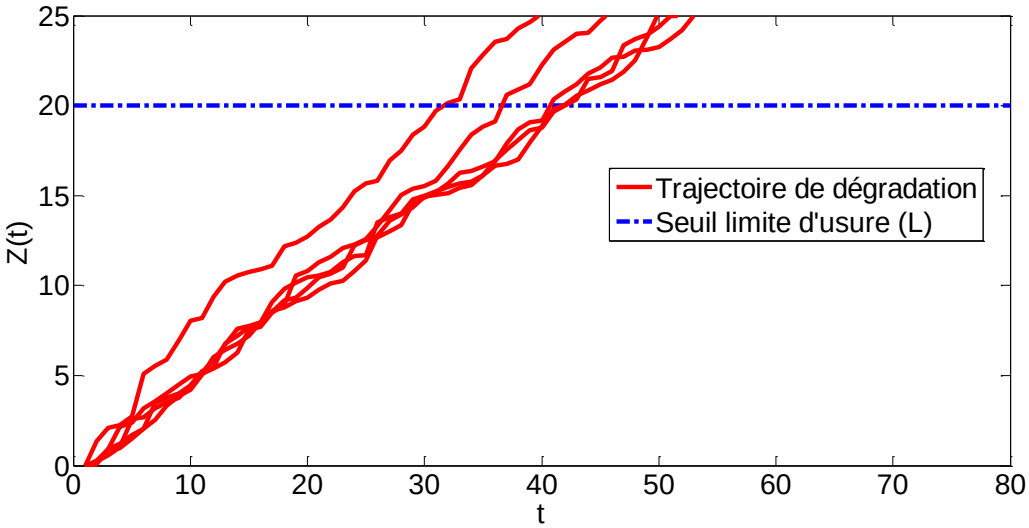

Figure 2.9: Illustration de trajectoires de dégradation issues d'un processus Gamma de paramètre $\alpha = 2$ et $\beta = 4$

Précisons que la connaissance de cet indicateur de dégradation $Z(t)$ entraine une mise à jour de la fiabilité conditionnelle de l'entité beaucoup plus fine que la simple connaissance de l'état marche/panne. Cette information permet d'influencer l'évaluation de la durée de

vie résiduelle de l'entité et potentiellement de modifier les décisions de maintenance. Ces différents points sont détaillés dans le chapitre suivant.

2.3.3 Dégradation et environnement dynamique

Dans la partie 2.2.4, nous avons précisé que l'environnement dynamique dans lequel évoluait le véhicule industriel pouvait impacter la dégradation des composants. Dans ce contexte, l'objectif est de construire un modèle de dégradation capable de prendre en compte les informations complémentaires fournies par les covariables pour expliquer au mieux le phénomène de détérioration (Fouladirad et al., 2008) (Saassouh, 2007). Cette capacité à intégrer l'environnement dynamique dans les modèles de dégradation vise, au final, à améliorer le processus de décision de maintenance.

Pour une entité exposée à une dégradation continue, l'effet des covariables peut prendre différentes formes. Premièrement, intéressons-nous au cas où la covariable impacte directement la dégradation (Deloux et al., 2008). Cet impact peut être ponctuel (Wang & Pham, 2011), en entrainant une augmentation soudaine du niveau de détérioration, ou temporel en modifiant la vitesse et/ou la variance de la dégradation (Zhao et al., 2010) (Ponchet et al., 2010). Dans le cas du processus Gamma, cet effet temporel est pris en compte à travers les paramètres de forme et d'échelle qui seront définis en fonction des covariables. Celles-ci peuvent également avoir un impact direct sur la défaillance en modifiant notamment le seuil à partir duquel l'entité sera non-fonctionnelle (Wang & Coit, 2007). Dans ce cas, le seuil de défaillance apparaît comme une variable aléatoire dépendant de la valeur des covariables.

2.4 Fiabilité des systèmes

Les parties précédentes se sont concentrées sur la définition qualitative et quantitative de la fiabilité ainsi que sur la modélisation stochastique de la défaillance d'une entité. L'objectif affiché dans cette dernière partie est de définir les outils méthodologiques à notre disposition pour intégrer la structure du système dans l'évaluation de la fiabilité.

Pour évaluer la fiabilité d'un système, une première approche consiste à considérer le système comme un tout, sans envisager une décomposition en composants élémentaires. La modélisation de la fiabilité du système complet est alors basée directement sur les modèles présentés dans les parties précédentes. Cette approche, appelée « boite noire », ne permet pas d'intégrer la structure générale du système dans l'évaluation de la fiabilité.

Par opposition, une seconde approche appelée « boîte blanche », vise à prendre en compte cette structure dans le calcul de la fiabilité. Dans ce cadre, il va falloir être capable de modéliser la fiabilité de chaque composant élémentaire et de définir la logique de

fonctionnement du système. Afin de répondre aux objectifs détaillés dans le chapitre 1, cette approche est retenue dans la suite de cette thèse.

Dans cette partie, nous présentons premièrement les méthodes à notre disposition pour analyser et représenter la logique de fonctionnement du système. Dans un second temps, nous détaillons les calculs de fiabilité associés aux différents types de structures élémentaires.

2.4.1 Analyse et représentation de la structure fiabiliste

Pour définir la logique de fonctionnement d'un système, l'objectif est de déterminer comment le fonctionnement ou la panne de chaque composant élémentaire va impacter le système global. Pour atteindre cet objectif, une première étape consiste à réaliser une Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) (Rausand & Høyland, 2004).

Cette technique est apparue initialement dans le secteur aéronautique, puis s'est répandue dans les principales industries (automobile, chimique, nucléaire, etc…). Elle est utilisée pour identifier les modes de défaillances des composants élémentaires et pour étudier les effets que ces pannes peuvent entraîner sur le système. Durant cette analyse, chaque panne est considérée individuellement. Les conséquences engendrées par la présence de plusieurs pannes sur des composants élémentaires ne sont pas étudiées. Cette propriété ne permet donc pas de s'adapter à la structure du système étudié si celui-ci contient des redondances. Cette limite conduit le plus souvent à considérer une AMDEC comme un travail préliminaire avant des études de fiabilité plus poussées.

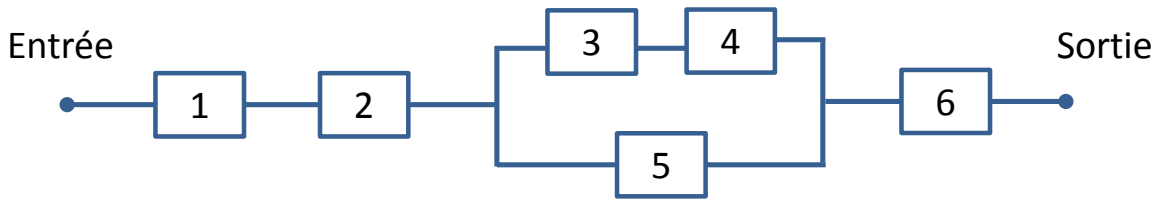

Figure 2.10: Représentation d'un diagramme de fiabilité

Pour remédier à cette limite, plusieurs méthodes complémentaires peuvent être envisagées: diagrammes de fiabilité, arbre de défaillance, graphe de Markov, réseau de Petri, etc... Dans la suite de cette thèse, nous nous intéressons uniquement à des systèmes constitués de composants élémentaires non réparables. Pour ces systèmes, nous supposons que les composants élémentaires sont indépendants et que l'ordre dans lequel les pannes apparaissent n'a pas d'importance. Dans ce cadre, le diagramme de fiabilité apparait comme la représentation la plus pertinente (Rausand & Høyland, 2004).

Le diagramme de fiabilité est utilisé pour analyser et calculer la disponibilité des systèmes (Pagès & Gondran, 1980). Il correspond à une représentation logique du fonctionnement du système sous forme de graphe. A l'intérieur de ce graphe, les blocs représentent les composants élémentaires du système et les arcs traduisent les relations entre ces composants (cf. figure 2.10). Notons que les liens entre les composants ne correspondent pas à des liens physiques mais uniquement à des liens fonctionnels.

Le système est considéré en marche si au moins un chemin, composé exclusivement de composants en fonctionnement, existe entre son point d'entrée et de sortie. Ce parcours permettant au système de réaliser sa fonction est appelé chemin de succès. Ce cadre de modélisation permet ainsi de s'adapter à la structure du système étudié.

L'intérêt de cette représentation est double (Mihalache, 2007). Premièrement, le diagramme de fiabilité permet de réaliser une analyse qualitative du système en analysant les chemins de succès et les scénarios qui entrainent la panne du système appelés des « coupes ». Cet outil vise également à mener une analyse quantitative en définissant la fiabilité du système étudié à partir de la fiabilité de ses constituants. Ces calculs sont illustrés dans la sous-partie suivante pour des systèmes à structure élémentaire.

2.4.2 Calculs de fiabilité pour des structures élémentaires

Dans les études de fiabilité, nous distinguons généralement deux grands types de structures: les structures élémentaires et les structures complexes (Pagès & Gondran, 1980). Par définition, une structure élémentaire est composée de composants indépendants dont le fonctionnement peut être modélisé par des liaisons séries, parallèles ou une combinaison des deux. Un système qui se décompose uniquement en structures élémentaires est nommé système simple ou compliqué suivant le nombre de composants impliqués. Par opposition, un système à structure complexe considère des dépendances entre les composants et ne se résume pas à des liaisons séries/parallèles.

Par la suite, nous faisons l'hypothèse que les systèmes considérés peuvent être modélisés par des structures élémentaires et non complexes. Dans cette sous-partie, les calculs de fiabilité liés à ces systèmes sont détaillés. Pour exprimer cette fiabilité, nous introduisons les notations suivantes:

- T_{syst} : la durée de bon fonctionnement du système
- T_i : la durée de bon fonctionnement du composant i
- $R_{syst}(t)$: la fiabilité du système à l'instant t
- $R_i(t)$: la fiabilité du composant i à l'instant t

Définition 6 *Un système série est en capacité de remplir sa fonction spécifique uniquement si l'ensemble de ses constituants fonctionne.*

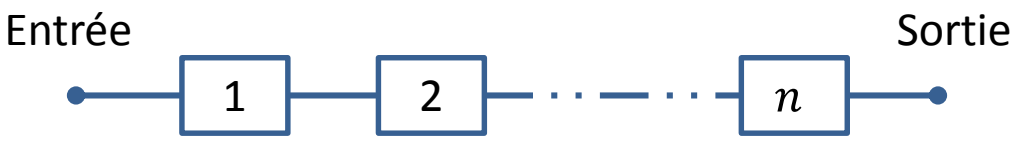

Figure 2.11: Diagramme de fiabilité d'un système série

La figure 2.11 illustre la logique de fonctionnement de ce système. On en déduit donc que la panne dans un système série intervient dès lors qu'un de ses composants ne fonctionne plus. En supposant que le système série est composé de n composants, on peut donc écrire que:

$$T_{syst} = \min_{i=1 \text{ à } n} T_i \tag{2.29}$$

La fiabilité du système est alors:

$$R_{syst}(t) = P\left(T_{syst} > t\right) = P\left(\min_{i=1 \text{ à } n} T_i > t\right) \tag{2.30}$$

Comme nous avons fait l'hypothèse que les composants étaient indépendants, la fiabilité du système ci-dessus devient:

$$R_{syst}(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) \tag{2.31}$$

Définition 7 *Un système parallèle est en capacité de remplir sa fonction spécifique si au moins un de ses constituants fonctionne.*

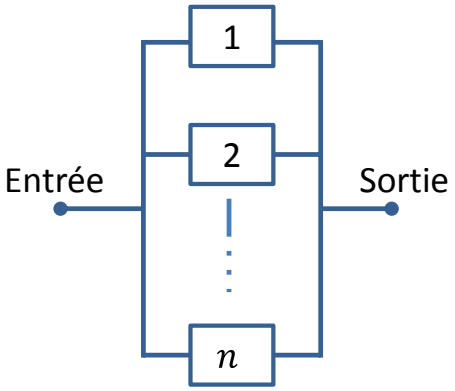

Figure 2.12: Diagramme de fiabilité d'un système parallèle

Autrement dit, le système est en panne quand tous ses composants sont en panne. Cette propriété est illustrée par la figure 2.12 ci-dessus. Contrairement à un système série, la

durée de bon fonctionnement d'un système parallèle est basée sur le composant de durée de vie maximale. On a alors:

$$T_{syst} = \max_{i=1 \text{ à } n} T_i \tag{2.32}$$

En conservant les mêmes hypothèses, la fiabilité du système parallèle devient:

$$R_{syst}(t) = P\left(T_{syst} > t\right) = P\left(\max_{i=1 \text{ à } n} T_i > t\right) = 1 - \prod_{i=1}^{n}\left(1 - R_i(t)\right) \tag{2.33}$$

Cependant, dans de nombreux cas, un système à structure élémentaire est constitué d'une combinaison de systèmes série et parallèle. Pour évaluer la fiabilité de ces systèmes, dits mixtes, on veillera à décomposer le calcul afin de se ramener aux configurations série et parallèle connues.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les questions liées à la modélisation et à l'évaluation de la fiabilité des systèmes ont été abordées. L'approche choisie nous impose de prendre en compte la logique de fonctionnement du système et d'être capable de modéliser la fiabilité de chaque composant qui le compose. Pour exprimer cette fiabilité, plusieurs types de modèles peuvent être envisagés. Leur objectif commun est de décrire l'évolution du composant d'un état de marche vers un état de panne.

Lorsqu'il est impossible de traduire la complexité du mécanisme de défaillance par des modèles physiques, la modélisation stochastique est recommandée. Cette modélisation intègre deux grands types de modèles: les modèles de survie et les modèles de dégradation.

Pour les modèles de survie, plus simples à mettre en œuvre, la connaissance nécessaire se limite à une information binaire marche/panne. La modélisation vise ainsi à définir une loi de probabilité décrivant la durée de fonctionnement du composant. Pour les modèles de dégradation, il est nécessaire de pouvoir définir des états dégradés entre l'état initial et la panne. Cette connaissance supplémentaire permet de pouvoir évaluer l'état de santé de l'entité au cours du temps. Ces deux types de modèles permettent de caractériser la fiabilité des composants du système en s'adaptant, pour chacun d'eux, à la connaissance disponible. En s'appuyant sur ces modèles, un outil tel que le diagramme de fiabilité peut être utilisé pour analyser et évaluer la fiabilité du système en intégrant sa structure.

Cette question de la modélisation de la fiabilité du système correspond à la première étape en vue de répondre aux objectifs mentionnés dans le chapitre précédent. Premièrement, la modélisation explicitée dans ce chapitre retient le principe d'une approche systémique en

utilisant la structure du système pour évaluer la fiabilité. Ensuite, par l'intermédiaire notamment des modèles de dégradation, elle permet d'établir le lien entre la maintenance et la surveillance du système. Cette surveillance prend ici la forme d'informations relatives aux conditions d'utilisation des composants (covariables) mais aussi de mesures de détérioration. L'avantage réside dans la capacité à faire évoluer les caractéristiques de fiabilité des composants et par extension du système à chaque fois qu'une information de surveillance est disponible. Ce lien est primordial pour optimiser le processus de décision à intégrer dans la politique de maintenance dynamique.

Rappelons que notre objectif principal vise à développer une approche systémique impactant conjointement la politique de maintenance et la conception des systèmes. En se basant sur ces premiers développements, la prochaine étape va se concentrer sur la question de la modélisation de la maintenance et l'élaboration de la politique. La difficulté qui s'en suit est de proposer un modèle de maintenance capable de reproduire fidèlement les effets de la maintenance sur l'état du système. Ce modèle est utilisé pour évaluer aussi bien la plus-value de la politique de maintenance développée que les diverses propositions de conception proposées.

Chapitre 3

Modélisation de la maintenance

Ce chapitre vise à faire un tour d'horizon rapide sur l'élaboration, l'évaluation et l'optimisation des politiques de maintenance. Une politique de maintenance a pour objectif de prévenir, éviter ou corriger les dysfonctionnements d'un système. Elle consiste à définir un ensemble de règles permettant de planifier les dates et la nature des actions de maintenance à exécuter. Le but étant à terme de déterminer une politique de maintenance capable d'optimiser le/les critère/s défini/s.

Pour répondre à ce genre de problématique, il est souvent nécessaire de s'appuyer sur une modélisation stochastique de la réalité afin de traduire mathématiquement la complexité des problèmes abordés. Autrement dit, nous avons besoin d'utiliser la modélisation pour évaluer les performances et optimiser la maintenance. Nous devons donc construire un modèle capable de rendre compte de l'évolution de l'état d'un système soumis à une politique de maintenance spécifique. Un modèle de maintenance apparaît ainsi comme un véritable outil d'aide à la décision utilisé pour évaluer et comparer les performances des politiques de maintenance entre elles. Dans cette thèse, cet outil est également utilisé pour évaluer les différentes conceptions proposées pour un système donné.

Le chapitre précédent s'est focalisé sur la modélisation de la fiabilité d'un système qui est la première composante du modèle de maintenance. Ce chapitre vise, plus particulièrement, à présenter les notions générales liées à la maintenance et à introduire un état des lieux des politiques utilisées dans la littérature. Ces différents éléments précisent le contexte de nos travaux, notamment la définition et l'optimisation du processus de décision en maintenance.

3.1 Notions générales

Définition 8 *La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.* (AFNOR, 2001)

Dans cette définition, les termes « maintenir » et « rétablir » introduisent les deux grands aspects de la maintenance. Pour le premier, la notion de prévention est sous-entendue sur une entité supposée encore en fonctionnement. Pour le second, nous assimilons le verbe « rétablir » à une notion de correction sur une entité qui n'est plus en mesure d'accomplir convenablement sa fonction. En s'appuyant sur cette définition, cette partie a pour objectif de présenter les notions générales liées à la maintenance. Nous nous focalisons en premier lieu sur les différents types de maintenance et les moyens d'actions associés avant de se concentrer sur l'évaluation des performances.

3.1.1 Types de maintenance

Pour classifier les différents types de maintenance, deux grandes catégories composées elles-mêmes de sous-catégories se distinguent (cf. figure 3.1): la maintenance corrective et la maintenance préventive (Castanier, 2002) (Rausand & Høyland, 2004).

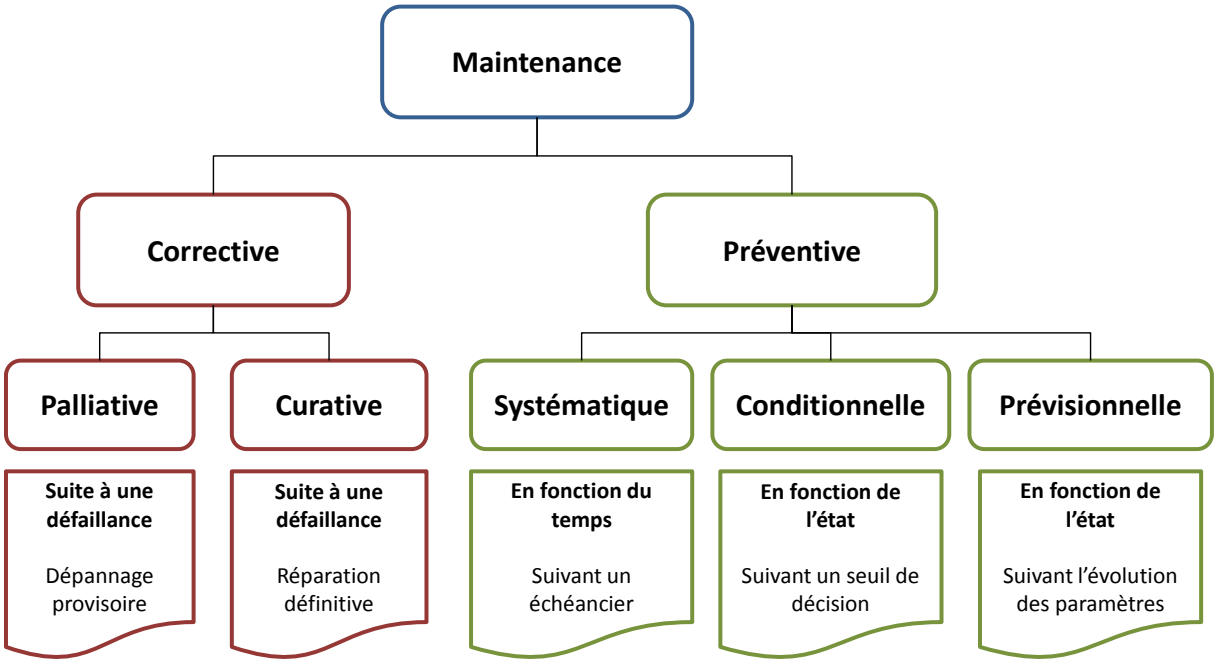

Figure 3.1: Les différents types de maintenance

Définition 9 *La maintenance corrective est la maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise* (AFNOR, 2001).

La maintenance corrective est souvent qualifiée de maintenance passive car c'est la panne de l'entité qui entraine l'action de maintenance. Nous nous retrouvons donc dans une attitude défensive face à une défaillance subie. A l'intérieur de cette catégorie, nous distinguons les maintenances palliative et curative. La maintenance palliative qualifie des opérations de dépannages à caractère provisoire permettant à une entité d'accomplir tout ou une partie de la fonction requise. A l'inverse, la maintenance curative qualifie des réparations permettant à l'entité de retrouver son état initial. Dans ce manuscrit, la maintenance palliative ne sera pas étudiée. Nous assimilons la maintenance corrective uniquement à la maintenance curative.

La maintenance corrective est porteuse de sens lorsque la panne de l'entité n'entraine pas de conséquences économiques majeures ou quand les contraintes en termes de sécurité sont faibles.

Définition 10 *La maintenance préventive est la maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien* (AFNOR, 2001).

Contrairement à la maintenance corrective, elle s'inscrit dans une démarche proactive, en intervenant sur une entité avant que celle-ci ne soit défaillante. La maintenance préventive trouve son intérêt:

- soit pour des raisons de sécurité quand les conséquences de la panne sont jugées inacceptables,
- soit pour des raisons économiques quand la maintenance préventive est beaucoup plus rentable que l'attente passive de la défaillance,
- soit pour des raisons pratiques qui imposent d'effectuer la maintenance à des moments précis.

La maintenance préventive se divise en trois sous-groupes : maintenance systématique, maintenance conditionnelle et maintenance prévisionnelle.

Définition 11 *La maintenance systématique est la maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien*. (AFNOR, 2001).

Avec cette politique de maintenance, les opérations sont effectuées sur la base d'un échéancier déterminé à priori. Les périodes entre deux interventions sont spécifiées, soit par un intervalle de temps, soit par des cycles de fonctionnement. L'objectif consiste uniquement à déterminer au mieux la périodicité des interventions pour optimiser le/les critères préétablis. Ce type de maintenance, très simple à mettre en place, trouve son intérêt quand la surveillance de l'entité est impossible ou quand celle-ci engendre des coûts supérieurs aux gains espérés.

Définition 12 *La maintenance conditionnelle correspond à la maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent* (AFNOR, 2001).

Cette politique de maintenance est subordonnée à l'apparition de certains paramètres révélateurs de la détérioration ou de la baisse de performance de l'entité considérée. Les données recueillies ou mesurées sont comparées à un seuil prédéterminé, appelé également seuil de décision. Le franchissement de ce seuil fonctionne comme une alerte qui déclenche une intervention de maintenance.

Définition 13 *La maintenance prévisionnelle est une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien* (AFNOR, 2001).

Précisions que cette maintenance prévisionnelle intègre également les conditions d'utilisations et l'environnement futurs du système. Contrairement à la maintenance conditionnelle, elle associe une prévision sur les indicateurs de santé pour la prise de décision de maintenance. Pour envisager la mise en place de cette maintenance prévisionnelle, il est nécessaire de maîtriser en détails le comportement de l'entité concernée. L'utilisation de cette connaissance permet d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'intervention doit être exécutée.

Notons que la maintenance conditionnelle (ou prévisionnelle) nécessite souvent plus d'investissements que les autres formes de maintenance. Cette augmentation du coût s'explique principalement par les technologies de surveillance utilisées (capteurs, instrumentation, logiciels …). Dans ce cadre, l'enjeu de la modélisation est de réaliser une analyse coût/bénéfice pour évaluer si la mise en place de ce type de maintenance est pertinente pour une entité donnée.

Ces définitions nous donnent une vision globale des différents types de maintenance qui peuvent s'appliquer à une entité. Cependant, dans la réalité, on emploie généralement une maintenance mixte qui va combiner maintenance préventive et corrective. L'équilibre optimal entre préventif et correctif est déterminé grâce à la modélisation de maintenance.

3.1.2 Moyens d'action de la maintenance

Précédemment, nous avons introduit les différents types de maintenance pouvant être appliqués à une entité. Nous allons, maintenant, nous focaliser sur les moyens d'action de la maintenance. Pour ce faire, nous allons distinguer les opérations de maintenance (maintenance parfaite, imparfaite et minimale) et la surveillance (inspections, contrôles, …).

Maintenance parfaite

Nous allons classifier les opérations de maintenance en fonction du niveau de restauration du système après intervention. Une première classe désigne la maintenance dite parfaite. Elle définit un remplacement complet ou une réparation totale de l'entité lui permettant de retrouver un état aussi bon que neuf (« As Good As New – AGAN »). Nous supposons ainsi que l'entité revient à son état initial à la suite de chaque intervention. Cette opération de maintenance peut aussi bien correspondre à la maintenance préventive ou corrective. Cette hypothèse a été largement utilisée dans la littérature (Huynh, 2011) (Newby & Dagg, 2004). Elle simplifie considérablement la modélisation de la maintenance et l'évaluation des performances.

Maintenance minimale

Une seconde classe désigne la maintenance (ou la réparation) dite minimale (Barlow & Proschan, 1996). Cette forme d'opération curative permet de rendre à l'entité uniquement une partie de ses performances. Nous considérons ainsi qu'elle se retrouve dans un état de

fonctionnement similaire à avant la panne. L'état de l'entité après intervention est supposé aussi mauvais que vieux (« As Bad As Old – ABAO »). Ce type de réparation, associé généralement à la maintenance corrective, permet à l'entité de conclure sa mission en réduisant au maximum le temps d'intervention. Une synthèse des travaux sur la réparation minimale est disponible dans (Ouali et al., 2011).

Maintenance imparfaite

Enfin, la maintenance imparfaite représente le cas intermédiaire entre la maintenance parfaite et la maintenance minimale. Cette maintenance vise à améliorer l'état de l'entité en réduisant par exemple son niveau de dégradation mais sans la remettre à l'état neuf. Ce type d'intervention est adéquat, par exemple, pour une entité utilisée sur une durée limitée. Dans ce cas, la maintenance imparfaite peut assurer la disponibilité du système sur la durée restante à moindre coût (Nicolai et al., 2009) (Wang H. , 2002).

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre précédent, seuls les systèmes multi-composants constitués de composants élémentaires non réparables sont considérés. Pour ces systèmes, seuls les remplacements sont autorisés. Nous supposons donc que les opérations de maintenance effectuées sur un composant élémentaire lui permettent de retrouver son état initial de fonctionnement.

Surveillance

Les opérations de surveillance visent, quant à elles, à informer sur l'état de santé de l'entité et sur ses conditions d'utilisation. Elles sont principalement utilisées dans le cadre d'une politique de maintenance préventive conditionnelle ou prévisionnelle. Suivant la qualité de l'information disponible, l'état de fonctionnement et les conditions d'utilisation sont alors connus parfaitement ou partiellement. Les liens existants entre la maintenance et les informations de surveillance sont détaillés dans la partie suivante.

3.1.3 Evaluation et optimisation des performances

Pour optimiser la maintenance d'une entité donnée, il est primordial de pouvoir évaluer les performances des différentes politiques qui lui sont appliquées. Cette évaluation permet de définir la politique optimale en fonction d'un critère fixé. Notons qu'une multitude de critères existe pour comparer les politiques de maintenance entre elles. Dans la littérature, on distingue généralement trois critères principaux (Huynh, 2011): le critère économique, le critère de disponibilité et le critère de sécurité.

Dans les industries à risques, comme l'aéronautique ou le nucléaire, un dysfonctionnement peut avoir des conséquences catastrophiques. Les politiques de maintenance que l'on applique sur ces entités, soumises à des normes et à des réglementations drastiques, visent avant tout à éviter que ces défaillances se produisent. Dans ce cadre, la sécurité sera bien évidement le critère retenu.

Cependant, hormis ces industries très spécifiques, l'optimisation de la politique de maintenance s'appuie majoritairement sur un critère de coût (Bouvard et al., 2011) (Khoury, 2012). Cette notion de coût est rappelée dans l'introduction de la norme AFNOR (AFNOR, 2001) en précisant que « bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût optimal ». Il s'agit donc de trouver l'équilibre entre maintenances préventive et corrective pour maximiser les effets positifs de la maintenance, tout en minimisant le coût global (cf. figure 3.2). Celui-ci inclut les coûts directs inhérents aux activités de maintenance (inspections, remplacements, logistique, etc.) et les coûts indirects entrainés par leurs conséquences (surmaintenance, indisponibilité, remorquage, perte de cargaison, etc.). Cette définition du coût global de maintenance permet d'intégrer les problématiques de disponibilité dans la prise de décision. Dans la réalité, il est parfois difficile de quantifier les coûts liés à la disponibilité de l'entité. Dans ce cas, un critère basé uniquement sur la disponibilité peut être considéré dans certains travaux (Liao et al., 2006).

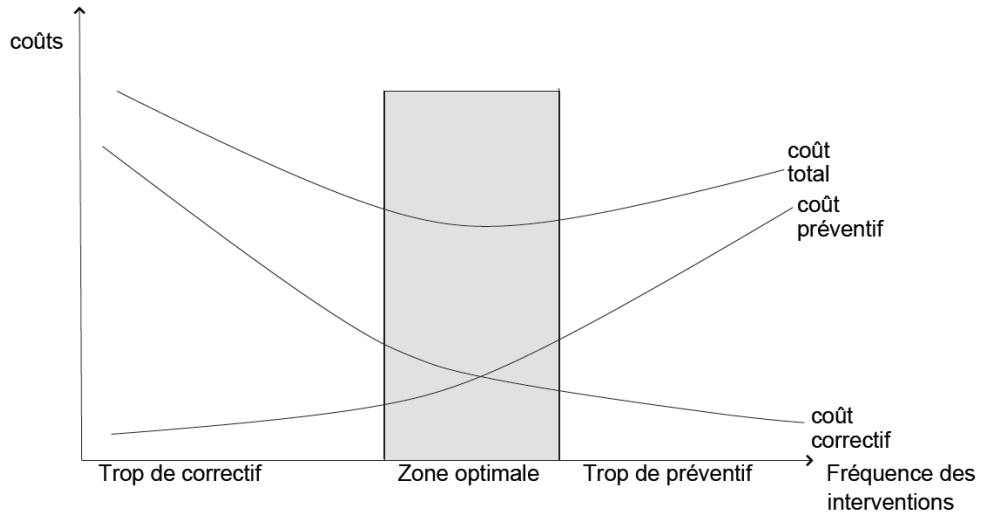

Figure 3.2: Equilibre entre maintenance préventive et maintenance corrective

D'une manière générale, l'évaluation du critère de coût sera fortement liée à l'horizon de temps considéré qui pourra être fini ou infini. Si l'horizon d'optimisation est supposé infini, le coût moyen asymptotique est le plus souvent utilisé pour évaluer les performances des politiques de maintenance. Ce critère, assez simple à calculer, est défini comme étant l'espérance du coût de maintenance par unité de temps. Soit $C(t)$ le coût global de la maintenance sur une durée t, le coût moyen asymptotique C_∞ est donné par:

$$C_\infty = \lim_{t \to \infty} \frac{C(t)}{t} \tag{3.1}$$

Dans le cas où les remplacements permettent à l'entité de retrouver son état initial, un processus de renouvellement peut être considéré (Tijms, 1986). L'étude du coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon infini peut alors se réduire sur un cycle de renouvellement. Dans ce cas, le coût moyen asymptotique s'exprime de la façon suivante:

$$C_{\infty} = \lim_{t \to \infty} \frac{C(t)}{t} = \frac{E\left[C(T_{cycle})\right]}{E\left[T_{cycle}\right]} \tag{3.2}$$

Avec $E\left[C(T_{cycle})\right]$ qui représente le coût moyen sur un cycle et $E\left[T_{cycle}\right]$ qui désigne la longueur moyenne de ce cycle. Dans certains cas, l'horizon fini, plus proche de la réalité industrielle peut également être utilisé. La modélisation mathématique est en général plus complexe à mettre en œuvre dans le cas d'un horizon fini. La difficulté réside avant tout dans la longueur de l'intervalle de temps considéré qui influe fortement sur la pertinence et la robustesse des résultats (Puterman, 1994).

En pratique, pour des politiques de maintenance assez simples, un calcul analytique peut être utilisé afin d'évaluer le coût global de maintenance. Lorsque les politiques se complexifient, des méthodes numériques par simulation stochastique et notamment la méthode de Monte Carlo sont privilégiées.

Dans le cadre de nos travaux, un critère économique intégrant les coûts de maintenance directs et indirects est considéré sur un horizon fini. L'horizon, fixé à 5 ans, correspond à la durée d'un contrat de maintenance dans le secteur des véhicules industriels. Notons que la problématique de disponibilité, très importante dans ce secteur, est intégrée dans le critère économique. Des modèles de coût sont intégrés dans le modèle de maintenance afin de pouvoir comparer les politiques entre elles.

3.2 Maintenance et surveillance

Après avoir rappelé les notions générales liées aux activités de maintenance, nous nous focalisons, dans cette partie, sur la surveillance. Nous allons, dans un premier temps, détailler les différents types d'informations de surveillance ainsi que les problèmes de qualité et de planifications des inspections. Nous évoquons ensuite l'utilisation de ces informations pour la prise de décision en maintenance.

3.2.1 Informations de surveillance

Actuellement, le domaine de la surveillance occupe une place centrale pour élaborer et optimiser la structure de décision d'une politique de maintenance. Il est raisonnable de penser qu'une décision de maintenance est d'autant plus pertinente qu'elle intègre un ensemble riche d'informations sur le système à maintenir et son environnement. Ces informations peuvent concerner l'état courant de l'entité surveillée mais également la connaissance de l'environnement dans lequel celle-ci évolue. Cet essor de la surveillance en maintenance s'appuie principalement sur les nombreux développements technologiques apparus ces dernières années. Ils permettent notamment d'avoir accès à des informations de plus en plus précises sur un certain nombre de systèmes. Néanmoins, l'enjeu n'est pas uniquement d'avoir accès à cette information de surveillance, encore faut-il savoir comment l'utiliser dans le processus de décision de maintenance.

La surveillance d'une entité est fonction de sa complexité, de son accessibilité, de son environnement et des outils de mesures disponibles. Comme nous l'avons mentionné brièvement dans la partie précédente, on distingue généralement deux types de surveillance: la surveillance parfaite et la surveillance imparfaite (Huynh, 2011). Cette classification se base sur la qualité de l'information de surveillance disponible.

Surveillance parfaite

La surveillance parfaite permet d'avoir accès à une information exacte de l'entité surveillée. Nous supposons alors que les mesures ou les données reçues fournissent une information précise et fiable sur l'état courant de l'entité. En pratique, la surveillance « parfaite » ne correspond pas à une surveillance idéalisée, sans erreur, mais plutôt à des situations où les erreurs sont jugées négligeables. Dans la littérature, cette hypothèse est retenue dans un très grand nombre de travaux (Barata et al., 2002) (Dieulle et al., 2003).

Surveillance imparfaite

Cependant, dans certaines conditions, cette hypothèse de surveillance parfaite ne correspond pas à la réalité du terrain. Dans ce contexte, les problématiques liées à la surveillance imparfaite doivent être considérées (Barros, 2006). Parfois, la complexité de l'entité, l'imprécision des mesures de surveillance ou l'environnement dans lequel elle évolue peuvent conduire à une information entachée d'erreurs sur son état courant. En général, nous sommes confronté à des erreurs de diagnostics classiques de type fausse alarme, retard à la détection, non-détection ou encore des erreurs de mesure. La politique de maintenance développée devra alors tenir compte de ces erreurs dans le processus de décision de maintenance. Typiquement, si un test indique que l'entité a atteint un seuil fixé, il est possible que ce soit vrai, mais la structure de décision doit considérer une certaine probabilité que ce soit une fausse alarme. Tout le problème est alors de savoir comment utiliser cette information imparfaite de façon à prendre une décision qui soit meilleure qu'une décision prise sans information.

Surveillance continue

Au-delà de l'aspect qualitatif des informations de surveillance, les problématiques inhérentes à la disponibilité de l'information doivent également être considérées. Nous distinguons ici le cas où l'information de surveillance est disponible de manière continue ou de manière discrète (Goffaux et al., 2009). Pour la surveillance continue, nous supposons que l'état courant de l'entité est disponible à tout instant. Cette surveillance est généralement mise en place pour des entités critiques ou lorsque les coûts de surveillance sont relativement faibles. Pour ces entités soumises à une surveillance continue, les problématiques de maintenance portent généralement sur des contraintes liées aux interventions. Nous pouvons, par exemple, nous intéresser aux délais entre l'apparition d'une alarme et une intervention ou plus simplement à des contraintes sur les instants possibles d'intervention.

Surveillance discrète

A l'inverse, si l'information de surveillance est uniquement disponible à certains instants, au travers d'inspections, les problématiques de maintenance sont toutes autres. A chaque inspection, qui peut aller de la visite élémentaire à une opération de contrôle beaucoup plus sophistiquée, deux décisions doivent être prises:

- 1/ déterminer si une opération de maintenance est nécessaire au vu de l'état actuel de l'entité,
- 2/ déterminer quand doit avoir lieu la prochaine inspection.

Il est donc primordial de planifier au mieux ces inspections pour optimiser la politique de maintenance mise en place. De nombreux schémas d'inspections considèrent une planification périodique, indépendante de l'évolution de l'entité surveillée (Christer & Wang, 1992). L'objectif est donc de déterminer la période optimale d'inspection en fonction de la politique de maintenance appliquée ou à l'inverse de définir la politique optimale étant données les périodes d'inspections (Park, 1988) (Zuckerman, 1989). On trouve également dans la littérature des schémas plus complexes dans lesquels les dates d'inspections sont planifiées de façon dynamique à partir de l'évolution du système (Castanier et al., 2005) (Grall et al., 2002). Ces schémas conviennent particulièrement pour une entité qui se dégrade. Notons qu'une inspection est qualifiée de conservatrice si l'état de l'entité après inspection reste inchangé et de destructrice si son état est altéré.

Surveillance de l'environnement

Les différentes classifications présentées dans cette sous-partie font références à des informations de surveillance relatives à l'état courant de l'entité surveillée (marche, panne, niveau de dégradation). Cependant, la surveillance permet également d'obtenir des informations sur l'environnement opérationnel dans lequel l'entité évolue. Pour des systèmes qui évoluent dans un environnement dynamique, comme les véhicules industriels, cette information est primordiale. En effet, l'état courant de l'entité n'a pas la même signification dans un environnement stressé ou non. Dans ce cadre, il va s'agir de surveiller un ensemble de paramètres qui influence l'évolution de la détérioration de l'entité. Typiquement, pour un véhicule industriel, nous retrouvons la topographie, l'état et le revêtement de la route, la température, la charge transportée, etc…

Coût de la surveillance

Précisons enfin, que l'accès à l'information de surveillance a un coût qu'il convient de prendre en compte dans l'évaluation et l'optimisation de la politique de maintenance. Toute la question est de savoir si les investissements consentis dans l'architecture de surveillance sont compensés par les bénéfices obtenus au niveau de la maintenance. Cette question justifie encore une fois le besoin de modélisation.

Dans cette thèse, nous supposons que le niveau d'information disponible pour les différents composants du système peut ne pas être homogène. Pour certains composants, nous faisons l'hypothèse qu'aucune information de surveillance n'est disponible. Pour d'autres, nous avons accès uniquement à une information binaire marche/panne ou dans le meilleur des cas à une information de dégradation. De la même façon, nous supposons que la connaissance des covariables qui vont influencer la dégradation n'est pas connue de manière homogène pour tous les composants. Nous considérons néanmoins, que les informations de surveillance disponibles sont parfaites.

3.2.2 Surveillance et processus de décision

Pour mettre en place et optimiser une politique de maintenance conditionnelle ou prévisionnelle sur une entité spécifique, la surveillance occupe une place primordiale. Elle permet de mettre à disposition des décideurs un ensemble d'informations leurs permettant de prendre une décision. Dans cette sous-partie, nous allons nous intéresser à la façon dont ces informations de surveillance peuvent être utilisées pour construire un outil d'aide à la décision efficace.

Pour la maintenance conditionnelle, les opérations de maintenance sont déclenchées par l'apparition de paramètres révélateurs de la dégradation de l'entité. Pour prendre la décision de maintenance, le maintenancier s'appuie généralement sur le niveau de dégradation du système. Cet indicateur, largement employé dans la littérature (Castanier et al., 2005) (Fouladirad & Grall, 2011), a pour avantage d'être utilisable directement sans aucune autre transformation. Cependant, il omet totalement le contexte, c'est-à-dire l'environnement dans lequel l'entité évolue. Pour une entité évoluant dans un environnement dynamique très changeant, cette information peut avoir un impact très important sur l'interprétation de la mesure de dégradation. Pour un niveau de dégradation donné, celui-ci pourra être catégorisé comme faible dans un environnement où la détérioration évolue lentement et fort dans le cas contraire.

En résumé, le niveau de dégradation aide à comprendre le passé et le présent de l'entité considérée pour bâtir une décision de maintenance. Cependant, dans l'absolu, le maintenancier a besoin de planifier, de prévoir les interventions à venir. Il est donc préférable de compléter ces informations sur le passé et le présent de l'entité par une caractérisation de son évolution future. Ce constat est la base de la maintenance prévisionnelle qui intègre une part de gestion d'actifs.

Cette approche prévisionnelle intègre surtout des hypothèses sur le futur de l'utilisation du système. Ce type de maintenance préventive est un domaine d'intérêt assez récent en maintenance. Au niveau des résultats, de nombreux travaux montrent la plus-value d'utiliser ce type de maintenance pour optimiser le processus de décision (Khoury, 2012) (Bouvard, 2010) (Carr & Wang, 2011) (Si et al., 2011). Il apparaît donc intéressant et nécessaire de

développer des politiques de maintenance capables de prendre en compte cet aspect prévisionnel.

Après cette distinction entre maintenance conditionnelle et prévisionnelle, intéressons-nous maintenant à illustrer l'impact de l'information de surveillance sur le processus de décision de maintenance. Pour ce faire, nous allons évaluer la durée de vie résiduelle d'une entité suivant les informations de surveillance disponibles. Il s'agit ici de montrer comment les données de surveillance vont permettre d'influencer la décision de maintenance.

Supposons que la dégradation d'un composant suive un processus Gamma de paramètres $\alpha = 1$ et $\beta = 1$ avec une limite de défaillance fixée à $L = 100$. Evaluer la durée de vie résiduelle d'une entité revient à évaluer sa fiabilité conditionnellement à son niveau de dégradation observé. Sachant qu'à l'instant t_1, le niveau de dégradation de l'entité vaut $Z(t_1)$, la fiabilité conditionnelle est donnée par:

$$R(t|Z(t_1)) = 1 - \frac{\Gamma(\alpha(t-t_1),(L-Z(t_1))\beta)}{\Gamma(\alpha(t-t_1))} \tag{3.3}$$

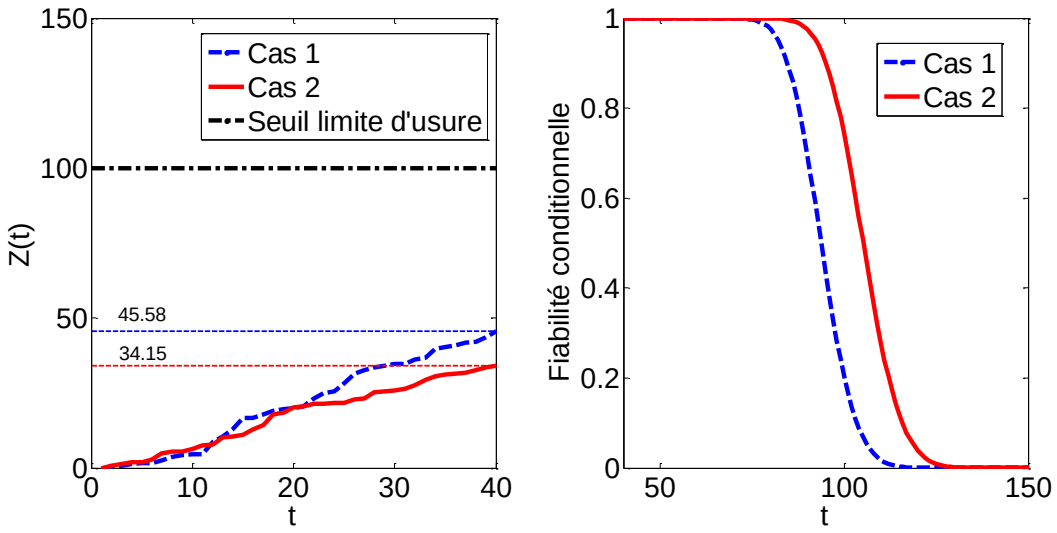

Figure 3.3: Illustration de la mise à jour de la fiabilité conditionnelle basée sur les informations de surveillance

Dans la figure 3.3, nous présentons l'évaluation de cette fiabilité conditionnelle pour deux cas de dégradation distincts. La connaissance du niveau de dégradation, dans les deux cas spécifiés, va permettre d'influencer l'évaluation de la durée de vie résiduelle. Celle-ci étant, en effet, mise à jour en fonction de l'état réel de l'entité. En conséquence, la décision de maintenance peut possiblement être modifiée.

3.3 Politiques de maintenance appliquées à un composant élémentaire

Les deux parties précédentes ont permis de fixer le cadre général dans lequel s'inscrivent l'élaboration et l'optimisation d'une politique de maintenance. Dans cette partie, nous allons détailler les politiques préventives les plus couramment utilisées pour maintenir un composant élémentaire. Dans la littérature, ces politiques se découpent en deux catégories principales en fonction du type d'information utilisée pour prendre la décision de maintenance (Gertsbakh, 1977) (Gertsbakh, 2000).

Dans une première classe, nous regroupons les politiques de maintenance basées exclusivement sur le comportement a priori du composant. Nous utilisons ainsi les modèles de durée de vie ou de dégradation disponibles afin de raisonner en termes de probabilité d'occurrence (probabilité de tomber en panne à chaque instant ou d'être dans un état de dégradation donné en fonction du temps). La seconde classe concerne les politiques basées sur le suivi du niveau de dégradation du composant. Dans ce cas, la décision de maintenance s'appuie toujours sur les modèles de défaillance mais elle est complétée par des informations de surveillance permettant d'accéder à l'état réel (courant) du composant. Nous opposons ainsi l'aspect statique de la première classe à l'aspect dynamique de la seconde. Précisons enfin que cet état de l'art repose sur de nombreux travaux tels que (Wang H. , 2002) (Valdez-Flores & Feldman., 1989) (Sheriff & Smith, 1981).

3.3.1 Politiques basées sur la loi de durée de vie du composant

Dans cette sous-partie, nous nous focalisons sur les politiques de maintenance basées uniquement sur les propriétés a priori du composant sans tenir compte des informations de surveillance. Pour ces politiques, la planification des instants de remplacements repose sur un modèle de défaillance supposé connu. Les actions de maintenance sont alors prévues sur le composant à des échéances fixes sans tenir compte de son état d'usure. Elles sont alors qualifiées de systématiques et de statiques. L'optimisation de ces politiques vise à déterminer la date de remplacement optimale pour minimiser un critère de coût donné. Nous distinguons ici les politiques de remplacement basées sur l'âge et les politiques de remplacement par bloc.

Politique de remplacement basée sur l'âge

Pour la politique de remplacement basée sur l'âge, l'idée directrice est d'éviter au maximum les défaillances du composant en proposant de le remplacer quand son âge atteint les T_0 unités de temps (Rausand & Høyland, 2004). Notons ici que la notion d'âge représente le temps écoulé depuis le dernier remplacement. L'optimisation de cette politique vise à

déterminer l'intervalle de temps T_0 qui offre le meilleur compromis afin de minimiser le coût de maintenance par unité de temps sur un horizon infini. Il s'agit de définir un intervalle de temps ni trop faible pour ne pas entrainer une augmentation significative de la maintenance préventive, ni trop élevé pour éviter l'augmentation du nombre de pannes.

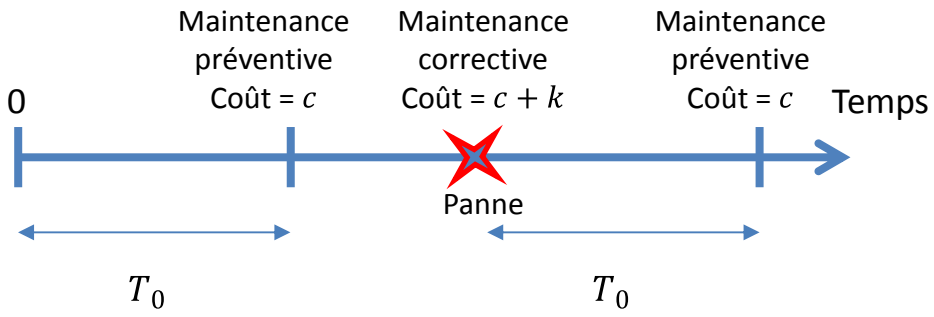

Figure 3.4 : Schéma d'une politique de maintenance basée sur l'âge

Pour définir plus précisément le calcul de cet intervalle de temps optimal T_0^*, on considère que le remplacement préventif d'un composant à l'âge T_0 entraine un coût unitaire de remplacement c et la défaillance d'un composant avant T_0 entraine un coût additionnel k (cf. figure 3.4). En s'appuyant sur ces informations, le coût moyen à long terme par unité de temps est donné par:

$$C_\infty = \lim_{t\to\infty} \frac{C(t)}{t} = \lim_{t\to\infty} \frac{(c+k)E[N_{cor}(t)] + cE\left[N_{prev}(t)\right]}{t} \tag{3.4}$$

avec $N_{cor}(t)$ le nombre de remplacements correctifs sur l'intervalle $[0,t]$ et $N_{prev}(t)$ le nombre de remplacements préventifs sur $[0,t]$. Si on considère que les remplacements effectués permettent au composant de retrouver son état initial de fonctionnement, il est alors possible d'utiliser le théorème de renouvellement. Dans ce cas, le coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon infini s'exprime par:

$$C(T_0) = \frac{E\left[C(T_{cycle})\right]}{E\left[T_{cycle}\right]} = \frac{c + k.F(T_0)}{\int_0^{T_0} R(t)dt} \tag{3.5}$$

La période de remplacement optimale T_0^* est déterminée en minimisant le coût $C(T_0)$ dans l'équation 3.5. Une illustration du coût moyen asymptotique est présentée dans la figure 3.5 pour un composant dont la durée de vie est modélisée par une loi de Weibull de paramètres $\eta = 5$ et $\lambda = 300000$. Nous supposons également un coût unitaire de remplacement $c = 500€$ et un coût additionnel $k \in \{1000€, 4000€, 7000€\}$. Cette figure permet de montrer que plus le coût additionnel k est élevé plus la valeur de la période optimale sera décalée vers la gauche.

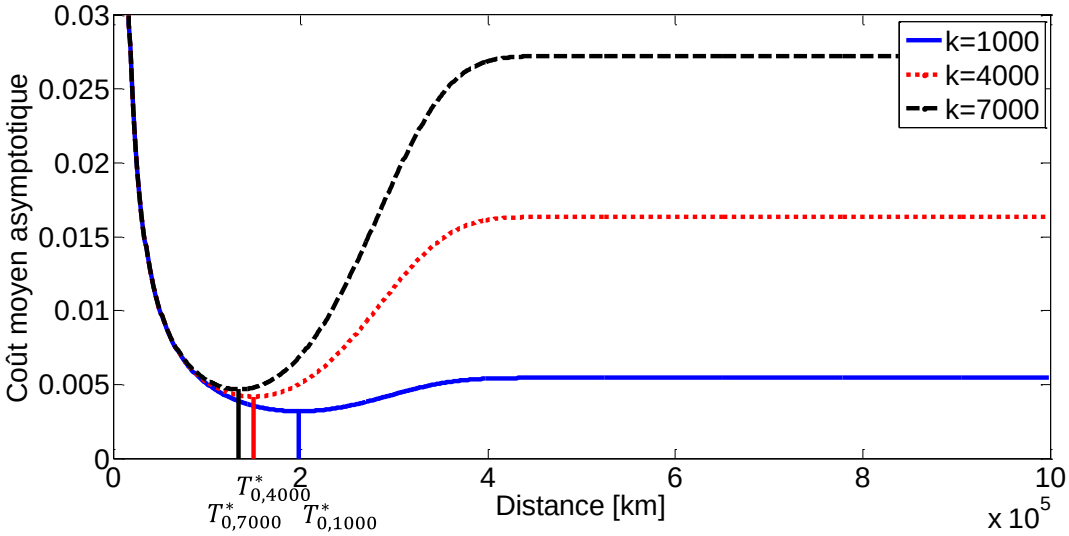

Figure 3.5: Coûts moyens asymptotiques de maintenance pour une politique de maintenance basée sur l'âge

Pour implémenter cette politique de remplacement, il est nécessaire de surveiller l'âge du composant. Cette propriété peut s'avérer problématique car il est parfois difficile, en pratique, de recueillir, de traiter ou de stocker cette information. De plus, cette politique ne permet pas d'établir un calendrier des interventions à long terme. En effet, une défaillance sur le composant conduit à décaler toutes les opérations suivantes. Cependant, il a été démontré que pour un horizon d'études infini, cette politique est la meilleure de la classe des politiques périodiques aléatoires (Barlow & Proschan, 1996).

Politique de remplacement par bloc

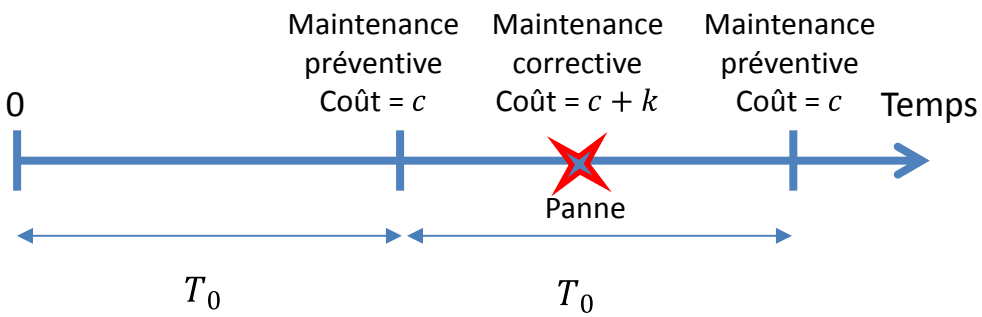

Figure 3.6: Schéma d'une politique de remplacement par bloc

Intéressons-nous maintenant à la politique de remplacement par bloc. Cette politique consiste à remplacer le composant à intervalle régulier de période T_0 sans tenir compte de l'historique des pannes (Barlow & Unter, 1960). Elle s'oppose à la maintenance basée sur l'âge dans le sens où la règle de décision n'est pas réinitialisée après une défaillance. En d'autres termes, le programme de remplacement préventif à $T_0, 2T_0, 3T_0$ … reste inchangé malgré l'apparition d'une panne (cf. figure 3.6).

Comme précédemment, nous nous intéressons au coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon fini. Le paramètre à optimiser est à la période de remplacement T_0. En utilisant le théorème de renouvellement et la supposition qu'un composant ne peut tomber en panne qu'une seule fois sur un intervalle de temps T_0, nous obtenons:

$$C(T_0) = \frac{E\left[C(T_{cycle})\right]}{E\left[T_{cycle}\right]} = \frac{c + (c + k).F(T_0)}{T_0} \tag{3.6}$$

La période de remplacement optimale T_0^* pour cette politique est déterminée en minimisant le coût $C(T_0)$ dans l'équation 3.6. La politique de remplacement par bloc est plus simple à gérer qu'une politique de remplacement basée sur l'âge. Elle offre également la possibilité de déterminer un calendrier d'intervention à long terme, stable au cours du temps. Néanmoins, cette politique n'est souvent pas la meilleure en termes de coût. En effet, nous pouvons être amenés à remplacer des composants presque neufs. Pour réduire les conséquences de ce risque, des travaux proposent d'introduire des réparations minimales lors d'une défaillance ou de considérer un âge minimal, pour le composant, en dessous duquel il ne peut être remplacé (Berg & Epstein, 1976) (Tango, 1978).

3.3.2 Politiques basées sur l'état courant du composant

Nous allons maintenant nous intéresser aux politiques de maintenance basées sur l'état courant du composant. Pour le composant dont la défaillance fait suite à une dégradation graduelle, celui-ci évolue d'un état neuf en passant par différents états intermédiaires avant de tomber en panne. Dans cette sous-partie, nous supposons que le modèle décrivant sa dégradation est connu. Nous faisons également l'hypothèse que des informations de surveillances corrélées à la dégradation du composant sont disponibles.

Il est alors intéressant d'utiliser ces informations pour adapter les décisions de maintenance. Cela permet de faire évoluer la maintenance systématique, présentée dans la sous-partie précédente, vers des politiques plus dynamiques. Dans ce cadre, nous présentons une politique de maintenance conditionnelle et une politique de maintenance prévisionnelle.

Politique de maintenance conditionnelle à la détérioration

Cette politique vise à mieux contrôler le composant en surveillant sa dégradation. Par conséquent, l'objectif est de pouvoir augmenter sa durée d'utilisation, de réduire son coût de maintenance et d'améliorer sa sécurité (Boulenger, 1988). Ce type de maintenance est utilisé de manière préférentielle sur des composants critiques en termes de coût ou de sécurité.

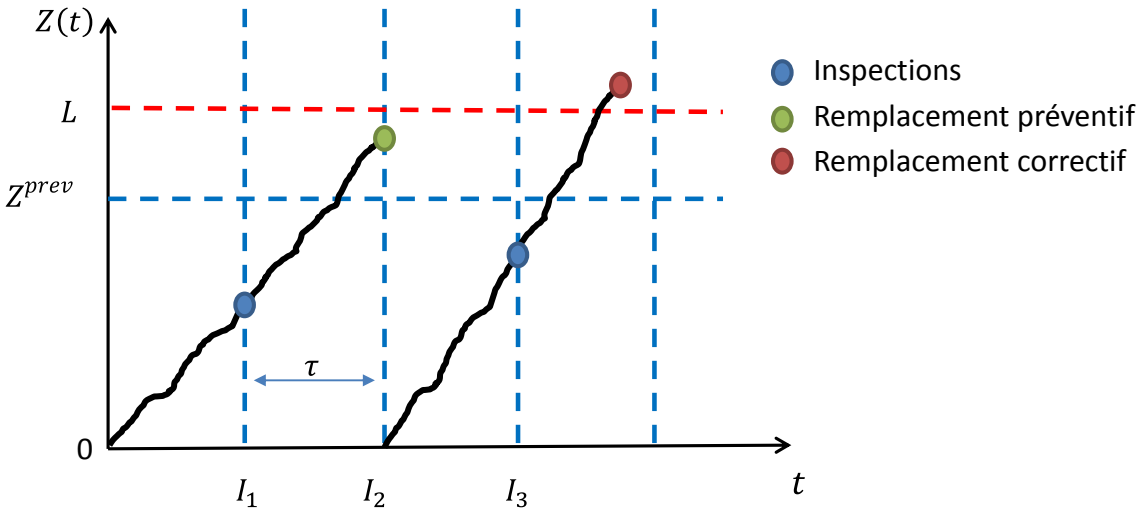

Figure 3.7: Schéma d'une politique de maintenance conditionnelle

Le schéma classique de cette politique est présenté dans la figure 3.7. Comme nous l'avons explicité précédemment, le maintenancier prend sa décision en fonction de la dégradation observée (Christer & Wang, 1992). Il est donc nécessaire de vérifier, à l'aide d'inspections régulières (ou plutôt bien choisies), l'état courant du composant, noté Z. Dans la figure 3.7, le parti pris est de considérer que les inspections (I_1, I_2, I_3, etc.) sont réalisées à des intervalles réguliers notés τ. Dans une politique de maintenance conditionnelle, une inspection est perçue comme une opportunité de maintenance. En effet, à chaque inspection, une action de maintenance est effectuée si le niveau de dégradation Z dépasse un seuil préventif fixé, noté Z^{prev}. Le coût lié à ce remplacement préventif vaut c auquel on ajoute le coût c_{insp} pour l'inspection. A l'inverse, si $Z < Z^{prev}$, le composant fonctionne normalement et nous ajoutons uniquement le coût c_{insp}. Enfin nous considérons que le composant est en panne dès lors que Z dépasse la limite L, déterminée initialement. Dans ce cas, un coût correctif $c + k$ est imputé.

En s'appuyant sur ces diverses informations, le coût de maintenance à un instant t, est donné par:

$$C(t) = N_{insp}(t).c_{insp} + N_{cor}(t).(c + k) + N_{prev}(t).c \tag{3.7}$$

avec $N_{insp}(t), N_{cor}(t), N_{prev}(t)$ respectivement le nombre d'inspections, de remplacement correctifs et de remplacement préventifs à l'instant t. De façon similaire aux politiques mentionnées précédemment, le coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon infini peut être calculé à l'aide de la théorie du renouvellement. L'utilisation d'un modèle de maintenance permettra dans ce cas d'optimiser le réglage des variables de décisions à savoir Z^{prev} et τ.

Politique de maintenance prévisionnelle basée sur la durée de vie résiduelle

Comme nous avons pu le voir précédemment, l'approche de la maintenance prévisionnelle permet de prendre en compte une prédiction sur les indicateurs de santé ou une caractéristique du système dans la prise de décision.

La durée de vie résiduelle peut intégrer différentes informations telles que le niveau de dégradation ou l'état futur de l'environnement s'il est connu. Dans ce qui suit, nous allons détailler une politique de maintenance prévisionnelle qui consiste à prendre en compte la durée de vie résiduelle du composant dans le processus de décision. Cette politique, basée sur le risque (Khoury, 2012), vise à utiliser le pronostic d'une manière directe pour la prise de décision de maintenance.

Le fonctionnement général de cette politique vise à assurer que le risque de défaillance du composant ne soit jamais supérieur à un seuil fixé (risque) r. Cela signifie que la fiabilité conditionnelle du composant doit, à chaque instant, dépasser la valeur $1 - r$. Cette valeur de risque doit être optimisée à l'aide du modèle de maintenance utilisé ou donnée par les contraintes de l'application.

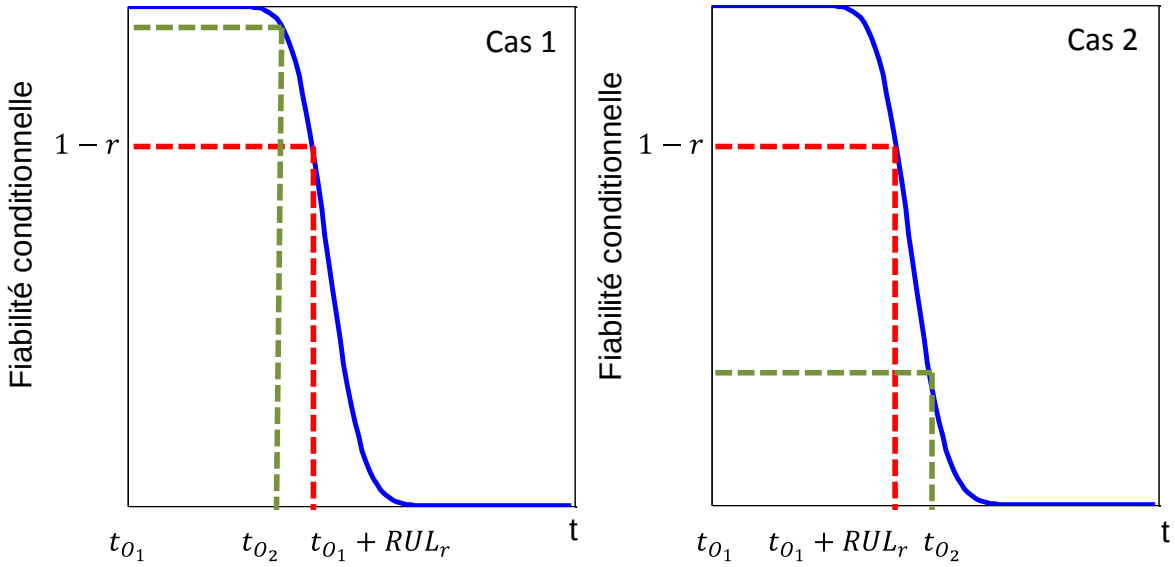

Figure 3.8: Schéma d'une politique de maintenance prévisionnelle basée sur le risque

Considérons maintenant que l'on connaisse pour un composant donné, ses deux prochaines opportunités de maintenance t_{O_1}et t_{O_2}. Si l'évaluation de la durée de vie résiduelle à t_{O_1} indique que la contrainte de risque n'est pas respectée pour la seconde opportunité, nous optons alors pour un remplacement préventif. Sinon, le remplacement préventif n'est pas planifié. En pratique, il s'agit d'ajouter la durée de vie résiduelle du composant pour un risque donné RUL_r avec t_{O_1} et de comparer la date obtenue avec t_{O_2} (cf. figure 3.8). Si $t_{O_1} + RUL_r < t_{O_2}$, la durée de vie résiduelle du composant est insuffisante pour

atteindre t_{O_2} (Cas 2). Un remplacement préventif est donc planifié en t_{O_1}. Dans le cas contraire, le risque de défaillance du composant est inférieur à r jusqu'à la prochaine opportunité (Cas 1). Notons qu'une politique de maintenance prédictive non plus basée sur le risque mais sur les coûts peut également être envisagée. Dans ce cas, le choix de l'opportunité de maintenance se porte sur celle qui engendre un coût moindre.

A priori, les politiques de maintenance dynamiques présentées dans cette sous-partie sont plus efficaces que la politique basée sur l'âge ou de remplacement par bloc car elles décident des actions de maintenance à mener en fonction de la dégradation réelle du composant. Cependant, la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle supposent un coût supplémentaire pour accéder à l'information de surveillance. La rentabilité de ces politiques doit donc être évaluée en utilisant un modèle de maintenance.

3.4 Maintenance des systèmes multi-composant

Rappelons que cette thèse a vocation à étudier des systèmes multi-composants constitués de composants élémentaires non réparables. Selon le niveau d'information disponible, la partie précédente évoque les politiques de maintenance applicables sur ces composants. En ce qui concerne le processus de décision de maintenance au niveau des systèmes multi-composant, la problématique est tout autre. Ce constat s'appuie sur la remarque suivante: les décisions de maintenance optimales pour les composants pris séparément ne le sont pas forcément quand on les assemble afin de remplir une fonction commune (Barros, 2006).

Cela implique que les décisions de maintenance « optimales » pour un système multi-composant ne peuvent se résumer à la simple juxtaposition des décisions prises pour chaque composant. Dans un système multi-composant, la décision de maintenance s'appuie sur le fonctionnement propre de chaque composant (modèle de durée de vie, de dégradation, etc.) mais également sur la structure du système (série, parallèle, etc.) et sur les dépendances qui peuvent exister entre ses composants. Ces dépendances peuvent être économiques, stochastiques ou structurelles (Thomas, 1986).

Les dépendances économiques apparaissent quand il devient plus avantageux en terme de coût d'intervenir de façon groupée sur plusieurs composants plutôt que de les remplacer individuellement (Dekker et al., 1997). Le regroupement d'opérations vise ainsi à économiser des coûts logistiques liés à l'entrée en maintenance du système. Lorsqu'il est impossible de maintenir un composant donné sans entrainer des conséquences sur d'autres composants du système, on parle de dépendances structurelles. Elles s'illustrent notamment quand l'intervention de maintenance sur un composant nécessite d'en démonter plusieurs autres. Il peut alors être intéressant de profiter de l'opération de maintenance en cours pour remplacer d'autres composants déjà démontés (Cho & Parlar, 1991). Enfin, pour des situations où la défaillance d'un composant influence la loi de durée de vie ou la détérioration des autres composants, on parle de dépendances stochastiques (Ross, 1984). Notons, toutefois, que dans la suite de ce manuscrit, les dépendances stochastiques ne sont

pas prises en compte. Nous considérons ainsi que les durées de vie ou les niveaux de dégradation des différents composants élémentaires ne sont pas corrélés.

Dans cette partie, l'objectif principal est de présenter les politiques de maintenance les plus utilisées dans la littérature pour des systèmes multi-composants (Andréasson, 2004) (Cho & Parlar, 1991) (Dekker & Scarf, 1998) (Wang, 2002) (Wildeman, 1996) (Nicolai & Dekker, 2008) (Bouvard, 2010). Ces politiques basées principalement sur le regroupement des interventions visent à réduire le coût de maintenance global du système. Elles se distinguent principalement, comme pour la partie précédente, par l'aspect statique ou dynamique de leur processus de décision.

3.4.1 Politiques de regroupement stationnaires

Les politiques de regroupement stationnaires planifient les opérations de maintenance sur un horizon long terme en minimisant un critère donné, généralement un critère de coût. Ces politiques, qualifiées de statiques ou stationnaires, n'utilisent pas d'informations sur l'état courant du système pour mettre à jour le planning défini initialement. En conséquence, les règles de maintenance restent stables pendant la durée de vie du système. Dans cette sous-partie, nous allons distinguer les politiques de regroupement stationnaires pour des maintenances correctives et pour des maintenances préventives systématiques.

Regroupement de maintenances correctives

Pour des systèmes multi-composant spécifiques, comprenant un grand nombre de redondances, certains travaux proposent de mettre en place une maintenance corrective groupée. Avec cette politique de maintenance, les composants défaillants attendent la date de maintenance planifiée initialement pour être remplacés. Le regroupement d'opérations de maintenance va permettre d'économiser des coûts logistiques liés à l'entrée du système en maintenance. Ce coût, indépendant du nombre de composants maintenus, est uniquement lié à l'intervention de maintenance. Réduire le nombre d'interventions en regroupant les opérations permet donc de réduire ces coûts. Cependant, même si cette politique entraine une réduction des coûts logistiques, les coûts liés à l'indisponibilité des composants défaillants doivent être contrebalancés. Ce type de maintenance est souvent proposé pour une usine de production avec machines en parallèle. L'objectif est alors de trouver un compromis entre le gain au niveau des coûts logistiques et la perte de production liée aux machines défaillantes (Assaf & Shanthikumar, 1987) (Okumoto & Elsayed, 1983).

Regroupement de maintenances préventives systématiques

Les politiques permettant de regrouper les maintenances préventives s'appuient généralement sur les schémas développés pour les composants élémentaires. On retrouve ainsi les politiques basées sur l'âge et les politiques de remplacement par bloc.

Pour un système multi-composant, le remplacement par bloc vise à remplacer non plus un composant mais un groupe de composants à intervalles de temps réguliers $T_0, 2T_0, 3T_0$, etc. De la même manière que pour un composant élémentaire, les remplacements sont indépendants de l'historique des pannes constatées. Le groupe de composants spécifié est donc remplacé périodiquement et lorsqu'un composant du groupe est défaillant. Pour optimiser cette politique, il va s'agir de déterminer les groupes de composants afin de minimiser le coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon infini. De la même manière que pour les composants élémentaires, des travaux proposent d'adapter cette politique. Les solutions visent notamment à introduire des réparations minimales mais aussi une contrainte d'âge pour gérer le remplacement des composants défaillants (Archibald & Dekker, 1996) (Ait Kadi & Cléroux, 1991) .

Enfin, la politique de regroupement basée sur l'âge a pour objectif de remplacer des groupes de composants à des intervalles définis. Contrairement à la politique de remplacements par bloc, on n'impose pas que les intervalles définis soient de la forme $T_0, 2T_0, 3T_0$. Chaque composant peut donc avoir une fréquence de remplacement quelconque déterminée en fonction de la politique de maintenance basée sur l'âge. Dans ce cas, la fréquence des remplacements calendaires est d'abord optimisée au niveau de chaque composant. Puis, l'objectif est de la modifier pour grouper plusieurs opérations de maintenance en même temps. Cette planification vise à optimiser le coût moyen par unité de temps sur un horizon infini en profitant des dépendances économiques pour économiser des coûts logistiques.

3.4.2 Politiques de regroupement dynamiques

Les politiques de regroupement dynamiques utilisent également des règles de maintenance stationnaires mais celles-ci sont complétées par des informations court terme obtenues en ligne. Dans ce contexte, l'objectif est d'être en mesure d'adapter le planning de maintenance en s'appuyant sur ces informations dynamiques, issues de la surveillance.

Pour répondre à ces problématiques, une politique de maintenance conditionnelle a été proposée pour un système composé de deux composants élémentaires (Castanier et al., 2005). A chaque inspection, supposée non périodique, la dégradation de chaque composant est comparée à un seuil préventif. Si un composant dépasse ce seuil, celui-ci est maintenu préventivement. Pour profiter de cette opportunité et ainsi réduire les coûts logistiques, cette politique propose d'effectuer un remplacement sur l'autre composant si sa dégradation dépasse la limite d'opportunité fixée. En intégrant les maintenances effectuées, la prochaine inspection est évaluée à partir du coût moyen par unité de temps sur un horizon infini.

Toujours dans le cadre de cette problématique, Wildeman et al. (1997) ont proposé un regroupement dynamique des opérations de maintenance sur un horizon roulant. Pour mettre en place la politique de regroupement, il s'agit dans un premier temps de définir la date de maintenance optimale de chaque composant pris individuellement. Une fonction de

pénalité devra ensuite être construite, par composant, afin d'évaluer les coûts additionnels liés au déplacement d'une opération de maintenance de sa date optimale. En s'appuyant sur ces informations initiales, un algorithme de planification dynamique est introduit afin de trouver le planning de maintenance optimal. A partir des opérations prévues sur l'horizon considéré, l'objectif est de créer des regroupements afin de minimiser le coût total de maintenance sur cet horizon. Ces différentes étapes sont ensuite répétées à chaque fois qu'une information court-terme est disponible. Les dates de maintenance sont donc adaptées aux contraintes structurelles et aux taux d'utilisation réels des composants.

Dans la littérature, de nombreux travaux ont cherché à développer cette politique de maintenance. En s'appuyant sur la programmation dynamique et sur l'horizon roulant définis précédemment, Bouvard et al. (2011) proposent d'utiliser cette méthodologie pour des systèmes multi-composants à dégradation graduelle. L'idée est d'utiliser les informations liées à l'état courant des composants pour mettre à jour la planification de la maintenance. Dans d'autres travaux, l'approche basée sur l'horizon roulant a été complétée afin de prendre en compte des contraintes temporelles sur les opportunités (Do Van et al., 2013) mais également des contraintes liées au nombre de réparateurs disponibles (Do Van et al., 2012). Cependant, ces contributions traitent uniquement de systèmes multi-composants à structure série. Très récemment, des travaux ont permis d'adapter cette politique de regroupement dynamique dans le but de prendre en compte des systèmes à structure plus élaborées pouvant mélanger des connections série/parallèle (Vu et al., 2014) (Vu et al., 2012). En conséquence, la programmation dynamique utilisée dans les travaux précédents a été abandonnée. En effet, la détermination du planning de maintenance optimal devient un problème NP-difficile si l'impact de la structure est pris en compte. Dans ce cadre, un algorithme génétique a été développé pour planifier les opérations de maintenance à réaliser sur l'horizon.

Les politiques de regroupement dynamiques présentées dans cette partie reposent sur le principe de la maintenance opportuniste (Cho & Parlar, 1991). Les politiques de maintenance opportunistes ont pour objectif de prendre en compte des interactions entre les composants d'un même système. Ainsi une intervention sur une partie du système crée une opportunité de maintenance sur les autres parties du système. Ces politiques visent ainsi à diminuer les interventions sur le système et à réduire les coûts fixes. Cependant, par définition, une opportunité est difficilement prévisible et elle ne permet pas de garantir à l'utilisateur l'autonomie de son système sur une période donnée.

3.5 Conclusion

Après avoir défini les concepts généraux liés aux activités de maintenance, ce chapitre a présenté un état des lieux des politiques existantes. Qu'elles soient appliquées à un composant élémentaire ou à un système multi-composant, l'objectif reste identique:

programmer les opérations de maintenance aux meilleurs moments pour minimiser un critère spécifié.

Le niveau d'information disponible sur le(s) composant(s) joue un rôle majeur dans la définition de la stratégie à adopter. Si aucune information de surveillance n'est disponible, les politiques de maintenance sont construites en fonction des propriétés a priori des composants. Ces politiques dites stationnaires ne permettent pas de s'adapter à l'état réel des composants. A l'inverse, une instrumentation spécifique peut être déployée pour avoir accès à différentes informations de surveillance. Celles-ci peuvent renseigner sur l'état du composant (marche/panne), sur son niveau de dégradation mais également sur l'environnement opérationnel dans lequel il évolue. Intégrer ces diverses informations dans le processus de décision de maintenance permet de développer des politiques basées sur l'état courant des composants. Ces politiques, qualifiées de dynamiques, permettent de développer une méthode de planification adaptée à l'utilisation réelle des composants.

Compte tenu de l'état de l'art et des objectifs de cette thèse, la planification dynamique des opérations de maintenance est à retenir. L'idée est ainsi de mettre au point une politique capable d'intégrer les informations de surveillance en ligne et la structure du système multi-composant pour adapter la décision de maintenance. Cette planification dynamique permet également de prendre en compte le niveau d'information propre à chaque composant contrairement aux politiques statiques.

Comme nous avons pu le voir dans ce chapitre, les politiques de regroupement dynamiques pour des systèmes multi-composants s'appuient principalement sur le concept d'opportunité. Il va s'agir de profiter des opportunités de maintenance offertes pour regrouper les opérations de maintenance et ainsi économiser des coûts logistiques. Ces opportunités peuvent être des remplacements, des inspections, des pannes, des périodes de disponibilité pour l'utilisateur, etc. Cependant, de par leur construction, ces politiques ne permettent pas d'assurer l'autonomie du système sur une période donnée comme nos objectifs le mentionnent.

Dans ce contexte, nous proposons de développer, dans le chapitre suivant, une forme originale de regroupement dirigé par le temps. La mise en place de cette politique basée sur la Maintenance Free Operating Period (MFOP) permet de définir des périodes à la fin de chaque mission ou le système peut être maintenu. Il s'agit alors, en utilisant toutes les informations de surveillance disponibles et la structure du système multi-composant, de quantifier le risque que le système fonctionne jusqu'à la fin de la prochaine mission. Suivant le risque calculé, le processus de décision de maintenance évalue la nécessité de remplacer ou non des composants dans le système. Contrairement à la plupart des politiques de regroupement dynamiques où le regroupement est effectué autour des dates de maintenance des composants, ici c'est « le système » qui fournit les opportunités de maintenance.

Chapitre 4

Politique de maintenance dynamique basée sur le concept de la MFOP

Le chapitre précédent propose une synthèse des politiques de maintenance dynamiques utilisées actuellement dans la littérature. Pour des systèmes multi-composants, l'état de l'art fait principalement référence à des politiques de regroupement dynamiques basées sur le concept d'opportunité.

Cependant, ces politiques de maintenance ne sont pas toujours adéquates pour des systèmes qui requièrent une disponibilité élevée en opération et dont la panne entraine de fortes conséquences économiques. Dans ce contexte, ce chapitre définit une forme originale de regroupement dynamique pour la maintenance de systèmes multi-composant. Les actions de maintenance sont supposées impossibles pendant les périodes d'opérations sous peine d'entrainer des coûts supplémentaires importants. En conséquence, elles doivent être fortement regroupées à la fin de ces périodes. Le regroupement n'est donc plus dirigé par des événements sur des composants mais doit être planifié avec attention en fonction des besoins et/ou des contraintes utilisateurs.

Premièrement, ce chapitre vise à introduire le concept de la MFOP en précisant les notions générales et les travaux existants. En s'appuyant sur ce concept, nous présentons la politique de maintenance élaborée dans cette thèse en détaillant le processus de décision et l'évaluation de cette politique. Nous nous concentrons ensuite sur la sélection des opérations de maintenance lors d'une intervention. Différents critères de décisions sont construits pour déterminer la sélection optimale des opérations. La résolution du problème d'optimisation est basée sur un algorithme génétique. Enfin, une illustration sur un système donné permet de comparer les différents critères de décision et d'évaluer l'impact de la méthode de résolution proposée.

4.1 Concept de la MFOP

Le concept de la MFOP a été initialement proposé en 1996, par la Royal Air Force (Royaume-Uni), afin d'aider les fabricants d'avions militaires à répondre à leurs besoins (Appleton, 1996) (Hockley & Appleton, 1997). Ces besoins incluent notamment une meilleure capacité de planification de la maintenance, l'amélioration de la disponibilité opérationnelle des avions et une baisse des coûts de fonctionnement.

Dans cette partie, nous commençons par donner quelques définitions générales associées à la MFOP. Nous illustrons ensuite la façon dont elle est aujourd'hui utilisée dans la littérature.

4.1.1 Définitions générales

Définition 14 *La Maintenance Free Operating Period (MFOP) représente une période de fonctionnement pendant laquelle l'équipement doit être en mesure de mener à bien les missions qui lui sont assignées sans action de maintenance et sans que l'opérateur soit restreint en aucune manière en raison de défaillances ou de limitations du système* (Hockley, 1998).

En d'autres termes, la MFOP définit une période d'opérations sans interruption due à des maintenances non planifiées. Pour Kumar et al. (1999), la MFOP est assimilable à une période de garantie. Cependant, la garantie commerciale couvre généralement les premières années du système. Or l'intérêt de la MFOP est de s'intéresser à la vie entière du système. De plus, elle ne s'applique pas uniquement sur des systèmes neufs mais aussi sur des systèmes dont les composants ont des âges plus ou moins avancés.

Notons que, cette définition n'interdit pas les pannes de manière globale. Celles-ci peuvent apparaître sur certains composants du système à condition que le déroulement de la mission ne soit pas affecté. Par exemple, pour des systèmes comprenant une structure parallèle, les composants redondants peuvent être défaillants sans impacter la réalisation de la mission. L'événement redouté n'est pas la panne d'un composant mais bien la défaillance du système. Manzini et al. (2010) affirment que dans une politique idéale basée sur la MFOP, la maintenance corrective doit être contournée. Pour ce faire, des périodes de maintenance planifiées doivent être définies entre les MFOP. C'est ce qu'on appelle la Maintenance Recovery Period (MRP).

Définition 15 *La Maintenance Recovery Period (MRP) est définie comme la période pendant laquelle la maintenance appropriée est effectuée sur le système afin de lui permettre d'accomplir avec succès la prochaine MFOP* (Kumar, 1999) (Cini & Griffith, 1999).

Cette période de maintenance qui suit une MFOP ou plusieurs cycles de MFOP est de longueur flexible. La durée de l'arrêt dépendra de l'étendue du travail de maintenance à effectuer (Al Shaalane & Vlok, 2013). En pratique, il est évidemment impossible de garantir à 100% qu'aucune panne n'interviendra sur la prochaine MFOP. Il est donc primordial d'évaluer ce risque avec la Maintenance Free Operating Period Survivability ($MFOPS$).

Définition 16 *La Maintenance Free Operating Period Survivability (MFOPS) est la probabilité que le système survive pendant la durée de la MFOP sachant qu'il était dans un état de fonctionnement au début de la période* (Kumar, 1999).

En supposant une MFOP de longueur t_{MFOP} unités de temps, la probabilité à l'instant t que le système survive t_{MFOP} sachant qu'il est dans un état de fonctionnement est donnée par:

$$MFOPS(t) = \frac{R_{syst}(t + t_{MFOP})}{R_{syst}(t)} \tag{4.1}$$

avec $R_{syst}(t)$, la fiabilité du système à l'instant t. Notons que t et t_{MFOP} peuvent également être définis en unité kilométrique dans le domaine du transport.

Après avoir défini précisément les trois principales grandeurs associées à la MFOP, nous nous intéressons maintenant aux motivations de ce concept (cf. figure 4.1). La MFOP spécifie les besoins des clients de façon claire, ne laissant pas la place à l'ambiguïté (Mitchell, 1999). Elle consiste à assurer aux utilisateurs l'autonomie de leurs systèmes sur des périodes d'opérations données. Pour ce faire, la MFOP diffère virtuellement toutes les maintenances correctives à venir vers des périodes planifiées de maintenances préventives. Cette caractéristique permet de maximiser la disponibilité opérationnelle des systèmes. En évitant au maximum les arrêts non planifiés, la MFOP réduit les coûts de réparation du système mais également le support logistique en diminuant le besoin de re-planifier les missions (Hockley, 1998). Précisons enfin, que ce concept facilite la gestion des pièces de rechange en réduisant l'incertitude sur la planification des opérations de maintenance.

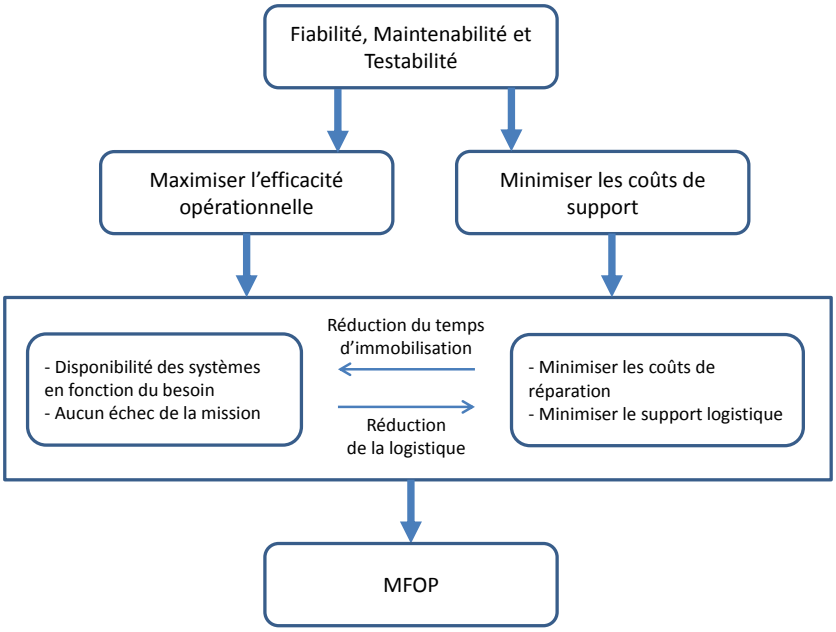

Figure 4.1 : Motivations pour la MFOP (Brown & Hockley, 2001)

4.1.2 La MFOP dans la littérature

Dans la littérature, de nombreux travaux font références à ce concept (Appleton, 1996) (Brown & Hockley, 2001) (Cini & Griffith, 1999) (Hockley, 1998) (Hockley & Appleton, 1997)

(Warrington et al., 2002). Ils visent la plupart du temps à décrire les avantages de la MFOP et à préciser les outils à notre disposition pour mettre en place cette notion. Néanmoins, très peu de travaux illustrent concrètement comment la MFOP peut être implémentée sur un système.

Kumar et al. (1999) sont à notre connaissance les premiers à mettre en place une politique de maintenance basée sur la probabilité de réalisation d'une MFOP. Cette probabilité, calculée par l'intermédiaire de la $MFOPS(t)$, est utilisée pour planifier les MRP. Dans cet article, cette politique est illustrée sur un système série composé de quatre composants. Un modèle de durée de vie est supposé connu pour chaque composant du système. La figure 4.2 illustre l'évolution de la $MFOPS(t)$ sur plusieurs cycles de MFOP de 50h en considérant que le système fonctionne à la fin de chaque période.

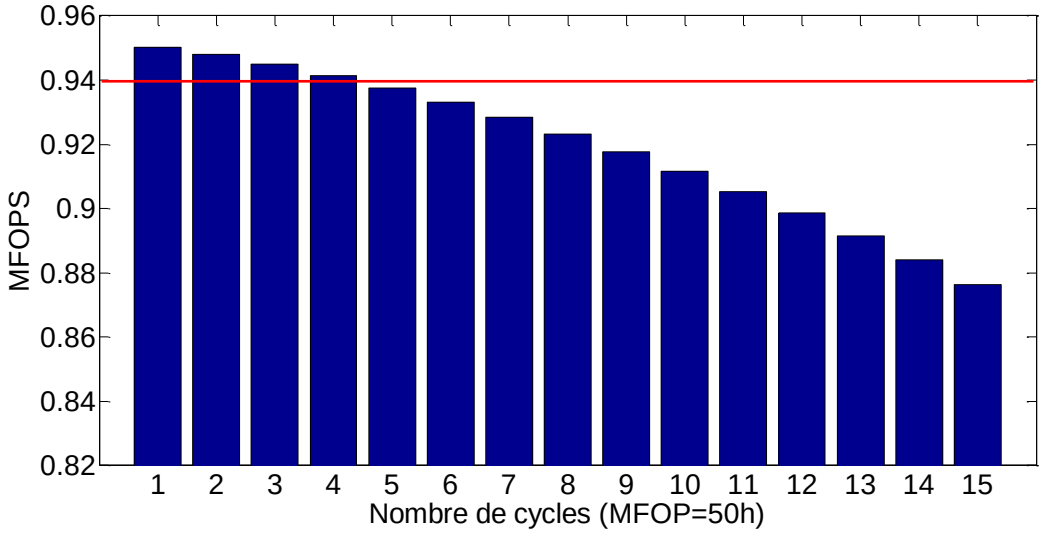

Figure 4.2: Evolution de la $MFOPS$ sur plusieurs cycles de MFOP (Kumar et al., 1999)

A partir de cette probabilité et du niveau de confiance spécifié, la politique de maintenance détermine le nombre de cycles de MFOP avant de planifier la MRP. Par exemple, si le niveau de confiance requis sur la $MFOPS(t)$ est supérieur à 94%, une MRP doit être planifiée après 4 cycles de MFOP. En lien avec ces premiers travaux, Kumar (1999) aborde brièvement la façon dont la maintenance va impacter cette $MFOPS(t)$. Son objectif est de définir une politique de maintenance statique permettant d'estimer le besoin en pièces de rechange pour les différents composants du système. Notons que cette politique est définie de manière assez sommaire et qu'elle ne permet pas de garantir l'optimalité de la solution proposée.

En s'appuyant sur ces premiers développements, Long et al. (2009) proposent une politique de maintenance basée sur la MFOP pour un système mono-composant (Line Replaceable Unit). Afin d'optimiser la politique, différentes valeurs de MFOP et de niveaux de confiance

sont testées. Le choix entre ces diverses alternatives est basé sur la minimisation du coût total d'exploitation.

Nous retrouvons également le concept de la MFOP dans les travaux de Chew et al. (2008) et de Fritzsche (2012). Chew et al. se focalisent sur des systèmes dont les missions sont constituées de phases distinctes. Suivant les phases considérées, la durée, les tâches et les composants utilisés au sein du système diffèrent. La réalisation d'une série de phases sans maintenance est considérée comme une MFOP. L'objectif est ainsi de modéliser les différentes phases appliquées au système, en utilisant un réseau de Petri, et de déterminer la fiabilité associée à la MFOP. Quant à Fritzsche, il utilise la MFOP pour optimiser la gestion des pièces de rechange. Notons, que ces travaux ne se concentrent pas sur l'élaboration de politiques de maintenance.

En conclusion, cette partie confirme l'intérêt d'utiliser la MFOP pour diriger le regroupement des maintenances et garantir à l'utilisateur l'autonomie de son système sur des périodes d'opérations données. Les politiques de maintenance basées sur ce concept semblent intéressantes mais elles doivent être améliorées pour répondre à nos objectifs initiaux. Parmi les limites observées, nous distinguons premièrement l'aspect statique de ces politiques qui ne permet pas de tenir compte de l'état courant du système. Nous observons également que ces politiques sont appliquées essentiellement sur des systèmes mono-composants simplifiant de fait les décisions de maintenance. Une évolution s'impose pour intégrer la structure du système dans la politique développée.

4.2 Description de la politique de maintenance

Cette partie a pour objectif de présenter la politique de maintenance développée dans ce manuscrit. Premièrement, précisons que la construction de cette politique s'appuie sur les contraintes de l'industrie du poids lourd. Pour un véhicule industriel, la maintenance préventive est réalisée uniquement quand celui-ci retourne à l'atelier. En dehors de ces arrêts, c'est-à-dire en mission, la maintenance est quasiment impossible ou génère des coûts importants d'immobilisation (Lesobre et al., 2014c). Ces contraintes se retrouvent également dans d'autres systèmes. Dans leur papier, Tinga et Janssen (2013) mentionnent que les opérations de maintenance sur une frégate ne peuvent pas être réalisées en mission. En conséquence, il est nécessaire que le navire rentre au port pour effectuer sa maintenance ce qui affecte fortement ses coûts de fonctionnement et sa disponibilité.

Pour ce type de système qui requiert une disponibilité élevée en opération, sous peine de fortes conséquences économiques, les politiques de regroupement basées sur l'opportunité ne sont pas recommandées. Le concept de la MFOP, détaillé dans la partie précédente, est alors porteur de sens (Tinga & Janssen, 2013). Il va permettre d'assurer l'autonomie du système sur des périodes d'opérations données et de diriger le regroupement des maintenances en fonction de ces périodes.

La politique développée dans cette thèse, vise à assurer le bon fonctionnement d'un système multi-composant sur une période donnée moyennant un niveau de confiance spécifié. Pour ce faire, elle évalue, à la fin de chaque période opérationnelle, la nécessité de maintenir le système. Si l'intervention de maintenance est jugée indispensable, la politique sélectionne les opérations à effectuer. Contrairement à la plupart des travaux développés sur le concept de la MFOP, cette politique est dynamique. Cela signifie que la décision de maintenance est adaptée en fonction des informations de surveillance disponibles en ligne.

Dans cette partie, nous commençons par présenter le processus de décision de maintenance mis en place. Nous détaillons ensuite le modèle de coût utilisé pour évaluer la politique de maintenance considérée.

4.2.1 Processus de décision de maintenance

Comme nous venons de le mentionner en introduction, la politique de maintenance proposée repose sur le concept de la MFOP. L'idée est ici d'éviter les immobilisations du système en opération. Pour atteindre cet objectif, ce concept vise à déplacer toutes les maintenances correctives à venir vers des périodes planifiées de maintenance préventive (MRP). Ces caractéristiques conviennent parfaitement aux contraintes des systèmes de transport où le nombre d'opportunités de maintenance est limité et où l'immobilisation entraine de fortes conséquences financières.

Dans la partie précédente, des politiques de maintenance basées sur la philosophie MFOP ont été présentées (Kumar, 1999) (Long et al., 2009). Celles-ci sont généralement appliquées dans un cadre statique. Cela signifie que les décisions de maintenance ne sont pas adaptées à l'état courant du système mais uniquement à son état a priori. Pour répondre à notre cahier des charges, l'objectif est ici d'étendre ses travaux en intégrant les possibilités offertes par les nouvelles technologies de l'information et de la communication. Grâce aux informations de surveillance, la décision de maintenance ne doit plus être statique mais basée sur l'état courant du système. Toujours dans l'objectif d'améliorer les travaux disponibles, nous proposons une politique capable de s'adapter à la structure du système multi-composant. Rappelons que notre étude se focalise sur des systèmes à structure élémentaire, constitués de composants non réparables. Pour ces systèmes, seuls les remplacements de composants sont autorisés. Nous supposons également que le remplacement permet au composant de retrouver son état initial (AGAN).

La figure 4.3 présente les différentes étapes de la politique de maintenance développée:

- La première étape du processus de décision consiste à définir à l'instant t la nécessité d'une intervention de maintenance sur le système. Précisons que l'instant t représente soit la fin d'une MFOP, soit une panne au niveau du système. Pour prendre cette décision, nous cherchons à évaluer la probabilité que le système fonctionne jusqu'à la fin de la prochaine MFOP, sachant l'information disponible à t.

Nous supposons, qu'au minimum, l'information relative au fonctionnement du système multi-composant est connue à l'instant t. Si celui-ci est en fonctionnement, cette probabilité correspond à la $MFOPS(t)$ définie précédemment. A l'inverse, si le système est en panne, la $MFOPS(t)$ est nulle.

- La seconde étape du processus de décision consiste à comparer la $MFOPS(t)$ du système avec un niveau de confiance NC spécifié:

  - Si la $MFOPS(t) > NC$, le processus de décision considère que l'intervention de maintenance n'est pas nécessaire. Le système multi-composant peut alors être déployé sur la prochaine MFOP sans passer par l'atelier.

  - Dans le cas contraire, si la $MFOPS(t) < NC$, l'intervention de maintenance est jugée indispensable.

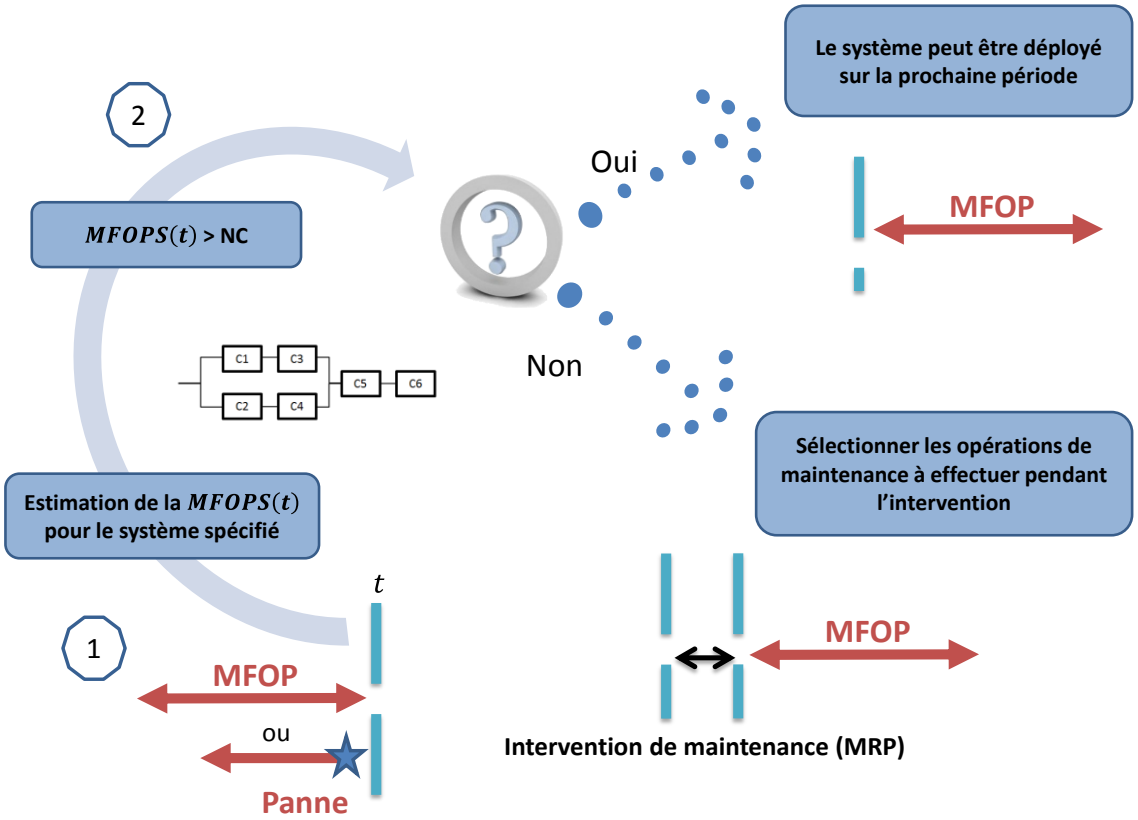

Figure 4.3: Synthèse de la politique de maintenance proposée

Lorsqu'une intervention de maintenance est requise, nous devons identifier les composants à remplacer pour que le système puisse assurer la prochaine MFOP avec le niveau de confiance demandé. Dans ce cadre, un problème d'optimisation sous contrainte est introduit

pour sélectionner les remplacements à réaliser. En effet, contrairement à un système mono-composant (Long et al., 2009), le choix des maintenances à effectuer sur un système multi-composant peut être réalisé de différentes manières. De façon générale, le problème peut être exprimé par:

$$\min_{\{X\}} J_w(X) \quad \text{avec } MFOPS(X,t) > NC \tag{4.2}$$

avec X un ensemble de composants à remplacer pour une solution donnée, J_w le critère de décision de maintenance avec w l'indice du critère de décision étudié, $MFOPS(X,t)$ la $MFOPS$ du système à t après remplacement de l'ensemble X et NC le niveau de confiance à atteindre sur la prochaine MFOP. Des critères de décision basés sur les coûts de remplacement mais également sur l'efficacité globale de l'opération de maintenance sont introduits et détaillés dans la partie suivante. Dans la politique de maintenance proposée, la durée des opérations de maintenance à effectuer pendant la MRP n'est pas considérée comme une contrainte. Il est néanmoins possible d'adapter le processus de décision pour imposer que la MRP ne dépasse pas une certaine durée. Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre 8.

Dans ce processus de décision, la $MFOPS(t)$ apparaît donc comme une variable de décision permettant de statuer sur la nécessité d'une intervention de maintenance. Celle-ci possède plusieurs caractéristiques intéressantes en lien avec nos objectifs. Premièrement, la $MFOPS(t)$ permet de prendre en compte la structure du système dans le processus de décision de maintenance. Cette structure est intégrée dans le calcul de la fiabilité du système $R_{syst}(t)$. Cette caractéristique permet de sortir de l'approche « composant » pour aller vers une approche « système ».

Un autre point intéressant de la $MFOPS(t)$ réside dans sa capacité à être mise à jour à l'instant t en s'appuyant sur la fiabilité des composants du système. Dans ce contexte, l'incertitude de la $MFOPS$ et par extension, la qualité de la décision de maintenance dépendent fortement de l'information de surveillance disponible. Celle-ci fait référence à l'information sur l'état des composants et à leurs conditions d'utilisation. Les principales contributions vont ainsi consister à intégrer ces informations et à évaluer leur impact sur l'optimisation de la politique proposée. Ces différents travaux sont précisés dans le chapitre suivant.

4.2.2 Evaluation de la politique de maintenance

La politique de maintenance détaillée dans la partie précédente fixe le processus de décision qui régit les activités de maintenance sur un système. Il va s'agir ensuite de spécifier les différents paramètres impliqués dans ce processus. Dans notre cas, ces paramètres correspondent à la longueur de la MFOP, au niveau de confiance NC ou encore au niveau d'information de surveillance disponible par composant. L'objectif final étant de déterminer

les valeurs de ces paramètres qui optimisent, selon un critère donné, la politique de maintenance spécifiée.

Pour déterminer ces paramètres, un critère d'évaluation doit être défini. Nous proposons d'utiliser le coût de maintenance total du système $C_{TM}(t)$ calculé sur un horizon de temps fini. Cet horizon est fixé à 5 ans, ce qui correspond à la durée nominale d'un contrat de maintenance d'un véhicule industriel. Ce coût $C_{TM}(t)$ se décompose de la façon suivante:

$$C_{TM}(t) = C_R(t) + C_{SC}(t) + C_{SD}(t) \tag{4.3}$$

avec $C_R(t)$ le coût de remplacement des composants du système sur [0, t], $C_{SC}(t)$ le surcoût lié à la maintenance corrective lorsque le système est en panne sur [0, t] et enfin $C_{SD}(t)$ le surcoût lié au diagnostic lorsque le système est en panne sur [0, t]. Détaillons maintenant l'expression de chacun de ces coûts.

Le coût de remplacement $C_R(t)$ correspond à:

$$C_R(t) = \sum_{k=1}^{N_{AM}(t)} \left[\left(\sum_{i=1}^{n} \delta_{i,k} \times (C_i + D_i \times \tau_{MO}) \right) + C_{Log} \right] \tag{4.4}$$

avec $N_{AM}(t)$ le nombre d'arrêts de maintenance sur l'intervalle de temps [0, t], n le nombre de composants dans le système, $\delta_{i,k}$ une variable binaire qui indique le remplacement du composant i pendant l'arrêt de maintenance k, C_i le coût du composant i, D_i la durée de remplacement du composant i, τ_{MO} le taux horaire de la main d'œuvre et C_{Log} le coût logistique lié à l'entrée du système en atelier de maintenance. Le coût $C_R(t)$ intègre ainsi tous les remplacements effectués de manière préventifs ou correctifs.

Quand une panne intervient sur le système en opération, des coûts supplémentaires liés à l'immobilisation du système vont venir s'ajouter au coût de remplacement. Ceux-ci sont pris en compte par l'intermédiaire des coûts $C_{SC}(t)$ et $C_{SD}(t)$. Le coût $C_{SC}(t)$ est donné par:

$$C_{SC}(t) = \sum_{l=1}^{N_P(t)} \left[\left(\sum_{i=1}^{n} \delta_{i,l} \times (D_i \times \tau_I) \right) + C_{Remor} + \left(\left(D_{Remor} + D_{Log} \right) \times \tau_I \right) \right] \tag{4.5}$$

avec $N_P(t)$ le nombre de pannes du système sur l'intervalle de temps [0, t], $\delta_{i,l}$ une variable binaire qui indique le remplacement du composant i pendant l'arrêt de maintenance correctif l, τ_I le coût de la perte d'exploitation par heure d'immobilisation, C_{Remor} le coût de remorquage du système, D_{Remor} la durée de remorquage du système et enfin D_{Log} la durée logistique de prise en charge du système à son entrée en atelier. Ce coût $C_{SC}(t)$ permet de prendre en compte les coûts supplémentaires liés au remorquage du système ainsi que la perte de production engendrée par la durée des arrêts non planifiés. Cette perte de

production n'est pas comptabilisée lors d'un arrêt préventif du système. Nous distinguons ici le coût logistique C_{Log} comptabilisé à chaque arrêt atelier et la durée logistique D_{Log} qui intervient uniquement à la panne du système dans l'estimation de la perte d'exploitation. Dans les deux cas, le terme « logistique » fait référence aux activités administratives et de préparation liées à l'entrée du système en atelier de maintenance.

Lors d'un arrêt correctif, le diagnostic du système est fondamental pour identifier le/les composants responsables de la panne et ainsi diriger les actions de maintenance à exécuter. Pour certains composants, l'information de surveillance disponible renseigne sur leur fonctionnement. Dans ce cas, aucun coût supplémentaire de diagnostic ne sera comptabilisé. A l'inverse, pour les composants dont on ignore l'état de fonctionnement, un test devra être réalisé engendrant des coûts additionnels. Ces coûts seront pris en compte dans l'expression $C_{SD}(t)$ donnée par:

$$C_{SD}(t) = \sum_{l=1}^{N_P(t)} [(C_{UD} + D_{UD} \times \tau_I) \times N_{SIF}] \tag{4.6}$$

avec C_{UD} le coût unitaire de diagnostic pour un composant (coût supposé fixe), D_{UD} la durée unitaire de diagnostic pour un composant (durée supposé fixe) et enfin N_{SIF} le nombre de composants dans le système dont l'information de surveillance n'est pas disponible. Nous choisissons donc de comptabiliser le diagnostic uniquement lors de la panne du système sur les composants non-surveillés. Dans les autres situations, nous supposons que les coûts liés au diagnostic sont pris en compte dans le coût de l'architecture de surveillance, non comptabilisé dans le $C_{TM}(t)$.

Afin d'évaluer le coût total de maintenance $C_{TM}(t)$ pour les stratégies prédéterminées, un modèle de maintenance basé sur une simulation de type Monte-Carlo a été développé. Celui-ci s'appuie sur la politique de maintenance proposée, sur la structure du système ainsi que sur la modélisation de la fiabilité de ses composants. Lorsque le nombre d'histoires est suffisamment important pour garantir la convergence, cette simulation permet d'évaluer le coût total moyen de maintenance pour la politique considérée et les paramètres associés. Ce coût moyen peut être utilisé pour comparer et optimiser les paramètres de la politique. Au-delà de ce coût moyen, une analyse de la dispersion des coûts totaux de maintenance pour les diverses histoires considérées est également envisagée.

4.3 Sélection des opérations de maintenance

La partie précédente a permis de présenter de façon globale la politique de maintenance proposée dans ce manuscrit. Notre objectif est ici de revenir sur un point fondamental de cette politique: la sélection des remplacements à effectuer pendant une intervention de maintenance. En fonction des priorités de l'utilisateur, cette sélection peut être envisagée de

différentes manières. Premièrement, nous nous concentrons sur l'élaboration des critères de décision de maintenance qui vont permettre de réaliser cette sélection. Nous abordons ensuite la question de la dépendance des opérations de maintenance et comment celle-ci peut être intégrée au processus de décision. Enfin, nous évoquons la résolution du problème d'optimisation sous contrainte décrit par l'équation 4.2. Dans ce cadre, un algorithme génétique est proposé.

4.3.1 Définition des critères de décision

Au sein de la politique implémentée, la sélection des opérations de maintenance est régie par le problème d'optimisation sous contrainte défini par l'équation 4.2. Pour un système multi-composant, le critère de décision de maintenance J va permettre de diriger le choix des remplacements à exécuter. Dans cette sous-partie, trois critères de décision sont proposés (Lesobre et al., 2014b). Une attention particulière est portée aux motivations qui ont guidées l'élaboration de ces critères.

- Le premier critère proposé, appelé J_1, a pour objectif d'atteindre le niveau de confiance spécifié sur la prochaine MFOP en minimisant les coûts de remplacement. Pour un ensemble X de composants à remplacer, ce critère s'exprime de la façon suivante:

$$J_1(X) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \in X}}^{n} C_i + D_i \times \tau_{MO} \tag{4.7}$$

  Cela signifie que l'ensemble de composants qui aura été identifié permettra de respecter la contrainte fixée sur la prochaine période à coût minimal.

- Le second critère de décision de maintenance, appelé J_2, n'est pas uniquement focalisé sur le coût de remplacement mais intègre une notion d'efficacité de la maintenance. Ce critère est basé sur la minimisation du ratio entre les coûts de remplacement et l'évolution de la $MFOPS$ avant et après réalisation de l'ensemble de remplacement X. Notons que, cette évolution de la $MFOPS$ traduit l'impact des remplacements effectués sur la fiabilité du système pendant la prochaine période. Ce critère est exprimé par:

$$J_2(X) = \frac{\sum_{\substack{i=1 \\ i \in X}}^{n} C_i + D_i \times \tau_{MO}}{MFOPS(X,t) - MFOPS(t)} \tag{4.8}$$

  Ce critère vise à promouvoir le meilleur compromis entre coûts de remplacement et gain de fiabilité sur la prochaine MFOP. Contrairement au critère J_1, celui-ci est

capable de sélectionner une solution plus coûteuse à condition d'entrainer un gain plus important de fiabilité sur la prochaine période.

- Le troisième et dernier critère, nommé J_3, est basé sur la minimisation du ratio entre les coûts de remplacement et une quantité $DR(X)$. Celle-ci définit, pour un ensemble de remplacement X, la distance restante en kilomètres avant que la fiabilité conditionnelle du système n'atteigne le niveau de confiance spécifié NC. La figure 4.4 permet d'illustrer le calcul de cette quantité à $t = 200000$ km pour un système donné en supposant une MFOP = 50 000 km et un $NC = 90\%$.

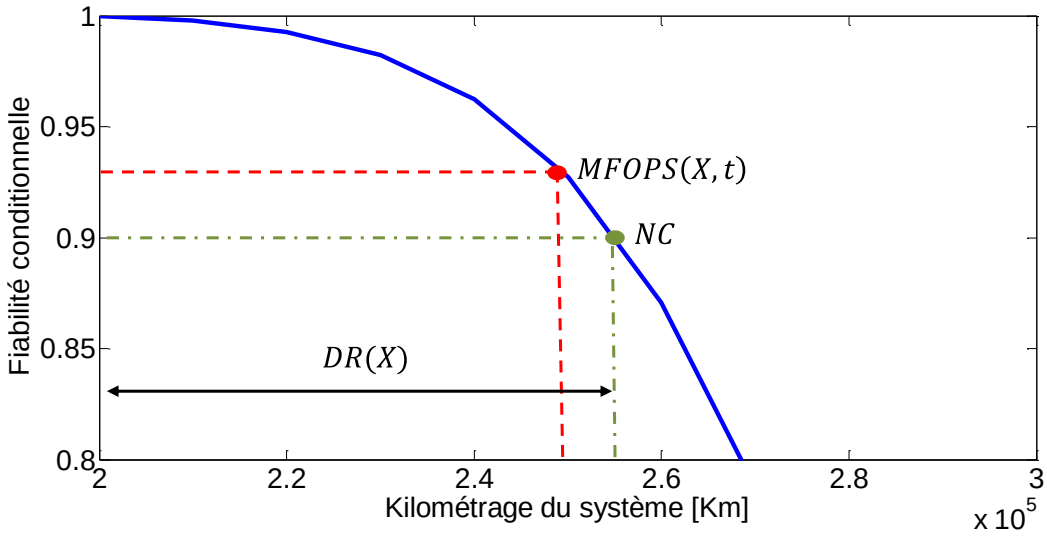

Figure 4.4: Détermination de $DR(X)$

Le principal objectif de ce critère est de retenir une solution qui propose le meilleur ratio coût / gain de fiabilité sur un horizon qui ne dépend plus de la MFOP. Ce critère est défini par:

$$J_3(X) = \frac{\sum_{\substack{i=1 \\ i \in X}}^{n} C_i + D_i \times \tau_{MO}}{DR(X)} \tag{4.9}$$

Par souci de cohérence avec l'horizon de simulation spécifié, la quantité $DR(X)$ est bornée. En effet, la politique de maintenance est évaluée sur un horizon fini de 5 ans. Par convenance, cet horizon est traduit en unité kilométrique dans la simulation. Nous veillons ainsi lors des évaluations successives de ce critère, que le kilométrage du système multi-composant à l'instant t ajouté à la quantité $DR(X)$ ne dépasse pas l'horizon kilométrique. Si cette condition n'est pas respectée, une borne sera appliquée telle que:

$$DR(X) = Horizon[km] - t[km] \tag{4.10}$$

4.3.2 Dépendances des opérations de maintenance

Dans la partie précédente, les opérations de maintenance effectuées sur le système sont supposées indépendantes. Néanmoins, dans de nombreux cas, des dépendances liées à la structure du système ou à l'organisation des opérations de maintenance apparaissent. Par exemple, selon la structure du système, il peut être nécessaire de démonter plusieurs composants avant d'accéder à celui que l'on souhaite remplacer. Dans ce contexte, réaliser des opérations de maintenance simultanément sur ces composants conduit à réduire la durée globale de la maintenance. Cette réduction, qui provient du temps économisé lors du démontage du système, impacte directement les coûts de remplacement. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces dépendances au sein de la politique de maintenance.

Nous proposons d'intégrer ces dépendances dans le critère de décision considéré. Soit un ensemble U_v incluant le $v$ième ensemble d'opérations de maintenance dépendantes et DS_v la durée économisée si la maintenance est effectuée simultanément sur les composants de cet ensemble. Supposons également, que tous les ensembles sont disjoints. Ainsi, en intégrant les dépendances, le critère J_1 peut être exprimé par:

$$J_1(X) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \in X}}^{n} C_i + D_i \times \tau_{MO} - \sum_{v=1}^{m} \delta_{\{U_v \subset X\}} \times DS_v \times \tau_{MO} \tag{4.11}$$

avec m le nombre d'ensembles d'opérations de maintenance dépendantes, $\delta_{\{U_v \subset X\}}$ une variable binaire qui vaut 1 quand le $v$ième ensemble d'opérations de maintenance dépendantes est inclus dans l'ensemble X (0 sinon). Toujours dans la même logique, les critères J_2 et J_3 deviennent:

$$J_2(X) = \frac{\sum_{\substack{i=1 \\ i \in X}}^{n} C_i + D_i \times \tau_{MO} - \sum_{v=1}^{m} \delta_{\{U_v \subset X\}} \times DS_v \times \tau_{MO}}{MFOPS(X,t) - MFOPS(t)} \tag{4.12}$$

$$J_3(X) = \frac{\sum_{\substack{i=1 \\ i \in X}}^{n} C_i + D_i \times \tau_{MO} - \sum_{v=1}^{m} \delta_{\{U_v \subset X\}} \times DS_v \times \tau_{MO}}{DR(X)} \tag{4.13}$$

Au-delà des critères de décisions, les dépendances impactent également le modèle de coût détaillé dans la partie 4.2. En effet, les temps de maintenance économisés en profitant des dépendances doivent être retranchés au niveau du coût de remplacement $C_R(t)$ et du surcoût correctif $C_{SC}(t)$. Ces changements sont illustrés dans les deux expressions suivantes:

$$C_R(t) = \sum_{k=1}^{N_{AM}(t)} \left[\left(\sum_{i=1}^{n} \delta_{i,k} \times (C_i + D_i \times \tau_{MO}) - \sum_{v=1}^{m} \delta_{\{U_v \subset M_k\}} \times DS_v \times \tau_{MO} \right) + C_{Log} \right] \quad (4.14)$$

avec M_k un ensemble comprenant les remplacements effectués pendant l'arrêt de maintenance k.

$$C_{SC}(t) = \sum_{l=1}^{N_P(t)} \left[\left(\sum_{i=1}^{n} \delta_{i,l} \times (D_i \times \tau_I) - \sum_{v=1}^{m} \delta_{\{U_v \subset M_l\}} \times DS_v \times \tau_I \right) + C_{Remor} + \left(\left(D_{Remor} + D_{Log} \right) \times \tau_I \right) \right] \quad (4.15)$$

4.3.3 Méthodes de résolution

Cette partie se focalise sur la sélection des opérations à effectuer pendant une intervention de maintenance. Après avoir évoqué les critères utilisés pour réaliser cette sélection et les questions autour de la dépendance des opérations de maintenance, intéressons-nous maintenant à la résolution du problème décrit par l'expression 4.2. Pour résoudre ce problème d'optimisation sous contrainte, les principales difficultés apparaissent lorsque le nombre de composants augmente. Quand une intervention de maintenance est jugée indispensable, la sélection des opérations doit être réalisée entre 2^n candidats, avec n le nombre de composants dans le système. Dans le but d'éviter l'explosion combinatoire et de réduire le temps de calcul, des méthodes de résolutions exactes ou approchées peuvent être considérées. Elles visent à réduire de manière drastique le nombre de candidats à considérer.

Dans cette thèse, nous avons premièrement utilisé une méthode exacte basée sur une procédure de séparation et évaluation, plus connue sous le terme anglophone de Branch and Bound (Galante & Passannanti, 2009). Dans un algorithme Branch and Bound, l'objectif est d'éviter de passer en revue tous les candidats en s'appuyant sur une analyse des propriétés du problème. Pour cela, cet algorithme va construire les différents candidats composant par composant. Cette construction est souvent représentée sous forme d'arbre où les branches correspondent aux différentes étapes de l'algorithme. A la fin de chaque étape, l'objectif est de comparer les développements possibles des candidats, partiellement définis, par rapport aux critères à optimiser. Selon des règles basées sur l'analyse du problème, certaines branches peuvent être éliminées.

Cette méthode a été utilisée dans (Lesobre et al., 2013) pour résoudre le problème d'optimisation avec le critère de décision de maintenance J_1. Aucune dépendance entre les opérations de maintenance n'a été considérée dans cet article. Les premiers résultats sur un

exemple illustratif montrent une réduction significative du temps de calcul. Notons que, les règles utilisées pour l'élimination des branches ont été déterminées assez simplement au vue du problème posé. Typiquement, si un candidat partiellement défini respecte la contrainte au niveau de la $MFOPS(t)$, les autres candidats avec une évaluation du critère J_1 supérieure peuvent être supprimés. L'utilisation de cette règle simple est possible car le critère J_1 a une évolution croissante. Néanmoins, si l'on souhaite étendre cette méthode de résolution à d'autres critères de décision, la définition de ces règles devient plus complexe. C'est le cas, par exemple, lorsque l'on souhaite définir des règles pour les critères J_2 et J_3. En effet, ces critères ne sont plus des sommes mais des ratios dont l'évolution n'est pas toujours croissante. Ce constat nous amène donc à étudier une autre méthode de résolution: les algorithmes génétiques.

Les algorithmes génétiques (AGs) représentent des méthodes d'optimisation stochastique basées sur les concepts de la sélection naturelle et de la génétique (Holland J. H., 1975). Contrairement au Branch and Bound évoqué précédemment, les AGs sont des méthodes de résolution approchées. La flexibilité de ces méthodes permet de s'adapter beaucoup plus facilement aux différents critères de décision de maintenance considérés. Plusieurs approches d'AGs sont proposées pour traiter les problèmes d'optimisation sous contrainte (Michalewicz & Schouenauer, 1996). Dans ce manuscrit, des méthodes basées sur la recherche de solutions faisables sont investiguées (Deb et al., 2002). Généralement, la première étape d'un AG vise à construire une population initiale de candidats. L'étape suivante consiste à évaluer et à classer ces divers candidats à l'aide d'une fonction objectif. Ensuite, tant que le critère d'arrêt n'est pas satisfait, des opérations génétiques telles que le croisement et la mutation sont appliquées sur la population pour obtenir de meilleurs candidats. Dans notre cas, un seuil sur le nombre d'itérations est utilisé comme critère d'arrêt.

Codage d'un candidat

Dans l'algorithme développé (cf. figure 4.5), les candidats sont représentés par un vecteur de taille n, avec n le nombre de composants dans le système. Chaque composant à l'intérieur de ce vecteur peut prendre la valeur 1 ou 0 suivant que le remplacement est réalisé ou non.

Population initiale

La première étape de l'algorithme consiste à générer la population initiale P_0 composée de N candidats. Pour construire P_0, un générateur aléatoire peut être utilisé. Même si cette méthode a l'avantage d'être très simple à mettre en place, elle conduit souvent à réduire l'efficacité de l'AG. En analysant les différents critères considérés, il ressort que la sélection des opérations de maintenance s'appuie principalement sur deux caractéristiques. La première est liée au coût de remplacement et la seconde est liée à l'importance du composant vis-à-vis de la fiabilité du système à l'instant t. En s'appuyant sur ces

caractéristiques, nous proposons de scinder en deux la génération des candidats de la population initiale.

En pratique, pour les $N/2$ premiers candidats de la population initiale, une probabilité plus importante de remplacement est considérée pour les composants dont le coût est le plus bas. Pour les $N/2$ candidats suivants, une probabilité plus importante est considérée pour les composants dont le niveau de fiabilité est le plus critique pour le système à l'instant t. Notons que, pour évaluer cette criticité, un facteur d'importance appelé Risk Reduction Worth (RRW) est introduit (Rausand & Høyland, 2004). Pour un composant i donné, le RRW correspond au ratio de l'actuelle défiabilité du système sur la défiabilité du système en supposant que le composant i est remplacé. Ce facteur d'importance est pertinent pour prioriser les remplacements qui réduisent le plus le risque de dysfonctionnement. Ainsi, pour la seconde moitié de la population initiale, la probabilité de remplacement plus importante est considérée sur les composants avec un RRW élevé.

Précisons que, dans cette détermination de la population initiale, nous introduisons des éléments, notamment du point de vue de la fiabilité, qui sont spécifiques au problème traité.

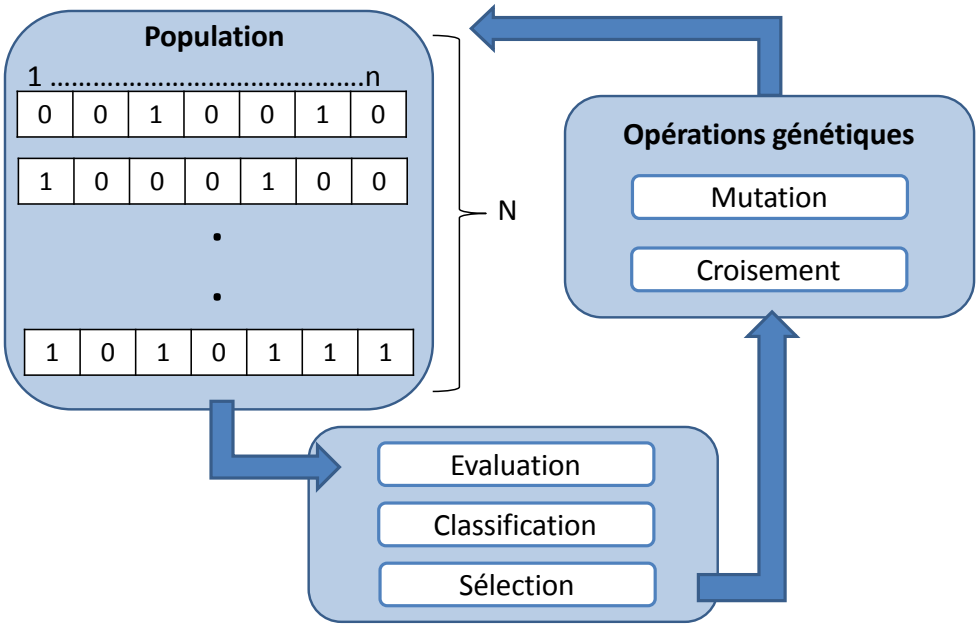

Figure 4.5: Description de l'algorithme génétique

Evaluation et classement

La seconde étape de cet algorithme vise à évaluer le critère de décision de maintenance utilisé et la $MFOPS(t)$ pour chaque candidat. Une fois cette évaluation réalisée, les candidats doivent être classés. Comme nous sommes face à un problème d'optimisation sous contrainte, chaque candidat représente une solution faisable ou non suivant la valeur

de la $MFOPS(t)$. Pour ordonner les candidats deux à deux, trois possibilités sont considérées:

- Si les deux candidats sont des solutions faisables, le candidat avec le meilleur critère de décision est dominant,
- Si un candidat est une solution faisable et l'autre non, la solution faisable est dominante,
- Enfin, si les deux candidats sont des solutions infaisables, le candidat avec la meilleure $MFOPS(t)$ est dominant. Dans ce cas, il s'agit du candidat qui viole le moins la contrainte définie.

Sélection des parents

Les candidats parents doivent ensuite être sélectionnés dans la population initiale pour les étapes de croisement et de mutation. Une méthode basée sur la réalisation de tournois entre deux candidats est implémentée pour sélectionner les $N/2$ candidats parents. Pour mettre en place cette méthode, $N/2$ tournois sont réalisés entre deux candidats choisis aléatoirement dans la population initiale. Le vainqueur de chaque tournoi, c'est-à-dire le candidat le mieux classé, est sélectionné comme candidat parent.

Croisement et mutation

Une fois que la population de candidats parents est définie, l'objectif est de sélectionner aléatoirement $N/2$ paires de parents pour réaliser des opérations génétiques. La probabilité de croisement de chaque paire de parents est fixée à 90%. Le croisement a vocation à combiner les parents sélectionnés pour générer un meilleur candidat enfant. Un point unique de croisement, déterminé aléatoirement, est utilisé pour la combinaison. Les séquences des vecteurs placés avant et après ce point sont alors échangées entre les deux candidats parents pour créer deux candidats enfants. A la fin de cette étape de croisement, chaque candidat enfant nouvellement créé et les paires de parents non sélectionnées sont envoyés à l'étape de mutation.

La probabilité de mutation est fixée à 30%. Cette étape de mutation est faite pour éviter que l'AG tombe dans un minimum local. Ainsi, pour les candidats sélectionnés, les variables binaires représentant les remplacements de chaque composant sont modifiées avec une probabilité de 50%. A la fin de cette étape, la population Q_0 constituée des candidats enfants est de taille N. La dernière étape consiste à fusionner P_0 et Q_0, à évaluer et à classer les $2N$ candidats et à supprimer les N candidats les moins bien classés. Les N candidats restants sont ensuite utilisés pour créer la population P_1.

Critère d'arrêt

Ces différentes étapes sont ensuite appliquées de manière itérative jusqu'à satisfaire le critère d'arrêt retenu. Les différentes itérations de l'AG sont appelées des générations.

4.4 Illustration

Dans la dernière partie de ce chapitre, une illustration sur un système multi-composant est proposée afin de comparer les différents critères de décision définis et d'évaluer l'impact de la méthode de résolution proposée.

4.4.1 Définition du système et convergence

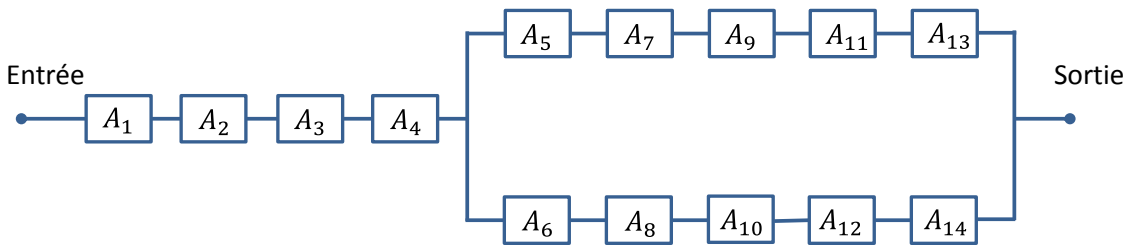

Figure 4.6: Structure du système multi-composant

La structure du système multi-composant utilisée pour cette illustration est décrite dans la figure 4.6. Pour ce système, on considère que le coût et la durée unitaire de diagnostic sont respectivement de $C_{UD} = 20€$ et $D_{UD} = 5$ min. Le taux horaire de la main d'œuvre est fixé à $\tau_{MO} = 90€$ et le coût de la perte d'exploitation par heure d'immobilisation équivaut à $\tau_I = 100€$. Ensuite pour le remorquage, le coût et la durée considérés sont respectivement de $C_{Remor} = 1500€$ et $D_{Remor} = 5\text{h}$. Enfin, le coût logistique lié à l'entrée du système en atelier de maintenance est de $C_{Log} = 100€$ pour une durée fixée à $D_{Log} = 30$ min. Pour ce système, on suppose que les ensembles de composants dépendants sont $U_1 = \{\text{A}_{11}, \text{A}_{13}\}$ et $U_2 = \{A_{12}, \text{A}_{14}\}$. Pour les différents composants du système, le tableau 4.1 synthétise les propriétés de fiabilité, les coûts et les durées de remplacement.

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
Modèle de Fiabilité	W(6e5,10)	W(5.5e5,12)	W(5e5,11)	W(4.5e5,9)	W(3e5,8)	W(3e5,8)	W(2.8,10)
C_i (en €)	842	1268	458	407	311	311	305
D_i (en h)	3.7	1.8	1	1.5	1.4	1.4	1.2
	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}
Modèle de Fiabilité	W(2.8,10)	W(2.5e5,10)	W(2.5e5,10)	G(1.1e-4,1.5) L = 20	G(1.1e-4,1.5) L = 20	G(8e-5,1.5) L = 20	G(8e-5,1.5) L = 20
C_i (en €)	305	276	276	108	108	302	302
D_i (en h)	1.2	1	1	1.3	1.3	1.7	1.7

Tableau 4.1: Propriétés des composants du système (W=Loi de Weibull, G=Processus Gamma, L=Limite de dégradation)

Comme nous l'avons vu précédemment, un modèle de maintenance évalue le coût total de maintenance $C_{TM}(t)$ pour la politique considérée et ses paramètres associés. Pour ce faire, ce modèle est basé sur une simulation de type Monte-Carlo. Pour garantir la pertinence des résultats obtenus, il est nécessaire de vérifier la convergence du $C_{TM}(t)$ pour un nombre d'histoires donné. Ici, 1000 histoires de simulations sur un horizon fini de 5 ans sont considérées. Les figures 4.7 et 4.8 permettent de justifier la convergence des résultats pour le système donné en utilisant ce cadre de simulation et le critère de décision J_1. Les deux lignes verticales rouges symbolisent le C_{TM} moyen à 1000 histoires +/- 1%.

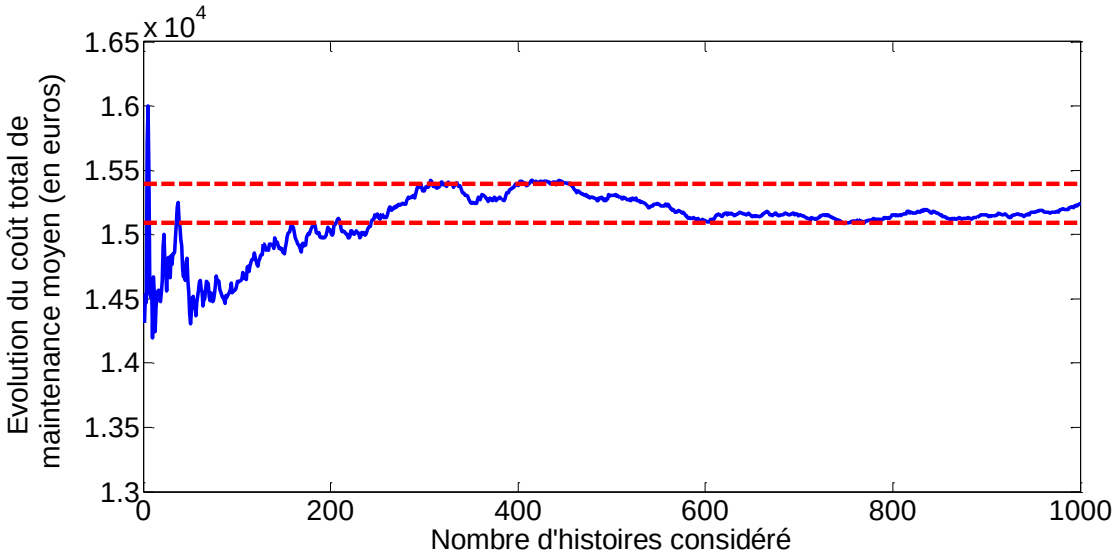

Figure 4.7: Illustration de la convergence de l'estimation du C_{TM} en fonction du nombre d'histoires (MFOP=10000 km et un NC=80%)

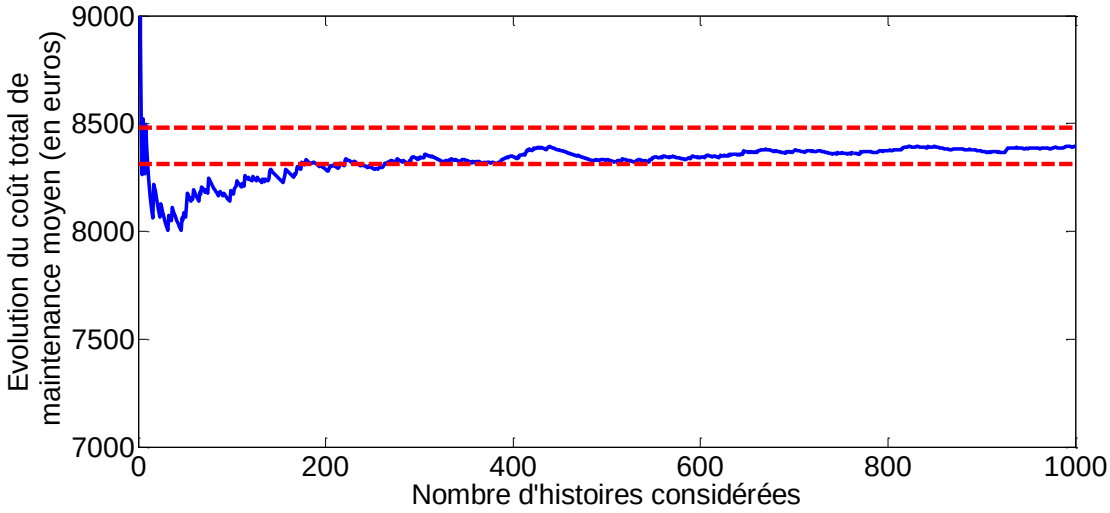

Figure 4.8: Illustration de la convergence de l'estimation du C_{TM} en fonction du nombre d'histoires (MFOP=50000 km et un NC=90%)

Suivant les paramètres considérés pour la politique de maintenance, la convergence se fait plus ou moins rapidement. Elle est observable à partir de 750 histoires pour la figure 4.7 et à

partir de 400 histoires pour la figure 4.8. Cette différence s'explique par le nombre de pannes au niveau du système qui est beaucoup plus important pour le couple MFOP = 10000 km et NC = 80%. En conséquence, les C_{TM} pour les histoires simulées sont plus variants. Pour s'en convaincre, on peut comparer les répartitions des C_{TM} pour les deux couples de paramètres (cf. figure 4.9).

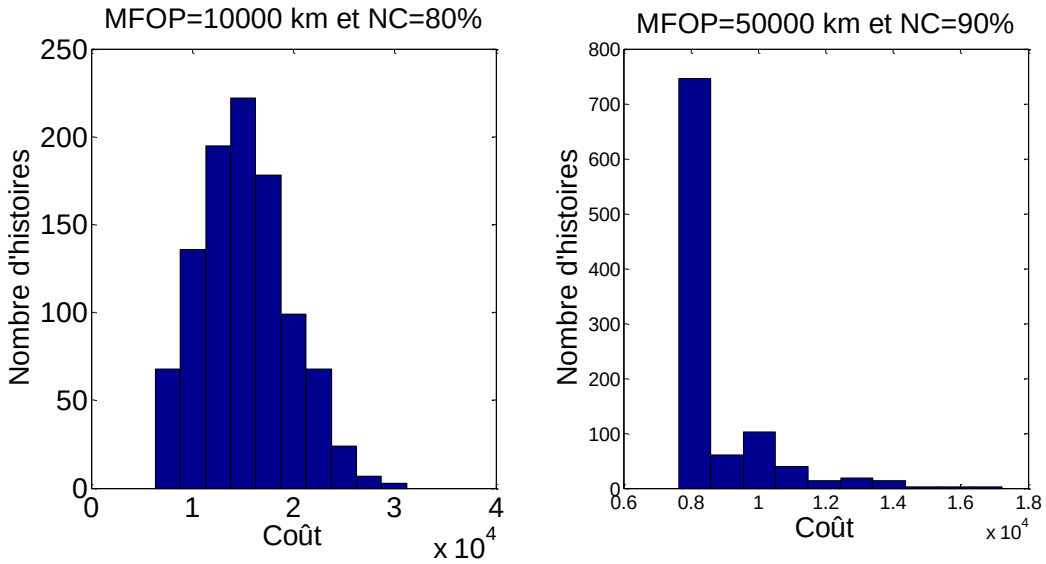

Figure 4.9: Répartition des C_{TM} pour les deux couples de paramètres MFOP et NC

4.4.2 Evaluation de l'algorithme génétique

Pour évaluer la plus-value de l'AG développé, une comparaison est réalisée avec la méthode classique qui consiste à tester toutes les solutions. Notre objectif est ici d'évaluer l'adéquation entre les plannings de maintenance obtenus avec la méthode classique et ceux obtenus avec l'algorithme génétique. Le système multi-composant défini dans la sous-partie précédente est utilisé pour cette comparaison. La politique de maintenance définie dans la partie 4.2 est appliquée sur ce système pour des MFOP allant de 10000 km à 60000 km par pas de 10000 km et des niveaux de confiance NC compris entre 75% et 95% par pas de 5%. Le critère de décision J_1 est utilisé pour cette comparaison. Nous considérons également que le niveau d'information minimal est disponible. Cela signifie qu'à l'instant t, quand la décision de maintenance doit être prise, nous avons accès uniquement à l'information de fonctionnement du système. Pour l'AG, une population initiale de 400 candidats et 6 générations est considérée. Après avoir effectué de nombreux tests, ces paramètres représentent un bon compromis entre les résultats obtenus et le temps de calcul.

Pour chaque couple de paramètres associant une MFOP et un NC, 1000 histoires sont simulées sur un horizon de 5 ans en appliquant tour à tour la méthode de résolution classique et l'AG. Rappelons que ces méthodes de résolution sont utilisées pour sélectionner les opérations de maintenance à effectuer quand l'intervention de maintenance est jugée

nécessaire. Pour chaque histoire, un planning de maintenance est défini. Pour comparer les plannings de maintenance obtenus par chaque méthode, les pannes et les mesures de dégradation sont reproduites à l'identiques. Le pourcentage de plannings de maintenance similaires entre les deux méthodes est de 99%. Suivant les paramètres considérés, le temps de calcul est réduit de 20% à 35% avec l'AG. Ces résultats valident l'utilisation de l'AG pour résoudre le problème d'optimisation sous contrainte à chaque intervention de maintenance.

4.4.3 Comparaison des critères de décision

Dans cette sous-partie, notre objectif est de comparer l'impact des critères de décision J_1, J_2 et J_3 sur la politique de maintenance développée. Cette comparaison est effectuée sur le système spécifié en 4.4.1. Afin de pouvoir analyser en détails les différences entre ces trois critères, trois autres indicateurs en plus du $C_{TM}(t)$ sont proposés. Il s'agit de la durée totale de maintenance $D_{TM}(t)$, du nombre total d'arrêts de maintenance $N_{AM}(t)$ et du nombre total de pannes observées $N_P(t)$. Ces indicateurs sont évalués sur un intervalle de temps [0, t]. Dans la suite, nous présentons uniquement les résultats de ces indicateurs sur un horizon fini de 5 ans. Comme précédemment, ces différents résultats sont obtenus grâce au modèle de maintenance élaboré.

Pour comparer ces différents critères, des simulations sont effectuées en considérant une MFOP allant de 10000 km à 130000 km par pas de 10000 km et un NC allant de 50% à 95% par pas de 5%. Le niveau d'informations minimal est disponible avec seulement l'information de fonctionnement au niveau du système. La figure 4.10 illustre l'évolution du C_{TM} pour les différents couples de paramètres en utilisant le critère de décision J_1. Le coût C_{TM} optimal est obtenu pour les paramètres MFOP = 90000 km et un NC = 70%.

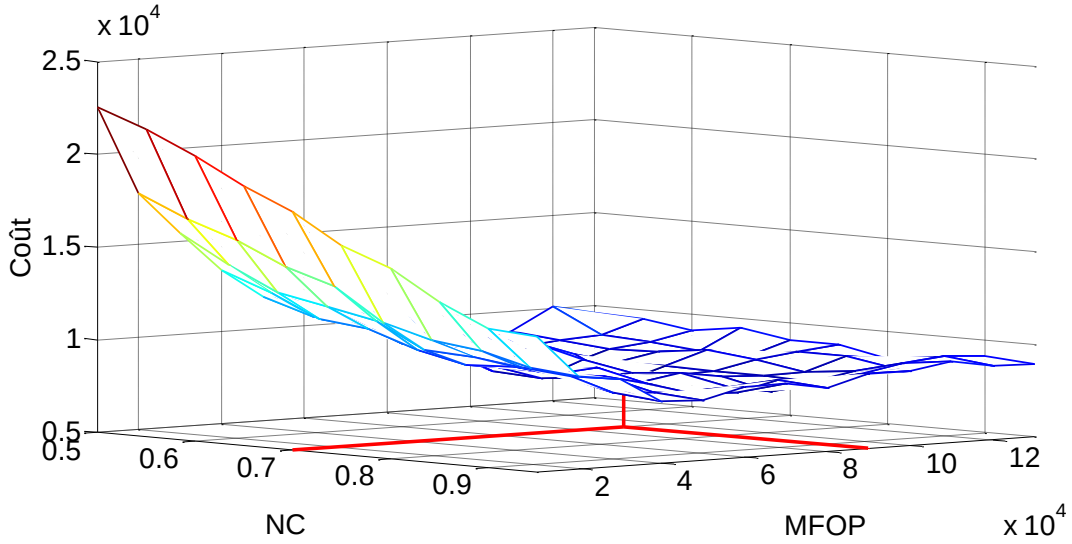

Figure 4.10: Evolution du C_{TM} moyen pour les différents couples de paramètres considérés avec le critère J_1

Une procédure analogue est effectuée pour les critères de décision J_2 et J_3. Le tableau 4.2 synthétise, pour chaque critère proposé, l'ensemble des indicateurs. La valeur de ces indicateurs est obtenue pour le couple de paramètres MFOP/ NC donnant un C_{TM} moyen optimal. Le critère de décision J_1 basé uniquement sur des considérations de coût est utilisé comme référence. Comparativement à J_1, l'analyse des indicateurs pour J_2 montre qu'en dépit d'une augmentation du nombre de pannes N_P, le coût optimal décroit. Cette situation s'explique par une légère diminution de la durée de maintenance D_{TM} et du nombre d'arrêt N_{AM} mais surtout par une réduction de la maintenance préventive. En effet, l'utilisation du critère de décision J_2 améliore le ratio entre le coût de la maintenance préventive et le nombre de pannes. Pour le critère de décision J_3, les résultats illustrent une diminution de tous les indicateurs considérés excepté pour le N_P qui est similaire au critère J_1. Cela signifie que J_3 permet une diminution de la maintenance préventive sans entrainer une augmentation du nombre de pannes. L'efficacité de celle-ci est donc renforcée.

	Couple MFOP / NC optimal	C_{TM} moyen	D_{TM}	N_P	N_{AM}
J_1	90000km / 70%	7414€	21.6h	0.69	3.63
J_2	90000km / 60%	7334€	21.3h	0.72	3.60
J_3	90000km / 60%	7266€	21h	0.69	3.49

Tableau 4.2: Comparaison des différents indicateurs pour les critères considérés

Globalement, le critère J_3 conduit à s'arrêter moins souvent mais à effectuer beaucoup plus d'opérations de maintenance à chaque arrêt. La répartition des C_{TM} moyens sur l'ensemble des couples de paramètres considérés pour le critère J_3 indique une sensibilité plus faible aux valeurs de la MFOP et du NC.

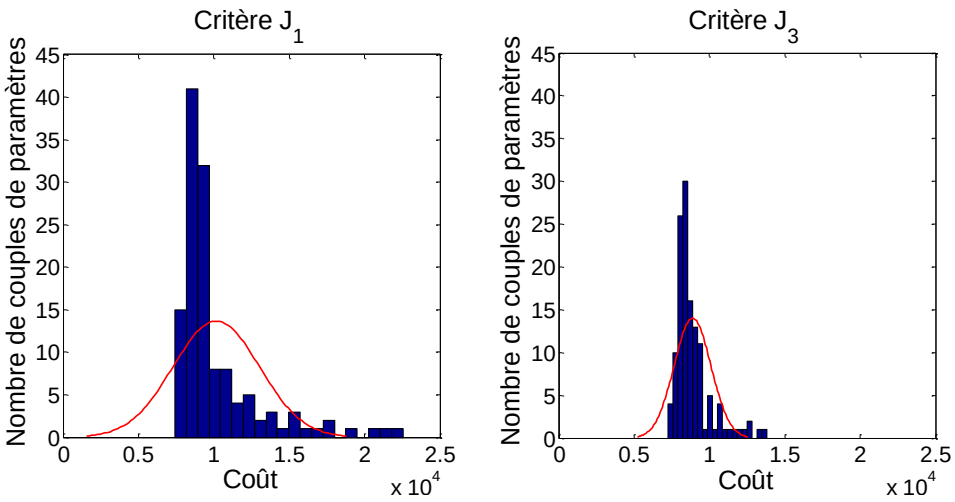

Figure 4.11 : Répartition des C_{TM} moyens sur l'ensemble des couples de paramètres considérés pour les critères J_1 et J_3

Cette caractéristique est illustrée à l'aide de la figure 4.11, en comparant la répartition des C_{TM} moyens sur l'ensemble des couples de paramètres considérés pour le critère J_1 et J_3. Cette spécificité est liée à la définition du critère J_3 qui vise à mettre en avant une solution qui propose le meilleur ratio coût / gain de fiabilité sur un horizon qui ne dépend plus de la MFOP. Sur l'ensemble des critères de décision proposés, le critère J_3 offre la meilleure alternative pour le système considéré. Néanmoins, notons que ces résultats permettent d'évaluer l'impact de ces critères uniquement pour un système donné. Il est donc nécessaire de reproduire cette étude si les propriétés ou la structure du système changent.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la politique de maintenance élaborée dans le cadre de cette thèse a été présentée. Pour s'adapter aux contraintes de l'industrie du poids lourd, cette politique repose sur une forme originale de regroupement basée sur le concept de la MFOP. Celle-ci vise à assurer l'autonomie du système sur des périodes d'opérations données et à diriger le regroupement des maintenances en fonction de ces périodes.

Dans la littérature, la plupart des politiques qui utilisent la MFOP sont statiques. A l'inverse, la politique de maintenance proposée dans ce chapitre est dynamique. Cela signifie qu'elle est capable d'intégrer les informations disponibles en ligne pour adapter la décision de maintenance.

Dans le chapitre suivant, l'objectif est de détailler comment la politique est capable d'intégrer ces informations et surtout quels sont les impacts de celles-ci sur l'optimisation de la politique de maintenance.

Chapitre 5

Prise en compte de l'information de surveillance pour la maintenance

Le chapitre précédent a défini les caractéristiques de la politique de maintenance dynamique développée dans cette thèse. Elle a la particularité de s'appuyer sur la MFOP pour diriger les regroupements des opérations de maintenance. Contrairement à la plupart des politiques de regroupement disponibles dans la littérature, les opportunités de maintenance ne sont pas fixées par les composants mais par l'état du système. La sélection des opérations à effectuer est également fonction de la structure du système multi-composant spécifié.

Nous allons maintenant nous concentrer sur l'aspect dynamique de cette politique. Dans ce contexte, le terme « dynamique » qualifie la politique capable d'intégrer des informations de surveillance disponibles pour adapter la décision de maintenance en ligne. Pour ce faire, nous devons être en mesure de préciser comment ces informations vont être prises en compte dans le processus de décision de maintenance et de quantifier leurs impacts sur cette politique.

Dans ce chapitre, deux types d'information de surveillance sont traités. Dans une première partie, nous détaillons la surveillance relative à l'état de santé des composants. Nous définissons les différents niveaux d'informations considérés et la façon de les prendre en compte dans le processus de décision. Dans une seconde partie, nous nous intéressons à la surveillance relative aux conditions d'utilisation des composants. Nous mentionnons ainsi, suivant les situations considérées, la manière d'intégrer ces informations dans la décision de maintenance. Enfin, nous terminons ce chapitre par un exemple numérique mélangeant ces deux types d'informations pour quantifier les gains sur un système donné en appliquant la politique considérée.

5.1 Surveillance et état de santé des composants

L'une des caractéristiques de la politique de maintenance élaborée, et plus précisément de la $MFOPS$, est la capacité de la mettre à jour à l'instant t en fonction de la fiabilité des composants. Cet instant t correspond au moment où la décision de maintenance est prise ou adaptée. La qualité de la décision de maintenance dépend donc fortement de l'information de surveillance disponible. Dans cette partie, nous nous focalisons sur les informations relatives à l'état de santé des composants du système.

5.1.1 Définition des niveaux de surveillance considérés

Aujourd'hui, les technologies de l'information et de la communication permettent de donner accès à une information toujours plus importante en volume sur l'état de santé des composants. En pratique, ces informations sont rendues disponibles grâce à un investissement conséquent dans l'architecture de surveillance du système. Cet investissement conduit, la plupart du temps, à ajouter des capteurs sur les composants pour accéder à l'information souhaitée. Ces informations additionnelles permettent de baser la décision de maintenance à t sur une estimation plus pertinente de la $MFOPS$.

Néanmoins, suivant les contraintes techniques et les choix initiaux de conception, l'information de surveillance est rarement homogène suivant les composants (Lesobre et al., 2013). Il est donc nécessaire de prendre en compte dans notre processus de décision, différents niveaux d'informations disponibles définis dans le tableau 5.1.

Niveaux d'information	Information disponible au niveau du composant
Niveau 1	Aucune information
Niveau 2	Information sur l'état de fonctionnement Marche/Panne
Niveau 3	Mesure de dégradation

Tableau 5.1: Définition des niveaux d'informations relatifs à l'état des composants

Avant de détailler ces différents niveaux d'information, rappelons l'hypothèse posée dans le chapitre précédent: « nous supposons, qu'au minimum, l'information relative au fonctionnement du système multi-composant est connue à l'instant t ». Si seule l'information du fonctionnement du système est disponible, la $MFOPS$ réalise une moyenne des situations possibles par composant. Dans le cas où un niveau d'information supérieur est disponible sur certains composants, l'estimation de la $MFOPS$ intègre cette information pour éliminer des situations devenues impossibles. La pertinence de l'évaluation est donc accrue.

Décrivons maintenant les niveaux d'information synthétisés dans le tableau 5.1:

- Avec le niveau 1, nous considérons que l'information sur l'état de santé du composant n'est pas explicitement disponible. Ainsi à un instant t, la connaissance du fonctionnement du composant n'est pas connue. Précisons que cette information peut être déduite en fonction de la structure du système. Par exemple, si un système série fonctionne à l'instant t, nous en déduisons que tous ses composants fonctionnent.

- Au second niveau, l'état de fonctionnement du composant est supposé disponible. L'impact de cette information sur la décision de maintenance est fortement corrélé à

la structure du système. Pour un composant qui se trouve en série dans le système, ce niveau d'information n'influe pas sur le calcul de la $MFOPS$ lorsque le système fonctionne. Le fonctionnement du composant est directement déduit du fonctionnement du système. Cette information permet néanmoins d'économiser du temps et de l'argent lors du diagnostic de ce composant quand le système est immobilisé. Pour un composant qui se trouve en parallèle, outre les économies liées au diagnostic, l'information marche/panne influe sur la $MFOPS$. Cette influence est précisée dans la sous-partie suivante.

- Enfin, avec le troisième niveau, une mesure de dégradation est supposée connue. Cette mesure décrit plus précisément l'état réel du composant que les deux autres niveaux d'information et influe aussi bien sur le diagnostic que sur le calcul de la $MFOPS$ quelle que soit la structure du système.

5.1.2 Intégration dans le processus de décision

Dans cette partie, nous allons présenter concrètement l'intégration de l'information de surveillance dans le calcul de la $MFOPS$. Notons $H_{i,t}$ l'information disponible sur l'état de santé du composant i à l'instant t. Cette information peut être quantitative (mesure de dégradation) ou qualitative (« Marche »/ « Panne »). En intégrant, les informations disponibles pour l'ensemble des composants du système, on obtient:

$$MFOPS(t) = \frac{R_{syst}(t + t_{MFOP}/H_{i,t_{\{i \text{ de } 1 \text{ à } n\}}})}{R_{syst}(t/H_{i,t_{\{i \text{ de } 1 \text{ à } n\}}})} = \frac{P(T_{syst} > t + t_{MFOP}/H_{i,t_{\{i \text{ de } 1 \text{ à } n\}}})}{P(T_{syst} > t/H_{i,t_{\{i \text{ de } 1 \text{ à } n\}}})} \quad (5.1)$$

Précisons que la fiabilité conditionnelle du système à l'instant t s'obtient à partir de l'équation 5.1 en faisant varier la valeur t_{MFOP}. Notons également que la densité de probabilité conditionnelle du système se déduit directement de cette fiabilité conditionnelle.

Pour illustrer l'impact de ces informations sur le processus de décision de maintenance, nous allons prendre le cas d'un système parallèle à deux composants A_1 et A_2. Supposons que la détérioration de ces deux composants peut être modélisée par un processus Gamma avec pour paramètres $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.1e - 4$ et $\beta_1 = \beta_2 = 1.5$. Le seuil de dégradation est fixé à $L = 7$.

Notons $H_{1,t}$ et $H_{2,t}$, les informations disponibles à l'instant t respectivement sur le composant A_1 et A_2. Dans ce contexte et en prenant en compte la structure du système, la $MFOPS(t)$ devient:

$$MFOPS(t) = \frac{1 - (1 - R_1(t + t_{MFOP}/H_{1,t})) * (1 - R_2(t + t_{MFOP}/H_{2,t}))}{1 - (1 - R_1(t/H_{1,t})) * (1 - R_2(t/H_{2,t}))} \quad (5.2)$$

En supposant que les composants sont indépendants, les différentes valeurs prises par $R_1(t/H_{1,t})$ et $R_1(t + t_{MFOP}/H_{1,t})$ en fonction du niveau d'information disponible sont:

- Niveau 1 avec $H_{1,t} = \emptyset$, dans ce cas nous avons:

$$\begin{cases} R_1(t/H_{1,t}) = R_1(t) \\ R_1(t + t_{MFOP}/H_{1,t}) = R_1(t + t_{MFOP}) \end{cases}$$

- Niveau 2 avec $H_{1,t} = \text{"Panne"}$, dans ce cas nous avons:

$$\begin{cases} R_1(t/H_{1,t}) = 0 \\ R_1(t + t_{MFOP}/H_{1,t}) = 0 \end{cases}$$

- Niveau 2 avec $H_{1,t} = \text{"Marche"}$, dans ce cas nous avons:

$$\begin{cases} R_1(t/H_{1,t}) = 1 \\ R_1(t + t_{MFOP}/H_{1,t}) = \dfrac{R_1(t + t_{MFOP})}{R_1(t)} \end{cases}$$

- Niveau 3 avec $H_{1,t} = Z_1(t) > L$, dans ce cas le composant est en panne et nous avons:

$$\begin{cases} R_1(t/H_{1,t}) = 0 \\ R_1(t + t_{MFOP}/H_{1,t}) = 0 \end{cases}$$

- Niveau 3 avec $H_{1,t} = Z_1(t) < L$, dans ce cas le composant fonctionne et nous avons:

$$\begin{cases} R_1(t/H_{1,t}) = 1 \\ R_1(t + t_{MFOP}/H_{1,t}) = R_1(t + t_{MFOP}/Z_1(t)) \end{cases}$$

Pour le système étudié, on considère une MFOP de longueur $t_{MFOP} = 30\,000\text{km}$ et un niveau de confiance $NC = 0.9$. Dans le cadre de cette illustration, nous nous plaçons à la fin de la seconde MFOP à $t = 60\,000\text{km}$. A ce kilométrage, nous supposons qu'aucune maintenance n'a été effectuée.

- Dans un premier exemple, nous considérons le cas où l'évolution de la dégradation est très différente selon chacun des composants. La figure 5.1 illustre ces dégradations jusqu'à $t = 60\,000\text{km}$. Sur cette figure, nous affichons également les informations disponibles en fonction des différents niveaux. Nous observons dans cet exemple un composant A_1 fortement dégradé alors que le composant A_2 possède une dégradation encore très faible.

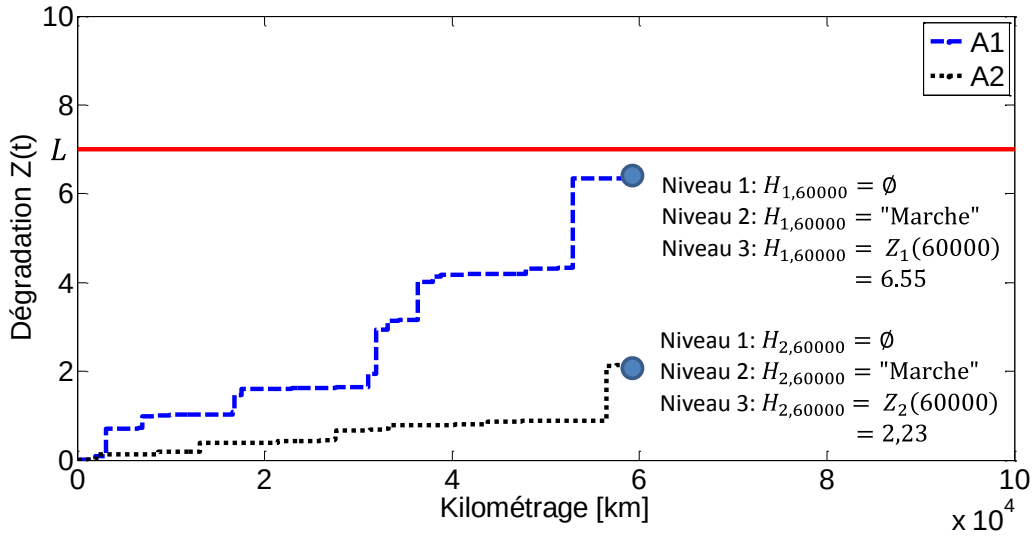

Figure 5.1: Evolution de la dégradation des composants du système (Exemple 1)

La figure 5.2 permet de visualiser le comportement de la densité de probabilité du système conditionnellement au niveau d'informations disponible. Dans ce cas, nous supposons que les deux composants ont un niveau d'information identique. Nous voyons ici que le niveau d'information impacte la forme de la densité de probabilité. L'accès aux mesures de dégradation permet, pour cet exemple, de décaler légèrement la densité de probabilité conditionnelle vers la droite.

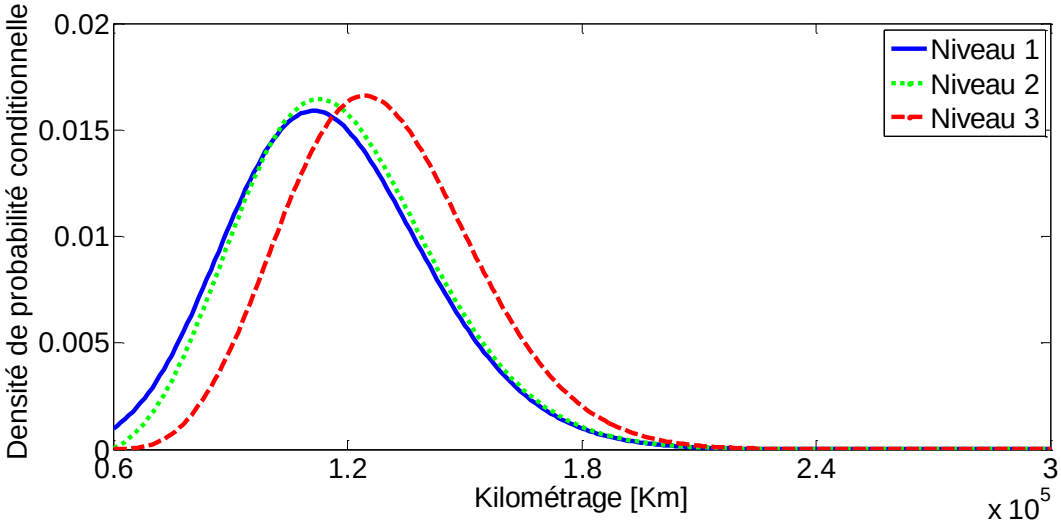

Figure 5.2: Densité de probabilité conditionnelle du système en fonction du niveau d'information (Exemple 1)

Enfin, la figure 5.3 évalue pour chaque niveau d'information la valeur de la $MFOPS(t)$ en s'appuyant sur l'équation 5.2. Cette figure montre que la décision de maintenance change suivant le niveau d'informations considéré. Avec les niveaux d'informations 1 ou 2 sur l'ensemble des composants, la $MFOPS(60\,000) < 0.9$. Dans ce contexte, le processus de décision impose au système de s'arrêter. A

l'inverse, avec un niveau d'information 3 sur l'ensemble des composants, la $MFOPS(60\,000) > 0.9$. Le système peut ainsi être déployé sur la prochaine MFOP sans effectuer d'opérations de maintenance.

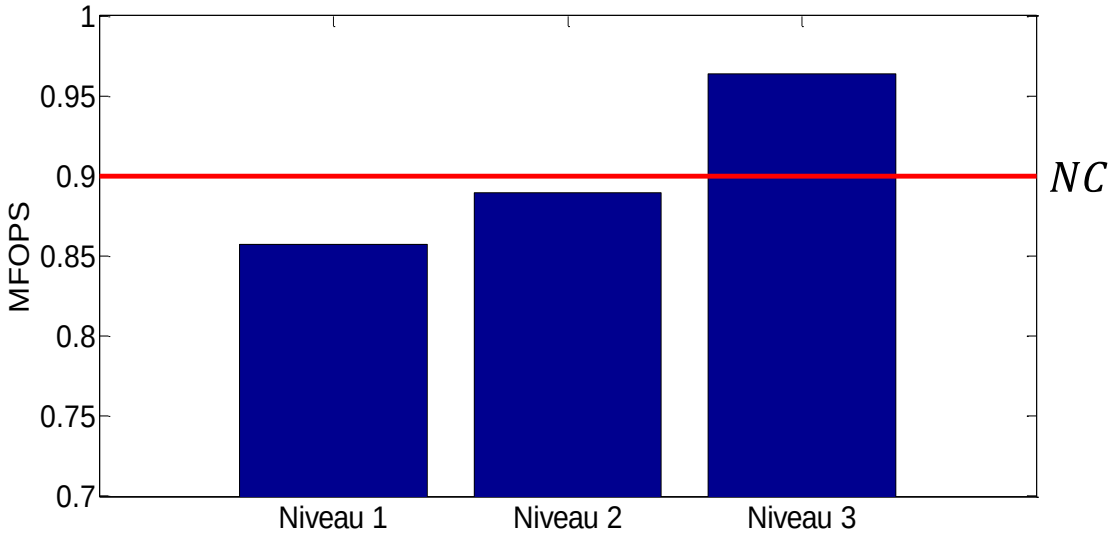

Figure 5.3: $MFOPS$ du système à $t = 60\,000\text{km}$ en fonction du niveau d'information disponible (Exemple 1)

- Dans un second exemple, nous considérons le cas où l'évolution de la dégradation est très similaire pour chacun des composants. La figure 5.4 illustre ces dégradations jusqu'à $t = 60\,000\text{km}$. Nous observons dans cet exemple que les composants A_1 et A_2 sont faiblement dégradés.

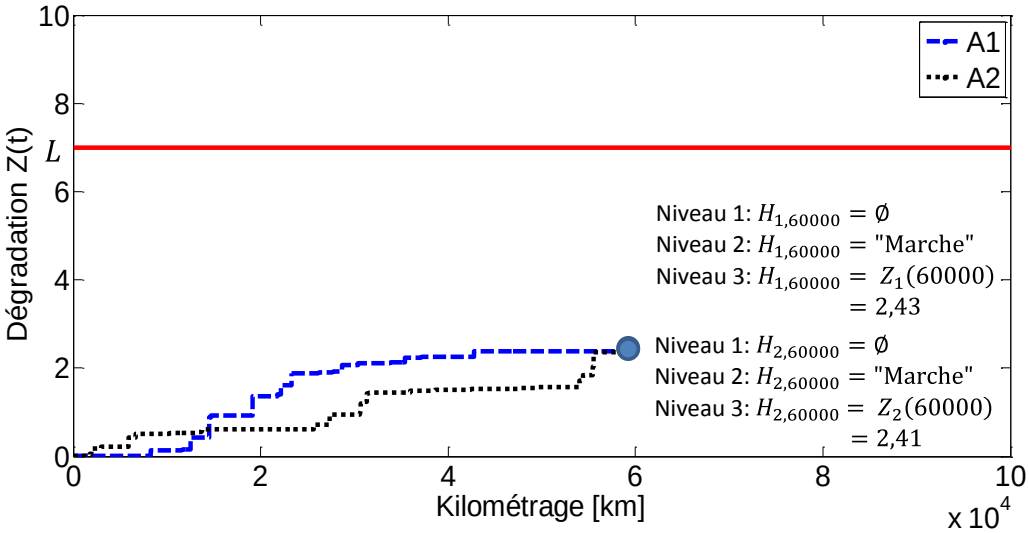

Figure 5.4: Evolution de la dégradation des composants du système (Exemple 2)

La figure 5.5 permet de visualiser le comportement de la densité de probabilité du système conditionnellement au niveau d'information disponible. Pour les niveaux d'information 1 et 2, la densité de probabilité conditionnelle est similaire à celle de l'exemple 1 car les informations sont identiques. A l'inverse, les mesures de dégradation obtenues avec le niveau 3 permettent d'impacter significativement la densité de probabilité conditionnelle. Comme les dégradations sont faibles pour les deux composants de l'exemple 2, la densité de probabilité conditionnelle se décale plus vers la droite que dans l'exemple 1. Cette densité est également plus resserrée.

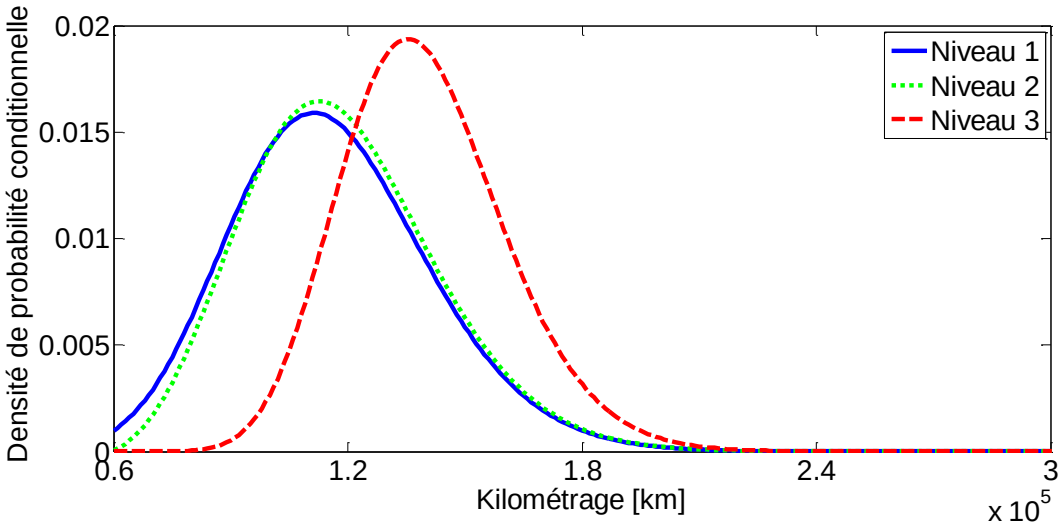

Figure 5.5: Densité de probabilité conditionnelle du système en fonction du niveau d'information (Exemple 2)

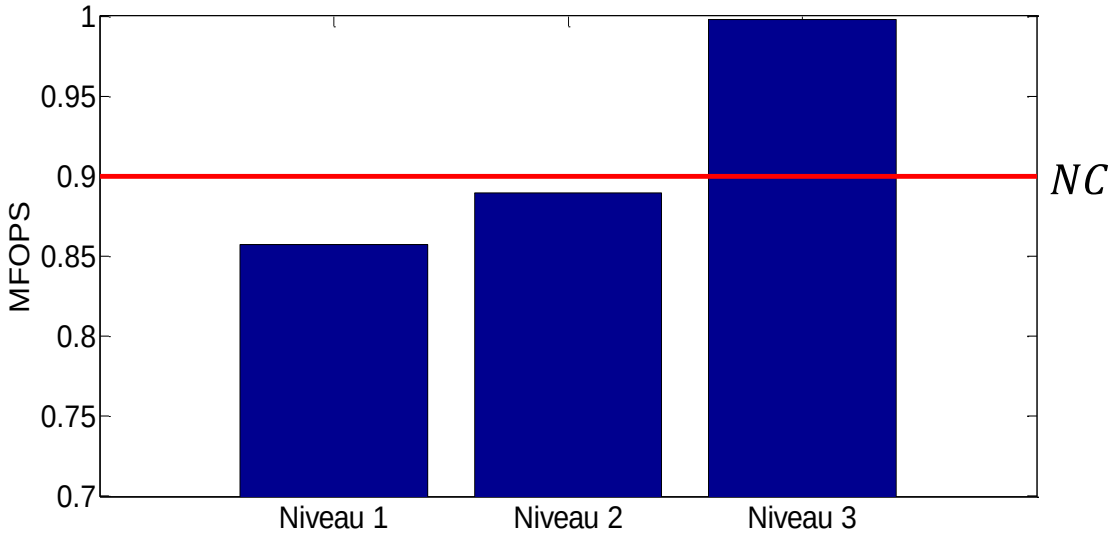

Figure 5.6: $MFOPS$ du système à $t = 60\ 000\text{km}$ en fonction du niveau d'information disponible (Exemple 2)

Ce constat se retrouve dans l'évaluation de la $MFOPS$ pour le niveau 3 qui est très proche de 1 (cf. figure 5.6). Les deux autres $MFOPS$ pour les niveaux 1 et 2 sont identiques à l'exemple 1.

Ces différents exemples montrent ainsi l'intérêt de suivre au plus près l'état des composants et du système pour adapter au mieux la décision de maintenance à la situation réelle.

5.1.3 Impact sur les coûts de maintenance

Nous avons vu dans la sous-partie 5.1.2, que le niveau d'information disponible sur les composants du système pouvait impacter la décision de maintenance. Notre objectif est maintenant d'illustrer l'impact de la surveillance de l'état de santé des composants sur les coûts de maintenance. Pour cet exemple, nous allons reprendre le système défini dans la partie 4.4. La figure 5.7 rappelle la structure du système étudié.

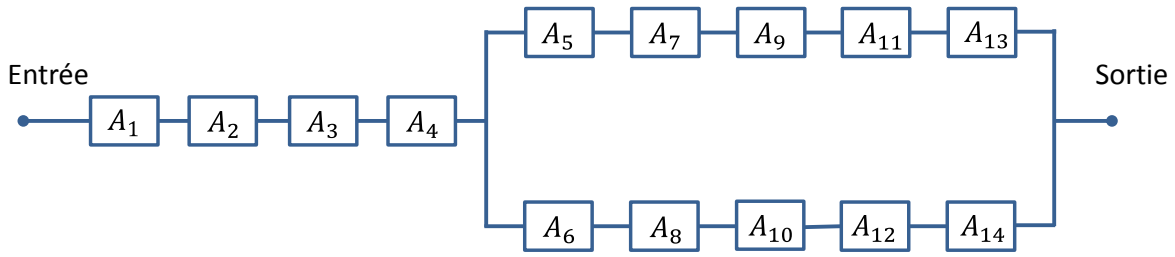

Figure 5.7: Structure du système multi-composant

Dans la partie 4.4, nous avons considéré que le niveau d'information minimal était disponible pour ce système. Cela signifie que lors de la prise de décision de maintenance, l'information sur le fonctionnement ou la panne du système est uniquement disponible. Les informations sont donc de niveau 1 sur l'ensemble des composants. Cette situation correspond à notre hypothèse de surveillance n°1.

Nous considérons maintenant que le niveau d'information maximal sur l'état de santé des composants est disponible. Supposons que les informations sur les composants A_1 à A_{10} sont de niveau 2 et de niveau 3 sur les composants A_{11} à A_{14}. Cette situation correspond à notre hypothèse de surveillance n°2.

Pour les deux hypothèses de surveillance mentionnées ci-dessus, le tableau 5.2 compare les coûts totaux de maintenance C_{TM} optimaux pour les différents critères de décision. La démarche utilisée pour l'obtention des valeurs exprimées dans ce tableau est identique à celle précisée dans la partie 4.4.3. Pour le système étudié, les résultats montrent que l'hypothèse de surveillance n°2 permet d'économiser entre 2% et 5% sur le coût total de maintenance. Nous observons donc dans cet exemple que le coût total de maintenance diminue quand le niveau d'information augmente. Pour les trois critères de décision, cette baisse est principalement due à la réduction du nombre de pannes. Ces résultats sont bien

évidement à mettre en relation avec l'investissement consenti pour mettre en place l'architecture de surveillance nécessaire.

Critères	C_{TM} (Hypothèse de surveillance n°1)	C_{TM} (Hypothèse de surveillance n°2)
J_1	7414€	7254€ (-2%)
J_2	7334€	6977€ (-5%)
J_3	7266€	6882€ (-5%)

Tableau 5.2: Comparaison des C_{TM} optimaux suivant les hypothèses de surveillance considérées

Toujours pour illustrer l'impact de l'information de surveillance sur le coût total de maintenance, nous allons étudier l'évolution des C_{TM} pour trois scénarii de surveillance donnés. Le tableau 5.3 définit pour chaque scénario, le niveau d'informations disponible sur les composants du système. Nous supposons également une MFOP de longueur $t_{MFOP} = 100\,000\text{km}$ et un niveau de confiance $NC = 0.6$. Le critère J_1, basé sur la minimisation des coûts de remplacement, est utilisé dans le processus de décision.

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	C_{TM}
Scénario 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7731€
Scénario 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	7619€ (-1.5%)
Scénario 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	7497€ (-3%)

Tableau 5.3: Evolution du C_{TM} pour trois scénarii fixés

Les différents scénarii ont pour objectif de tester l'impact provoqué par le passage simultané du niveau d'information 1 à 3 sur les composants A_{11} à A_{14} moyennant un niveau d'information 1 sur les autres composants. Nous constatons que l'amélioration du niveau d'information permet une diminution progressive des C_{TM}. L'accès à une mesure de dégradation sur les composants A_{11} à A_{14} entraine une diminution de l'ordre de 3% du C_{TM}.

5.2 Surveillance et conditions d'utilisations des composants

Outre les informations relatives à l'état de santé des composants du système, la qualité de la décision prise repose également sur la connaissance des conditions d'utilisation. Cette connaissance, pour un composant donné, peut être vue comme une information complémentaire à son état de santé. En effet, pour un niveau de détérioration donné, la durée de vie résiduelle dépend aussi des conditions dans lesquelles le composant va être utilisé. Dans cette partie, nous nous focalisons sur la façon d'intégrer ce type d'informations de surveillance dans le processus de décision de maintenance.

5.2.1 Conditions d'utilisation: Définition et problématique

Dans le cas d'un système de transport, que ce soit le véhicule complet ou un sous-système du véhicule, celui-ci évolue dans un environnement dynamique qui influence le mécanisme de dégradation de ses composants. Suivant les composants et leurs fonctions dans le système, une combinaison de variables liée à l'environnement opérationnel (topographie, état de la route, …), à l'utilisation du véhicule (changement de vitesse, …) ou aux types de missions réalisées impacte cette dégradation. La figure 5.8 permet de visualiser quelques exemples d'environnements opérationnels dans lesquels le véhicule peut être amené à évoluer.

Aujourd'hui, beaucoup de systèmes multi-composants évoluent avec des conditions d'utilisation variables mais leurs politiques de maintenance sont difficilement adaptées à ces variations (Tinga & Janssen, 2013). C'est notamment le cas pour la plupart des systèmes militaires mais aussi pour beaucoup d'autres systèmes comme les véhicules industriels. Ne pas prendre en compte cette variabilité au niveau des conditions d'utilisation conduit à une forte incertitude et à une efficacité limitée de la politique de maintenance.

Etat de la route

Topographie

Figure 5.8 : Illustrations de l'environnement opérationnel d'un véhicule industriel

Pour répondre à cette problématique, Tinga (2010) propose d'adopter une approche basée sur les profils d'usage. Il s'agit de classifier l'usage opérationnel d'un système suivant un nombre limité de profils et de définir une relation quantitative entre les profils d'usage et l'état du système. Cette approche est mise en œuvre dans (Tinga & Janssen, 2013) sur une

frégate. Pour les sous-systèmes d'une frégate, les intervalles de maintenance sont fixés par rapport aux temps d'utilisation. Il est également précisé qu'une heure d'utilisation dans des conditions d'usage sévère provoque plus de dégâts que dans des conditions d'usage normal. En surveillant uniquement l'usage, l'approche retenue va permettre de sévériser plus ou moins le calcul des temps d'utilisation et d'adapter, en conséquence, la maintenance.

Contrairement à Tinga & Janssen (2013), notre objectif n'est pas de mettre en place une maintenance basée uniquement sur la surveillance de l'usage (« usage-based maintenance »). Notre but est d'utiliser l'information sur les conditions d'utilisation des composants pour compléter le processus de décision de maintenance. Dans la suite, des méthodes sont proposées pour intégrer ces informations au niveau des modèles de durée de vie ou de dégradation de chaque composant et pouvoir ainsi adapter l'estimation de la $MFOPS$ (Lesobre et al., 2014a) (Lesobre et al., 2014c).

5.2.2 Conditions d'utilisation et modèles de durée de vie

Actuellement, les modèles de durées de vie sont obtenus à partir de l'historique de maintenance disponible par véhicule. Ils sont élaborés par composant pour une gamme de véhicule donnée et par année de mise en circulation. Les résultats obtenus décrivent des modèles avec une variance très importante. La méconnaissance des conditions d'utilisation est l'explication principale de cette variance. En effet, les pannes observées dans l'historique peuvent provenir de composants utilisés dans des conditions totalement différentes. Dans ce contexte, considérer un modèle unique pour un jeu de données de pannes s'avère inapproprié et conduit à définir un modèle avec une variance importante.

L'objectif est donc de réussir à relier les différents profils d'utilisation d'un composant à des modèles de durée de vie. Dans cette sous-partie, une méthode basée sur l'expérience est proposée pour établir cette connexion. Sous l'hypothèse que les conditions d'utilisation du composant affectent sa fiabilité et sa loi de durée de vie, une méthode basée sur les modèles de mélange peut être utilisée. Considérer un modèle de mélange de lois pour un composant revient à considérer qu'à chaque profil d'utilisation correspond une loi. De plus, lorsqu'on observe la durée de vie d'un composant sans connaître son profil d'utilisation, sa loi de durée de vie suit une loi de mélange des lois liées à chaque profil d'utilisation.

Pour mettre en place la méthode, nous considérons avoir accès à un historique de pannes par composant. Nous supposons également qu'un composant évolue au cours de sa vie entre un environnement dit « normal » et un environnement dit « stressé ». Pour chacune des pannes contenues dans l'historique, nous faisons l'hypothèse que la variable $\tau_{i,panne}^{S}$ est disponible. Celle-ci correspond au ratio de la distance passée par un composant i dans un environnement « stressé » sur la distance totale parcourue à la panne.

Définition des modèles de mélange

Nous sommes en présence d'un modèle de mélange de lois de probabilité lorsque les données proviennent d'une source contenant plusieurs sous-populations (Razali & Al-Wakeel, 2013). Chaque sous-population est modélisée de manière séparée par une loi de probabilité. La population totale est un mélange de ces sous-populations. Dans notre contexte, chaque sous-population représente donc un profil d'utilisation différent pour un composant. La fonction de densité de la loi de mélange est donnée par:

$$g(x) = \sum_{\varepsilon=1}^{s} \pi_\varepsilon f_\varepsilon\,(x, \varphi_\varepsilon) \tag{5.3}$$

avec s le nombre supposé de sous-populations dans le mélange étudié, π_ε la proportion de la ε-ième sous-population dans le mélange et $f_\varepsilon(x, \varphi_\varepsilon)$ la densité de probabilité de la ε ième sous-population. De même, la fonction de répartition de la loi de mélange est donnée par:

$$G(x) = \sum_{\varepsilon=1}^{s} \pi_\varepsilon F_\varepsilon\,(x, \varphi_\varepsilon) \tag{5.4}$$

avec $F_\varepsilon(x, \varphi_\varepsilon)$ la fonction de répartition de la ε-ième sous-population.

L'estimation des paramètres de la loi de mélange est effectuée avec la méthode du maximum de vraisemblance. Cette méthode consiste à rechercher les valeurs des paramètres qui maximisent le logarithme de la vraisemblance des données observées. Pour atteindre cet objectif en présence de données incomplètes, l'algorithme EM (Expectation-Maximisation) est majoritairement utilisé (Lebarbier & Mary-Huard, 2008). Cette procédure va ainsi permettre, à partir de l'historique des pannes, d'estimer les paramètres du modèle de mélange pour un nombre donné de s sous-populations.

Cependant, en principe, le nombre de sous-populations est inconnu. Même si l'on dispose d'informations a priori sur les données, il est difficile de le fixer par avance. Pour déterminer le nombre de sous-populations s, le coefficient de détermination permettant d'appréhender la qualité de l'ajustement entre les données initiales et les données estimées avec le modèle de mélange est introduit (Razali & Al-Wakeel, 2013). Le coefficient de détermination s'exprime de la façon suivante:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{e=1}^{N_d} (\vartheta_e - \widehat{\vartheta_e})^2}{\sum_{e=1}^{N_d} (\vartheta_e - \bar{\vartheta})^2} \tag{5.5}$$

avec N_d le nombre de données dans la population totale, ϑ_e les fréquences relatives associées aux données observées, $\widehat{\vartheta_e}$ les valeurs estimées en utilisant les lois de mélange et $\bar{\vartheta}$ la moyenne des ϑ_e. La qualité de l'ajustement augmente naturellement avec le nombre de sous-populations

considéré. Pour éviter de choisir toujours le nombre maximal de sous-populations défini par notre connaissance a priori, un seuil de 0.99 est fixé pour le coefficient de détermination. Ainsi, le premier modèle de mélange à s sous-populations avec un coefficient de détermination supérieur à 0.99 est retenu. Cette limite a été fixée suite à des tests sur des données où le nombre de sous-population était initialement connu. Pour choisir le nombre de sous-populations dans le mélange, le critère BIC (Bayesian Information Criteria) est également très utilisé. Néanmoins, dans le contexte de notre étude, les résultats obtenus avec ce critère sont moins pertinents.

Affectation des données a posteriori

Une fois le nombre de sous-populations et les paramètres du mélange identifiés, il est ensuite nécessaire de pouvoir affecter chaque panne observée à une sous-population donnée. Pour ce faire, l'idée naturelle est de classer la panne dans la sous-population dont elle a le plus de chances d'être issue au vue de sa valeur observée et des caractéristiques des sous-populations. On s'intéresse donc ici à la probabilité que l'individu a appartienne à la sous-population B, sachant que l'on a observé pour cet individu la valeur x_a pour sa date de défaillance. Cette probabilité notée ρ_{aB} est appelée probabilité a posteriori que l'individu a soit dans la population B et elle est donnée par :

$$\rho_{aB} = \frac{\pi_B f_B(x_a, \varphi_B)}{\sum_{\varepsilon=1}^{s} \pi_\varepsilon f_\varepsilon\,(x_a, \varphi_\varepsilon)} \tag{5.6}$$

En s'appuyant sur cette probabilité, une classification basée sur la règle du Maximum A Posteriori (MAP) va être utilisée (Lebarbier & Mary-Huard, 2008). Nous allons ainsi classer l'individu a dans la sous-population B correspondant à la probabilité ρ_{aB} maximale pour cet individu. Si cette quantité est proche de 1 pour une sous-population, l'individu est classé avec un faible risque d'erreur dans cette sous-population. Si au contraire les probabilités sont assez proches, le classement de l'individu comporte un risque d'erreur plus important. En pratique, cette affectation réalise une classification des pannes observées. Pour rappel, la variable $\tau_{i,panne}^{S}$ est supposée connue. Cette variable permet dans ce contexte de connaître les conditions d'utilisation pour chaque panne répertoriée. Notre démarche consiste alors à apprendre le ou les seuils sur $\tau_{i,panne}^{S}$ pour distinguer les différentes sous-populations à partir de l'ensemble d'apprentissage classifié par une règle MAP. Ce ou ces seuils sont ensuite utilisés quand une décision de maintenance doit être prise pour sélectionner le modèle de durée de vie adéquat pour un composant. Cela signifie qu'à l'instant t, quand une décision de maintenance doit être prise, la variable $\tau_{i,t}^{S}$ est utilisée pour sélectionner le modèle de durée de vie adéquat en fonction des conditions d'utilisation. Cette variable $\tau_{i,t}^{S}$ correspond au ratio de la distance passée par un composant i dans un environnement « stressé » sur la distance totale parcourue à l'instant t.

Illustration de la méthode

L'objectif de cette illustration est de mettre en œuvre la méthode basée sur les modèles de mélange que nous venons de détailler. L'histogramme (cf. figure 5.9) représente l'ensemble des pannes répertoriées pour un composant i donné. Chaque panne mentionnée dans l'histogramme est associée avec sa variable $\tau_{i,panne}^{S}$. A partir de cette population initiale, l'objectif va être de déterminer si les pannes obtenues pour ce composant sont issues d'une ou de plusieurs sous-populations.

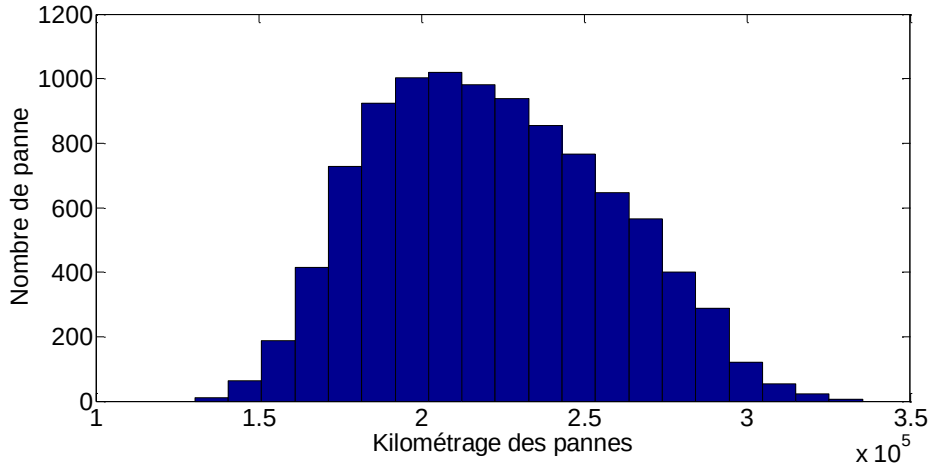

Figure 5.9: Répartition des pannes pour le composant i

Considérons, dans une première étape le cas avec $s = 1$ sous-population. Une loi de Weibull est utilisée pour modéliser la durée de vie de ce composant. A noter que la loi de Weibull est la loi de durée de vie la plus largement utilisée pour modéliser des ensembles de pannes. Pour ce jeu de données, si nous considérons uniquement une sous-population et une loi de Weibull pour l'estimation, on obtient un coefficient de détermination égal à $R_{s=1}^{2} = 0.986$.

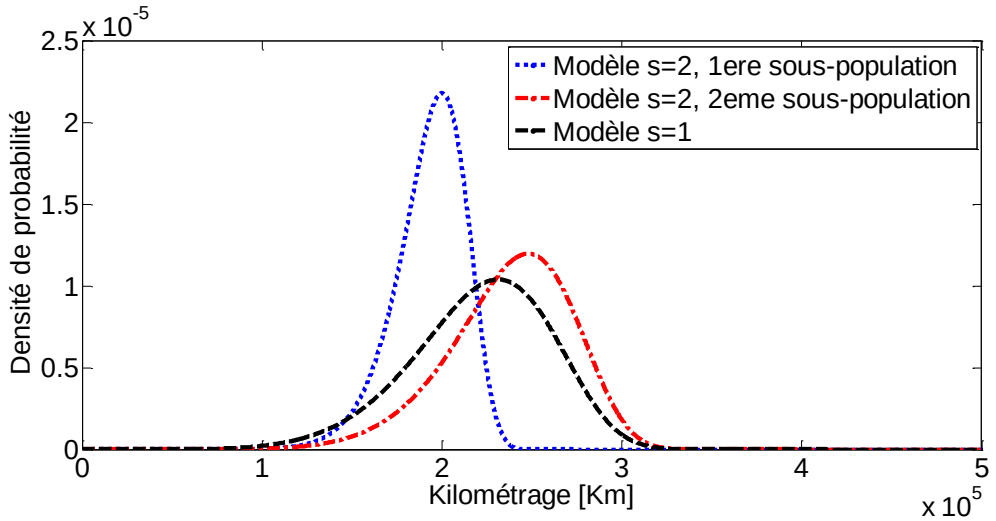

Figure 5.10: Modèles de durée de vie obtenus avec $s = 1$ et $s = 2$

Bien que cette valeur soit parfaitement acceptable, la figure 5.10 montre une variance très importante pour le modèle à $s = 1$ sous-population. En appliquant les modèles de mélange pour des lois de Weibull à 2 sous-populations sur ce jeu de données, nous obtenons un coefficient de détermination de $R^2_{s=2} = 0.992$. La variance sur les deux modèles définis est beaucoup plus faible et donc plus acceptable. Nous allons ainsi retenir un mélange de 2 sous-populations pour ce jeu de données. Les deux courbes pour $s = 2$ représentent les deux sous-populations identifiées.

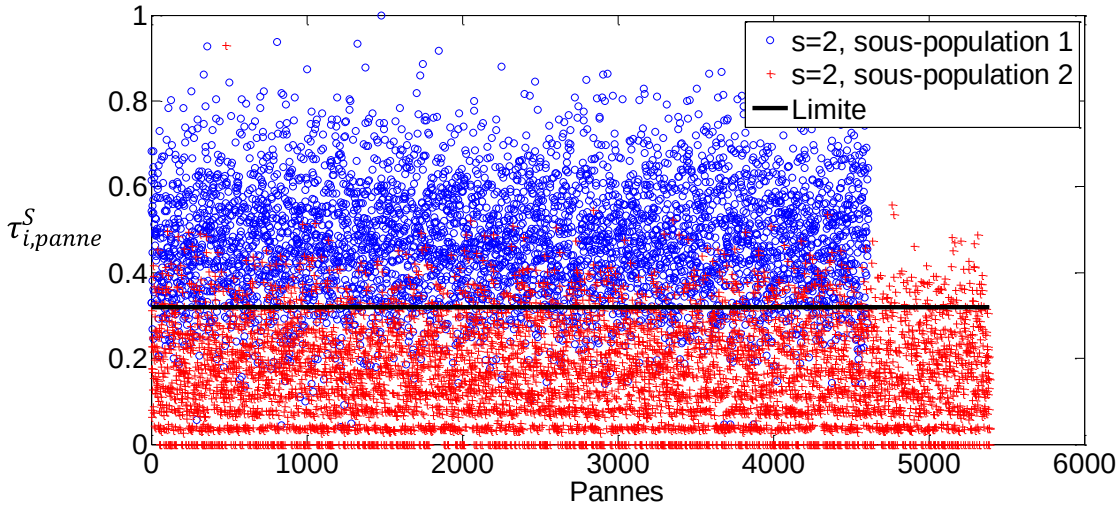

Figure 5.11: Allocation des pannes répertoriées dans la base de données simulée

Une fois les paramètres des différents modèles de mélange estimés et le nombre de sous-populations sélectionné, l'affectation des pannes a posteriori aux différentes sous-populations doit être effectuée. Les résultats de cette affectation sont proposés dans la figure 5.11. L'analyse de cette figure fait ressortir que les variables $\tau^S_{i,panne}$ sont globalement plus élevées pour les pannes associées à la sous-population 1. La dernière étape consiste à définir une valeur limite au niveau de la variable $\tau^S_{i,panne}$ permettant de distinguer les deux sous-populations. Cette limite est déterminée en maximisant le nombre de pannes correctement placés. Dans notre illustration, la limite est fixée à 32%. Cette limite permet, quand une décision de maintenance doit être prise, de sélectionner le modèle de durée de vie adéquat pour un composant en se basant uniquement sur ses conditions d'utilisation.

5.2.3 Conditions d'utilisation et modèles de dégradation

Supposons qu'un composant évolue au cours de sa vie entre un environnement dit « normal » et un environnement dit « stressé » qui influencent sa dégradation. Considérons également que les informations contenues dans la base de données nous permettent de retrouver les processus de dégradation suivis par le composant dans l'environnement « normal » et dans l'environnement « stressé ». Notons $G(\alpha_{i,N}, \beta_{i,N})$ et $G(\alpha_{i,S}, \beta_{i,S})$ les

processus de dégradation correspondant respectivement à l'environnement normal et à l'environnement stressé pour un composant i. Sous l'hypothèse que les informations de surveillance disponibles en ligne nous donnent accès à une mesure de dégradation et à la variable $\tau_{i,t}^{S}$, une méthode doit être proposée pour intégrer ces informations dans le processus de décision. Plus spécifiquement, la méthode proposée doit permettre d'estimer la durée de vie résiduelle d'un composant i à l'instant t_1 conditionnellement à son niveau de dégradation $Z_i(t_1)$ et à ses conditions d'utilisation représentées par la variable τ_{i,t_1}^{S}.

Présentation de l'approximation proposée

Pour estimer cette durée de vie résiduelle, le problème est la méconnaissance des conditions d'utilisations futures du composant. Dans la littérature, les hypothèses les plus courantes consistent à considérer que l'environnement après t_1 est fixe ou que l'on connait exactement les transitions futures entre l'environnement « normal » et « stressé » (Khoury, 2012). Par exemple, si on considère qu'après t_1, le composant i évolue uniquement dans un environnement dit « normal », sa fiabilité conditionnelle est donnée par:

$$R(t|Z_i(t_1)\,) = 1 - \frac{\Gamma(\alpha_{i,N}(t-t_1),\ \big(L_i - Z_i(t_1)\big)\beta_{i,N})}{\Gamma(\alpha_{i,N}(t-t_1))} \tag{5.7}$$

Ces hypothèses semblent peu réalistes dans le cas où les conditions d'utilisation passées du composant sont très variables. Pour la méthode proposée, l'hypothèse retenue est de considérer que l'environnement après t_1 est un mélange d'environnements « normaux » et « stressés ». La proportion entre ces deux environnements est supposée similaire à celle observée au cours de son utilisation passée.

Dans ce contexte, une approximation du mécanisme de dégradation après t_1 peut être donnée par un processus Gamma dont la moyenne et la variance des incréments sont des moyennes pondérées par τ_{i,t_1}^{S} des moyennes et des variances relatives aux processus Gamma $G(\alpha_{i,N},\beta_{i,N})$ et $G(\alpha_{i,S},\beta_{i,S})$ initiaux. Nous proposons de définir les paramètres à t_1 de ce nouveau processus de dégradation nommé $G(\alpha_{i,mix},\beta_{i,mix})$ de la manière suivante:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_{i,mix}}{\beta_{i,mix}} &= \left(1-\tau_{i,t_1}^{S}\right) * \left(\frac{\alpha_{i,N}}{\beta_{i,N}}\right) + \left(\tau_{i,t_1}^{S}\right) * \left(\frac{\alpha_{i,S}}{\beta_{i,S}}\right) \\ \frac{\alpha_{i,mix}}{{\beta_{i,mix}}^2} &= \left(1-\tau_{i,t_1}^{S}\right) * \left(\frac{\alpha_{i,N}}{{\beta_{i,N}}^2}\right) + \left(\tau_{i,t_1}^{S}\right) * \left(\frac{\alpha_{i,S}}{{\beta_{i,S}}^2}\right) \end{aligned} \tag{5.8}$$

avec $\left(\frac{\alpha_N}{\beta_N}\right)$ et $\left(\frac{\alpha_N}{{\beta_N}^2}\right)$ l'espérance et la variance des incréments du processus Gamma $G(\alpha_{i,N},\beta_{i,N})$. Ainsi l'estimation de la fiabilité conditionnelle est donnée par:

$$R(t|Z_i(t_1)) = 1 - \frac{\Gamma(\alpha_{i,mix}(t-t_1),\ \left(L_i - Z_i(t_1)\right)\beta_{i,mix})}{\Gamma(\alpha_{i,mix}(t-t_1))} \tag{5.9}$$

Evaluation de l'approximation proposée

Afin de valider l'approximation proposée à l'équation 5.9, la première étape consiste à reproduire des histoires de dégradation pour le composant i avec des conditions d'utilisation similaires. L'objectif est de comparer la fonction de répartition obtenue à partir des pannes simulées avec l'approximation proposée.

Pour simuler ces histoires de dégradation, un processus markovien composé de deux états représentant « l'environnement normal » et « l'environnement stressé » est introduit. Ce processus est utilisé pour simuler les différents changements d'état durant la vie du composant. Supposons que le taux de transition entre un environnement normal et stressé suit une loi exponentielle de paramètre θ_{NS} et que le taux de transition entre un environnement stressé et normal suit une loi exponentielle de paramètre θ_{SN}. Pour ce processus, considérons que la loi stationnaire définit une valeur de 40% pour l'environnement « normal » et une valeur de 60% pour l'environnement « stressé ». De plus, supposons que le nombre moyen de kilomètres de séjour dans un environnement normal est fixé à 1000 km. Le mécanisme de dégradation suit un processus Gamma $G(7e(-4), 17)$ pour l'environnement normal et un processus Gamma $G(1.4e(-3), 20)$ pour l'environnement stressé. Le seuil limite de dégradation est fixé à $L_i = 12$ pour le composant considéré. Les hypothèses précédentes permettent de déterminer les valeurs de $\theta_{NS} = \frac{1}{1000} = 0.001$ et de $\theta_{SN} = \frac{2}{3}\ \theta_{NS}$.

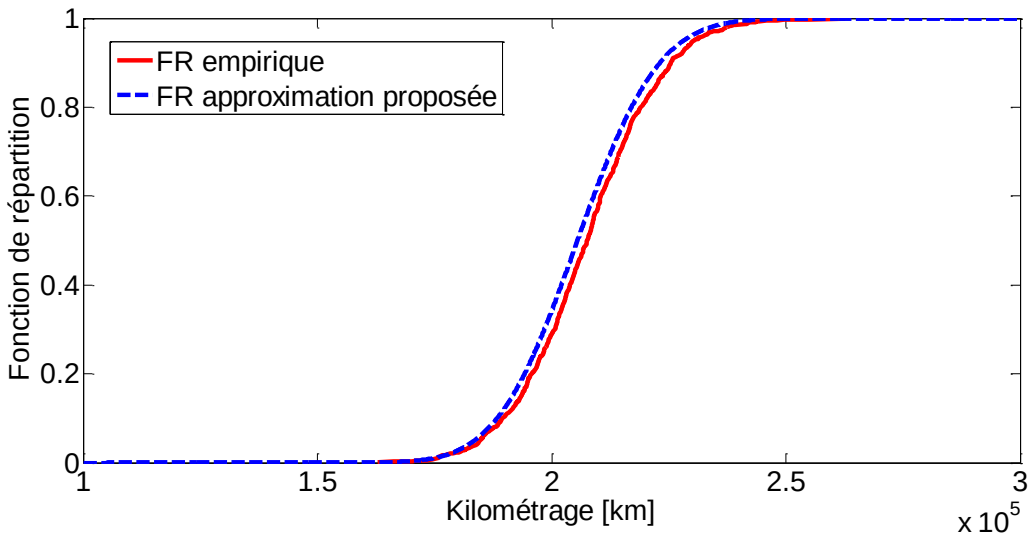

Figure 5.12 : Comparaison entre la fonction de répartition empirique et l'approximation proposée (FR=Fonction de répartition)

Avec ces hypothèses, 1000 histoires de dégradation sont simulées. Pour chaque histoire, le kilométrage où la panne se produit est enregistré. Comme l'horizon de simulation est très grand, la loi stationnaire est considérée comme atteinte. Cette hypothèse est vérifiée sur les simulations avec la variable $\tau_{i,panne}^{S}$ associée à la panne du composant qui est en moyenne égale à 60% sur l'ensemble des histoires simulées avec une variance de l'ordre de $1.4.10^{-3}$.

Pour valider l'approximation proposée, la figure 5.12 compare la fonction de répartition empirique construite à partir des pannes simulées et la fonction de répartition obtenue en se basant sur l'équation 5.9. A noter que la pondération utilisée est similaire à la loi stationnaire définie pour le processus markovien. Cette figure permet ainsi de visualiser la grande proximité entre la fonction de répartition empirique et l'approximation proposée. Le calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0.98$ entre ces deux courbes permet de confirmer et de valider que l'approximation réalisée est pertinente.

5.3 Exemple numérique

Dans cette dernière partie, notre objectif est d'évaluer l'impact de l'information de surveillance sur la politique de maintenance développée. Dans ce cadre, nous présentons, tout d'abord, la procédure de simulation utilisée, les différents cas de surveillance considérés et la description du système étudié. Nous terminons par les résultats et leurs interprétations.

5.3.1 Procédure de simulation

Dans l'état actuel, l'architecture de surveillance du véhicule industriel ne permet pas d'avoir accès aux conditions d'utilisation des composants. Conscient de cette problématique, de nombreux projets sont en cours au sein du groupe Volvo pour accéder à une connaissance précise de l'environnement dynamique dans lequel évolue chaque système. Pour pallier ce manque d'informations, des données d'historique de remplacement sont générées par simulation pour chacun des composants d'un système donné. Pour la création de cette base, un cadre de simulation identique est proposé. Son objectif est de retranscrire le plus fidèlement possible la dégradation d'un composant dans un environnement dynamique.

Considérons que les conditions d'utilisation d'un composant donné évoluent entre un environnement dit « normal » et un environnement dit « stressé ». Dans la réalité, la distinction entre ces deux environnements peut être effectuée par le suivi de variables liées à l'environnement opératoire, à l'utilisation du véhicule ou aux types de missions. Afin de retranscrire la variabilité observable au niveau des conditions d'utilisation des composants, un grand nombre d'histoires est simulé. Pour chaque histoire, les conditions d'utilisation sont supposées différentes. Ces histoires peuvent être vues comme une succession de périodes kilométriques dont les longueurs sont définies à partir d'une loi normale $N(10000, 1000)$. Un environnement « normal » ou « stressé » est ensuite affecté à

chacune de ces périodes. Pour effectuer cette affectation une probabilité de se trouver dans un environnement « stressé » comprise entre 0 et 60% est associée à chaque histoire. Les paramètres utilisés pour modéliser la longueur des périodes ont été définis avec des experts internes et sont indépendants de la fiabilité du composant.

Afin de simuler le mécanisme de dégradation du composant, nous allons considérer que l'environnement influe sur la rapidité et la variance de sa dégradation. Dans ce cas, des processus Gamma avec des paramètres différents sont affectés à l'environnement « normal » et à l'environnement « stressé ». Notons $G(\alpha_{i,N}, \beta_{i,N})$ et $G(\alpha_{i,S}, \beta_{i,S})$ les processus de dégradation correspondant respectivement à l'environnement normal et à l'environnement stressé pour un composant i. Rappelons que le processus Gamma est un processus à accroissements positifs très utilisé pour modéliser l'usure d'un composant (Abdel-Hameed, 1975) (Van Noortwijk, 2009). Le composant est considéré en panne dès lors que son niveau de dégradation noté $Z_i(t)$ dépasse une limite de dégradation spécifiée L_i. La figure 5.13 illustre, pour une histoire donnée, le mécanisme de dégradation d'un composant en fonction de son environnement simulé. Notons que les processus de dégradation donnés à la figure 5.13 sont uniquement illustratifs.

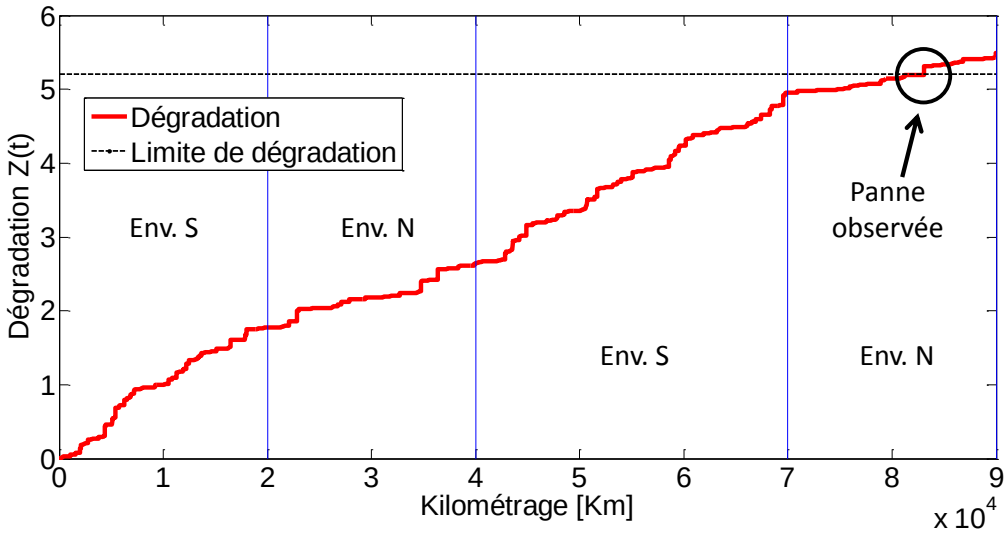

Figure 5.13: Dégradation d'un composant dans un environnement dynamique (Env. N = Environnement normal, Env. S = Environnement stressé)

Pour chaque histoire simulée, la base de données enregistre la dégradation du composant, sa date de panne ainsi que ses conditions d'utilisation. L'information sur les conditions d'utilisation prend la forme d'une variable $\tau_{i,t}^{S}$ exprimée en pourcentage. Cette variable $\tau_{i,t}^{S}$ correspond au ratio de la distance passée par un composant i dans un environnement « stressé » sur la distance totale parcourue à l'instant t.

5.3.2 Description des cas de surveillance considérés

Pour être en mesure d'évaluer l'impact de l'information de surveillance sur la politique de maintenance développée, plusieurs cas de surveillance sont considérés (cf. tableau 5.4).

Cas de surveillance	**Hypothèses**		
	Information sur les conditions d'utilisation des composants	Niveau d'information disponible sur l'état de santé des composants	Modèle de fiabilité disponible
Cas 1	Non	Niveau 2	Modèle de durée de vie unique par composant
Cas 2	Oui	Niveau 1	Modèles de durée de vie liés aux conditions d'utilisation
Cas 3	Oui	Niveau 3	Modèles de dégradation liés aux conditions d'utilisation

Tableau 5.4: Définition des différents cas de surveillance considérés

Pour expliciter les différents cas de surveillance proposés, nous distinguons les hypothèses en deux groupes:

- Le premier groupe se concentre sur l'information disponible au sein de la base de données simulée. Suivant les cas de surveillance considérés, nous supposons que les informations répertoriées dans la base de données simulée peuvent être partiellement disponibles. Ces hypothèses servent à rendre compte des différences observables au niveau de la précision des informations dans les bases de données.

- Dans un second groupe, nous nous focalisons sur les hypothèses relatives aux informations de surveillance disponibles en ligne pour les différents composants du système.

L'ensemble de ces hypothèses va jouer un rôle dans le processus de décision de maintenance mis en place. Dans cet exemple numérique, nous nous concentrons uniquement sur trois cas de surveillance parmi l'ensemble des combinaisons possibles. De notre point de vue, cette combinatoire, même si elle est restreinte, est suffisante pour mettre en évidence l'impact de l'information de surveillance sur la politique de maintenance développée.

Cas 1

Dans le premier cas de surveillance considéré, nous supposons que l'historique de maintenance donne accès uniquement aux kilométrages de panne. Nous ne disposons ainsi

d'aucune information sur les conditions d'utilisation des composants, ni sur leur dégradation. Dans ce contexte, un modèle de durée de vie unique est défini par composant. Ces modèles servent à estimer la $MFOPS$ du système dans ce premier cas de surveillance.

En s'appuyant sur ces hypothèses, un modèle de maintenance va évaluer le C_{TM} moyen du système en appliquant la politique de maintenance développée dans le chapitre précédent. Pour mettre en place ce modèle, des histoires de dégradation sont simulées pour chaque composant. Le cadre de simulation est similaire à celui utilisé pour la construction des bases de données initiales. Nous supposons également que l'information sur l'état de fonctionnement de chaque composant du système est disponible en ligne. A l'inverse, les conditions d'utilisation sont inconnues. Ce premier cas de surveillance est très proche de la situation actuelle du groupe Volvo et il est utilisé comme point de comparaison.

Cas 2

Pour le second cas de surveillance, l'historique de maintenance est supposé contenir les instants de pannes et les conditions d'utilisation de chaque composant du système. Ces informations permettent de définir des modèles de durée de vie qui vont être liés aux conditions d'utilisation du composant. La méthode utilisée pour relier conditions d'utilisation et modèles de durée de vie a été explicitée dans la sous-partie 5.2.2.

Sur la base de ces hypothèses, le processus de décision de maintenance est adapté conformément aux recommandations de la sous-partie 5.2.2. Un modèle de maintenance est ensuite utilisé pour estimer le C_{TM} moyen du système. Pour chaque histoire simulée, nous supposons qu'aucune information n'est disponible en ligne sur l'état de santé des composants. A l'inverse, la variable $\tau_{i,t}^{S}$ traduisant les conditions d'utilisation est supposée connue. Cette information permet de sélectionner le modèle de durée de vie adéquat avant chaque décision de maintenance.

Cas 3

Dans le troisième et dernier cas de surveillance, nous supposons que l'historique de maintenance disponible nous permet de définir, pour chaque composant, les processus de dégradation dans l'environnement « normal » et dans l'environnement « stressé ».

Pour mettre en place le modèle de maintenance permettant d'évaluer la politique, nous supposons qu'une mesure de dégradation et que les conditions d'utilisation sont disponibles à chaque décision de maintenance pour chaque composant. Pour intégrer ces informations, la méthode développée dans la sous-partie 5.2.3 est utilisée.

5.3.3 Présentation du système étudié

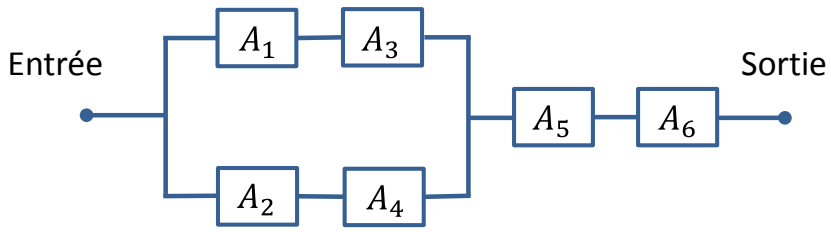

Figure 5.14: Définition de la structure du système multi-composant étudié

La figure 5.14 définit la structure du système multi-composant que nous allons utiliser pour cette illustration. Pour ce système, nous considérons un kilométrage annuel moyen de 100 000 km. Le coût et le temps de diagnostic unitaire sont respectivement de $C_{UD} = 20€$ et $D_{UD} = 5$ min. Le taux horaire de la main d'œuvre est fixé à $\tau_{MO} = 90€$ et le coût de la perte d'exploitation par heure d'immobilisation équivaut à $\tau_I = 100€$. Pour le remorquage, nous avons un coût supposé de $C_{Remor} = 1500€$ pour une durée estimée à $D_{Remor} = 5$h. Enfin, le coût logistique lié à l'entrée du système en atelier de maintenance est de $C_{Log} = 100€$ pour une durée fixée à $D_{Log} = 30$ min.

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
Processus de dégradation	G(7e(-4),20) G(1.4e(-3),20) L=12	G(7e(-4),20) G(1.4e(-3),20) L=12	G(8e(-4),20) G(1.6e(-3),20) L=12	G(8e(-4),20) G(1.6e(-3),20) L=12	G(6e(-4),20) G(1e(-3),20) L=11	G(6.4e(-4),20) G(1.4e(-3),20) L=11
Modèles de durée de vie (modèle de mélange $s = 2$)	W(2.5e5,12.2) W(3.1e5,8.2)	W(2.5e5,12.24) W(3.1e5,8.2)	W(2.2e5,12.1) W(2.7e5,8.2)	W(2.2e5,12.1) W(2.7e5,8.2)	W(3e5,15.1) W(3.5e5,9.9)	W(2.4e5,10.8) W(3.1e5,7.4)
Modèle de durée de vie ($s = 1$)	W(2.9e5,6.7)	W(2.9e5,6.7)	W(2.6e5,6.7)	W(2.6e5,6.7)	W(3.3e5,8.6)	W(2.9e5,5.6)
C_i (en €)	368	368	272	272	509	1106
D_i (en h)	1	1	1.5	1.5	3.7	1.8

Tableau 5.5: Propriétés des composants du système (W=Loi de Weibull, G=Processus Gamma, L=Limite de dégradation)

Le tableau 5.5 répertorie les propriétés des différents composants du système. Ce tableau contient pour chaque composant:

- Les processus utilisés pour modéliser la dégradation dans un environnement « normal » et « stressé »

- Les modèles de durée de vie obtenus en appliquant les modèles de mélange à la base de données simulée. En suivant la méthode définie dans la sous-partie 5.2.2, un mélange de deux sous-populations a été retenu pour chaque composant.
- Le modèle de durée de vie obtenu en appliquant un modèle unique pour représenter l'ensemble des données de pannes simulé. Dans ce cas, on suppose que l'ensemble des pannes provient d'une seule et même sous-population.
- Le coût C_i
- La durée D_i

5.3.4 Résultats et analyses

Pour illustrer l'impact de l'information de surveillance sur la politique de maintenance développée, nous allons comparer les différents cas considérés. En s'appuyant sur les hypothèses spécifiées, un modèle de maintenance, similaire au chapitre précédent, est utilisé pour évaluer les C_{TM} moyens sur un horizon de cinq ans. Le critère de décision J_1 est utilisé pour la politique de maintenance. Pour les différents cas, l'estimation des C_{TM} est réalisée pour des couples de paramètres MFOP/NC identiques. Pour la comparaison, nous prenons des MFOP entre 10 000km et 120 000km par pas de 10 000km et des niveaux de confiance allant de 60% à 99% par pas de 3%. Notons, également, que les coûts liés à la mise en place des différents cas de surveillance, comme le coût des capteurs ou des solutions technologiques, ne sont pas pris en compte. Il s'agit ici d'une étude prospective qui a vocation à étudier l'intérêt d'un développement d'une instrumentation dédiée et de procédures de recueil de données adaptées.

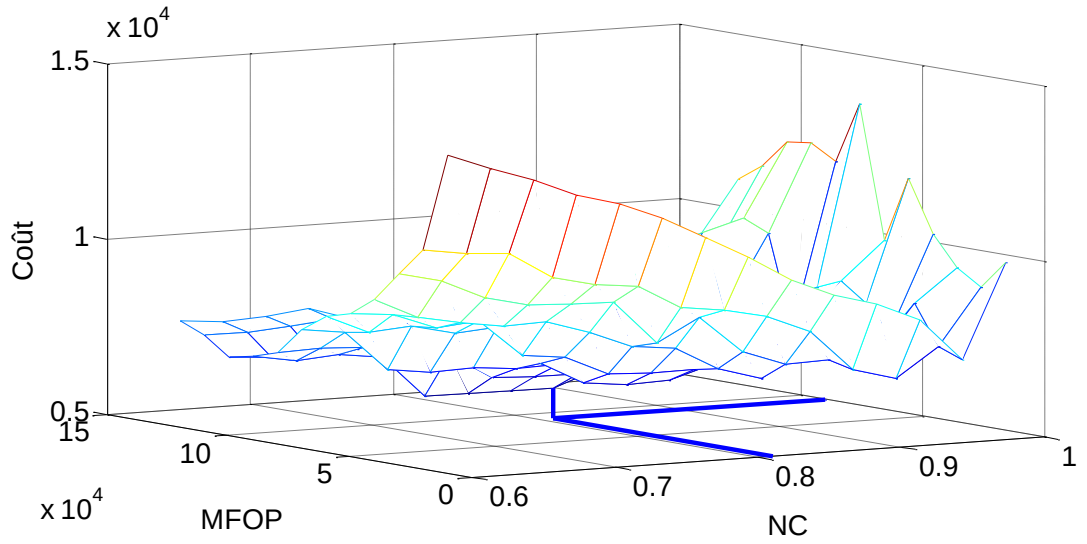

Figure 5.15 : Evolution du C_{TM} moyen en fonction des paramètres MFOP/NC considérés (Cas 1)

Premièrement, la figure 5.15 représente les C_{TM} pour les différents couples de paramètres (MFOP/NC) lorsque le premier cas de surveillance est considéré. Les résultats montrent que le C_{TM} moyen optimal est atteint pour une MFOP de 90 000 km et un niveau de confiance égal à 81%. Cette solution fournit le meilleur compromis économique entre les opérations de maintenance préventives et correctives. Ce premier résultat est utilisé comme base de comparaison. Dans certaines configurations, des paliers sont observables. Ces paliers définissent une augmentation puis une diminution des C_{TM} en lien avec l'augmentation de la valeur du niveau de confiance. Ce comportement signifie que jusqu'à un certain niveau de confiance, le coût additionnel généré par la maintenance préventive est plus important que les gains entrainés par la réduction de la maintenance corrective.

Le tableau 5.6 synthétise les résultats obtenus et permet de comparer les différents cas. Pour le deuxième cas de surveillance, la connaissance des conditions d'utilisation permet, à chaque décision de maintenance, de sélectionner le modèle de durée de vie adéquat pour l'ensemble des composants. La prise en compte de cette information de surveillance permet ainsi d'économiser plus de 5% sur le C_{TM} optimal relativement au premier cas de surveillance. Le gain moyen observé sur chaque couple de variables de décision est quant à lui de 14% en comparaison du premier cas. Pour le système considéré, la connaissance des conditions d'utilisation de chaque composant apparaît être plus impactant que l'information marche/panne pour réduire les coûts de maintenance.

Pour le troisième cas de surveillance, une mesure de dégradation et les conditions d'utilisation sont disponibles pour tous les composants à chaque décision de maintenance. De plus, les processus de dégradation pour l'environnement « normal » et « stressé » sont connus pour l'ensemble des composants. L'intégration de ces informations dans le processus de décision de maintenance fait économiser plus de 17% sur le C_{TM} optimal par rapport au premier cas de surveillance. Le gain moyen observé sur chaque couple de paramètres est quant à lui de 32% en comparaison du premier cas. Ces résultats montrent clairement sur le système considéré, l'impact de l'information de surveillance sur l'optimisation de la politique de maintenance.

Cas de surveillance	C_{TM} optimal	Gain observé sur le C_{TM} moyen optimal relativement au Cas 1 (%)	Gain moyen observé sur le C_{TM} pour chaque couple de paramètres considéré relativement au Cas 1 (%)
Cas 1	5866 € (MFOP=90000, NC=81%)	-	-
Cas 2	5539€ (MFOP=80000, NC=72%)	5.6%	14.2%
Cas 3	4824€ (MFOP=10000, NC=99%)	17.8%	31.9%

Tableau 5.6: Comparaison des différents cas de surveillance considérés

Pour ce dernier cas de surveillance, le C_{TM} optimal est obtenu pour une MFOP de 10 000 km et un niveau de confiance de 99%. En comparaison avec les autres couples optimaux pour les cas de surveillance 1 et 2, la MFOP est inférieure. Cette différence s'explique au niveau de l'évaluation de la $MFOPS$. Pour les cas de surveillance 1 et 2, cette évaluation est réalisée à partir des modèles de durée de vie définis par composant. Les résultats montrent, pour les premières valeurs de MFOP, que le C_{TM} est impacté soit par un nombre de pannes très significatif soit par un nombre de maintenances préventives très important. Cela signifie que la politique de maintenance pour les premières valeurs de MFOP ne permet pas de fournir une décision assez pertinente. Le coût optimal est ainsi plutôt obtenu pour des valeurs de MFOP plus importantes permettant d'offrir un meilleur compromis au niveau des coûts.

A l'inverse, pour le troisième cas de surveillance, l'évaluation de la $MFOPS$ est basée sur des processus de dégradation complétés par une mesure de dégradation. Ces informations permettent d'être beaucoup plus précis sur l'état réel du système. En conséquence, la décision de maintenance est beaucoup plus pertinente pour les premières valeurs de MFOP. Elles permettent notamment à la politique de se mettre à jour plus fréquemment en fonction de l'information de surveillance. Une MFOP de 10 000 km peut parfois être jugée trop faible par certains utilisateurs. Considérons alors qu'une contrainte nous impose une valeur de MFOP au moins supérieure à 60 000 km. Dans ce cas, le troisième cas de surveillance permet encore d'économiser environ 13% sur le C_{TM} optimal relativement au premier cas.

5.4 Conclusion

Dans le chapitre 4, nous avons développé une politique de maintenance dynamique capable de prendre en compte la structure du système multi-composant. Cette politique basée sur le concept de la MFOP permet de garantir avec un certain niveau de confiance, des périodes d'opérations sans limitation liée à la maintenance ou à la panne du système.

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur l'aspect dynamique de cette politique. Cette caractéristique associée à la politique développée permet d'adapter la décision de maintenance en ligne en fonction des informations disponibles de surveillance. Pour soutenir le processus de décision mis en place, des méthodes ont été développées pour intégrer les différents types d'informations de surveillance. Ces méthodes permettent de prendre en compte à chaque décision de maintenance le niveau d'information disponible sur l'état des composants et sur les conditions d'utilisations.

Les résultats des simulations sur un système multi-composant donné illustrent l'impact positif de l'information de surveillance sur l'optimisation de la politique de maintenance et sur la réduction des coûts.

Chapitre 6

Méthodologie de conception pour la maintenance

Les deux chapitres précédents ont été consacrés à la présentation de la politique de maintenance dynamique développée dans cette thèse. Premièrement, différents critères de décision ont été proposés ainsi qu'un modèle de coût permettant d'évaluer la politique de maintenance. Dans un second temps, nous nous sommes focalisés sur la prise en compte de l'information de surveillance pour adapter dynamiquement la prise de décision de maintenance.

Dans ce chapitre, notre objectif est de présenter une méthodologie de conception intégrant les problématiques liées à la maintenance. Le terme « conception » fait ici référence aux choix relatifs aux propriétés de fiabilité, aux niveaux d'informations de surveillance, à l'accessibilité des composants ou aux redondances éventuelles. Cette méthodologie vise à fournir un outil d'aide à la décision permettant de statuer entre les diverses propositions de conception afin de réduire les coûts d'exploitation du système.

Dans un premier temps, nous allons justifier l'intérêt de mettre en place une méthodologie de conception pour la maintenance. Nous effectuons ensuite un état des lieux sur l'utilisation de la MFOP pour la conception. En s'appuyant sur ces travaux et sur les limites observées, une méthodologie est développée. En lien avec celle-ci, un facteur d'importance est proposé afin de prioriser les actions de conception à réaliser. Enfin, un exemple numérique illustre la méthodologie sur un système multi-composant donné.

6.1 Maintenance et conception: le duo gagnant

D'une manière générale, le but du concepteur est de trouver le meilleur compromis entre l'amélioration de la performance du système, pour satisfaire le client, et la diminution des coûts de fabrication. Pour un système donné, l'amélioration des caractéristiques de fiabilité et de maintenabilité conduit inexorablement à augmenter ce coût. En conséquence, ces caractéristiques sont souvent sous-estimées, impactant de fait la maintenance et les coûts associés.

Néanmoins, aujourd'hui les clients ne se contentent plus uniquement des performances intrinsèques du système. Ils accordent une importance grandissante à sa durabilité et aux services associés (Jury & Sturdivant, 1995). Pour répondre aux attentes et aux besoins des clients, nous assistons à une évolution des entreprises qui fabriquent ces systèmes. Elles

passent de la vente de systèmes manufacturés à la vente de services (Keller, 2003). Dans ce cadre, elles proposent à leurs clients de payer non plus uniquement pour le système lui-même mais aussi pour son utilisation. A la charge de l'entreprise qui fabrique ce système de contrôler que celui-ci assure ses fonctions pendant une période de temps contractualisée.

Pour mettre en place ces nouvelles offres de service, un changement de paradigme est nécessaire lors de la conception. Il ne s'agit plus de minimiser uniquement les coûts de fabrication mais plutôt d'avoir une réflexion sur les coûts tout au long du cycle de vie du système. Cela implique notamment de repenser le positionnement des problématiques liées à la maintenance dès la conception.

Dans un premier temps, cette partie propose une description de la place actuelle de la maintenance et de sa nécessaire évolution pour une gestion optimale du système sur son cycle de vie. Nous analysons ensuite, comment la MFOP est utilisée dans la littérature pour répondre aux problématiques de conception.

6.1.1 Place de la maintenance: évolution

Bien que les recherches sur les problématiques de maintenance aient connues des avancées significatives pendant les dernières décennies, la maintenance garde encore une image négative. Elle est souvent associée uniquement aux défaillances rencontrées par le système. Si on considère maintenant le rôle de la maintenance dans une perspective de gestion du système durant son cycle de vie, cette image change radicalement (Takata et al., 2004). Le développement d'une maintenance efficace permet à l'entreprise qui propose le service de réaliser des profits et à ses clients de profiter d'un service de qualité. On passe ainsi d'une activité qui est perçue comme un centre de coût à une activité porteuse de profits.

Traditionnellement, le champ d'application de la maintenance se limite à la phase opérationnelle. Cette phase inclut l'élaboration du planning, le diagnostic et la réalisation des opérations de maintenance. En considérant la maintenance comme un service permettant de conserver les fonctions du système sur son cycle de vie, celle-ci ne doit plus être limitée à la phase opérationnelle. Il devient donc primordial d'intégrer les problématiques de maintenance le plus tôt possible dans le cycle de vie du système.

Dans ce cas, la croyance commune est de penser que les coûts d'investissement et le délai de conception augmentent. Markeset and Kumar (2001) contredisent cette idée reçue. Si la maintenance est prise en compte dès la conception du système, les itérations au niveau du design sont réduites car les problèmes sont pensés et résolus en amont. Les coûts et les travaux associés pour remédier aux défauts de conception sont ainsi d'autant moins importants qu'ils sont considérés tôt.

Le principe de « conception pour la maintenance » (cf. figure 6.1) permet de tenir compte des liens étroits existants entre maintenance et conception pour optimiser le coût global du

système sur son cycle de vie. Si dorénavant, l'entreprise souhaite vendre du temps d'utilisation, la place de la maintenance doit évoluer car elle apparaît comme l'outil essentiel permettant au système d'assurer ses fonctions sur son cycle de vie.

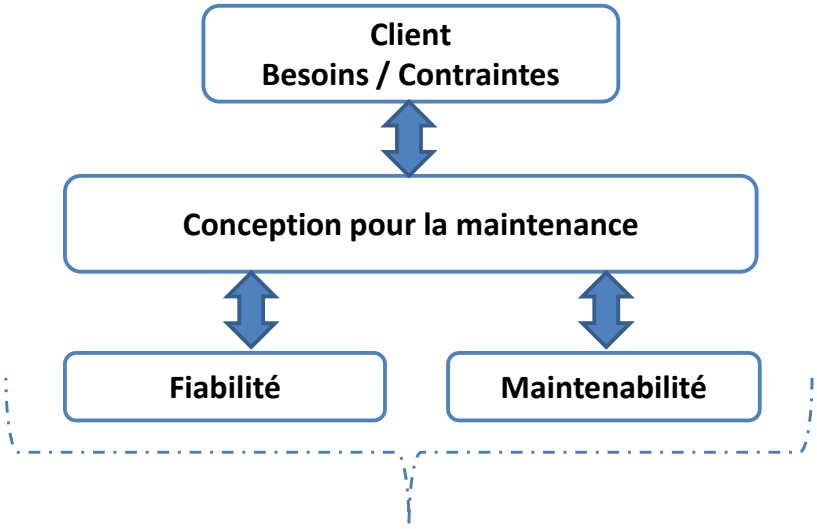

Figure 6.1: Conception pour la maintenance (Markeset & Kumar, 2001)

Pour diriger la conception en fonction des problématiques de maintenance, nous pouvons tout d'abord nous intéresser aux caractéristiques de fiabilité du système (Long et al., 2009). Il s'agit ici d'identifier les composants dont la fiabilité est considérée comme un point faible pour la maintenance du système. Pour identifier ces composants, une analyse intégrant la maintenance, la fiabilité du composant et son importance dans le système doit être menée. En s'appuyant sur cette analyse, des solutions de conception sont envisagées afin de substituer ou de remplacer les composants incriminés par des composants plus robustes et/ou moins variants.

En lien avec ces questions de fiabilité, une analyse de maintenabilité peut être envisagée. La maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir sa fonction. Cette analyse s'intéresse notamment à l'accessibilité des pièces devant être maintenues. Un travail au niveau de la conception peut ainsi être mené pour rendre certaines pièces plus accessibles. Un gain d'accessibilité permet de réduire la durée de remplacement de la pièce considérée et diminue ainsi le temps d'indisponibilité du système.

Actuellement dans le groupe Volvo, très peu de problématiques liées à la maintenance sont prises en compte dès la conception du véhicule. Uniquement les questions liées à l'accessibilité des composants sont aujourd'hui étudiées systématiquement. Les résultats obtenus au niveau des durées de remplacement sont très encourageants.

Toutes les solutions de conception proposées ci-dessus doivent être validées par une analyse des coûts sur le cycle de vie du système. Toute la difficulté est de trouver le meilleur compromis entre l'amélioration des caractéristiques de fiabilité et de maintenabilité du système et les gains obtenus sur les coûts d'exploitation. Les investissements réalisés peuvent notamment entrainer une amélioration de la disponibilité du système ou encore une diminution des coûts directs et indirects de maintenance.

6.1.2 MFOP et problématiques de conception

Dans les chapitres 4 et 5, nous avons présenté la politique de maintenance dynamique basée sur la MFOP développée dans le cadre de cette thèse. L'objectif étant à terme de garantir aux utilisateurs la disponibilité et l'autonomie de leur système sur des périodes d'opérations données (Cini & Griffith, 1999). Pour être capable de proposer de tels services, la façon dont les concepteurs considèrent les problématiques de maintenance doit fortement évoluer. L'objectif est de prendre en compte les exigences de la MFOP pour diriger la conception. Dans cette sous-partie, un état de l'art concernant l'utilisation de la MFOP pour guider la conception est réalisé. Il sert de base à la construction de la méthodologie de conception proposée dans la suite de ce chapitre.

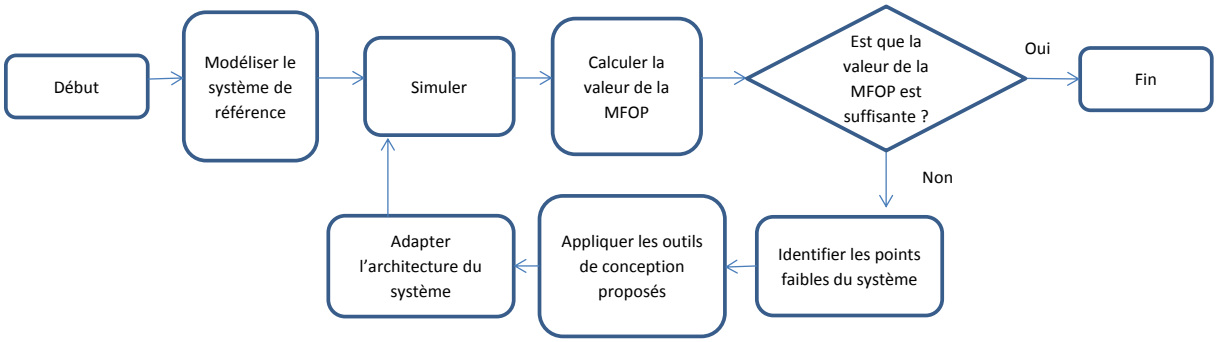

Figure 6.2: Méthodologie de conception proposée par Relf (1999)

Une première méthodologie de conception basée sur la MFOP a été proposée dans (Relf, 1999). Pour Relf, le défi à relever se trouve dans la méthodologie et les outils de conception nécessaires permettant de produire un système en phase avec les exigences de la MFOP. La méthodologie élaborée est présentée dans la figure 6.2. Il s'agit d'un processus itératif qui consiste à optimiser à chaque itération la valeur de la MFOP.

Dans une première étape, on va chercher à modéliser l'architecture du système étudié en reliant ses fonctionnalités et ses composants. Des modèles de fiabilité sont ensuite associés à chaque composant. En utilisant la simulation de Monte Carlo et en ajoutant des pannes générées aléatoirement, une estimation de la valeur de la MFOP est obtenue pour le système considéré. Cette valeur correspond à la durée maximale pendant laquelle le système peut être utilisé sans avoir à effectuer de maintenance. Si cette valeur n'est pas

conforme aux spécifications du concepteur, il est nécessaire d'agir sur les points faibles du système.

Pour mettre en évidence ces points faibles, une analyse du chemin critique est utilisée. A partir de cette analyse, l'objectif est d'agir sur les points faibles du système afin d'optimiser la valeur de la MFOP. Dans son article, Relf (1999) mentionne que les exigences de la MFOP ne peuvent pas être traitées par un outil de conception unique. Il va ainsi répertorier une combinaison d'approches et de techniques pour offrir au concepteur les outils appropriés. Parmi les outils proposés, on peut citer:

- L'amélioration des caractéristiques de fiabilité des composants,
- L'amélioration du diagnostic et du pronostic,
- La possibilité d'ajouter des redondances dans le système,
- La possibilité pour le système de se reconfigurer suite à la panne d'un composant.

Le processus s'arrête quand la valeur de la MFOP répond aux exigences du concepteur. La méthodologie développée dans (Relf, 1999) doit être vue comme un support pour les décisions d'ingénierie. Elle doit être utilisée uniquement pour sélectionner les outils les plus appropriés afin d'augmenter la longueur de la MFOP. En termes de limites, cette méthodologie n'évalue pas les impacts économiques engendrés par la mise en place des différents outils. De plus, elle ne prend pas en compte la politique de maintenance appliquée au système. Ainsi, pour concevoir un système, une vision plus globale semble primordiale.

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 4, Long et al. (2009) proposent une politique de maintenance statique basée sur le concept de la MFOP. L'optimisation de cette politique s'appuie sur une minimisation des coûts d'exploitation sur le cycle de vie du système. Ces coûts se décomposent en considérant les coûts initiaux relatifs à l'achat des différents éléments du système ainsi que les coûts engendrés par la maintenance. A noter que ces différentes mesures de coûts avaient été identifiées par Brown et Hockley (2001) comme des mesures clés pour la mise en place du concept de la MFOP. En s'appuyant sur la politique de maintenance développée, Long et al. (2009) évoquent l'utilisation de la MFOP dans une perspective de conception. Leur méthodologie consiste à modifier les caractéristiques de fiabilité du système mono-composant, à appliquer la politique de maintenance développée et à constater les répercutions occasionnées au niveau du coût d'exploitation.

Contrairement à la méthodologie développée dans (Relf, 1999), celle-ci permet d'évaluer l'outil de conception utilisé en analysant son impact sur les coûts d'exploitation. Autre point positif, la politique de maintenance appliquée au système est intégrée à la méthodologie de conception. Néanmoins, plusieurs limites peuvent être observées. Premièrement, elle se concentre sur un système mono-composant. Ce choix permet de simplifier les décisions relatives à la conception du système puisque le choix d'agir sur ce composant unique va s'imposer. Ce choix est à l'inverse très limitant du point de vue applicatif. Deuxièmement, on

se focalise uniquement sur les problématiques liées à la fiabilité du système pour améliorer la conception. Même si cet outil est le plus souvent pertinent, il ne suffit pas à lui seul à répondre aux exigences liées à la MFOP. Les problématiques relatives à la maintenabilité, à l'architecture de surveillance ou encore aux redondances doivent nécessairement être abordées.

6.2 Présentation de la méthodologie développée

En s'appuyant sur les résultats de l'état de l'art réalisé précédemment, cette partie présente la méthodologie de conception pour la maintenance élaborée dans cette thèse. Celle-ci vise à optimiser la conception d'un système multi-composant dans une perspective MFOP afin de réduire ses coûts d'exploitation. Dans un premier temps, nous détaillons les grandes étapes de cette méthodologie. Nous nous focalisons ensuite sur les différents outils à notre disposition pour améliorer la conception du système de référence.

6.2.1 Description générale

De façon similaire aux travaux proposés par Relf (1999), la méthodologie développée doit être vue comme un processus itératif permettant d'optimiser la conception du système à chaque itération. Toujours dans le souci de réduire les coûts d'exploitation, cette méthodologie intègre la politique de maintenance appliquée au système. Comme nous l'avons décrit en première partie, il s'agit de repositionner les problématiques de maintenance dès les premières phases du cycle de vie du système. La figure 6.3 illustre les différentes étapes de la méthodologie proposée.

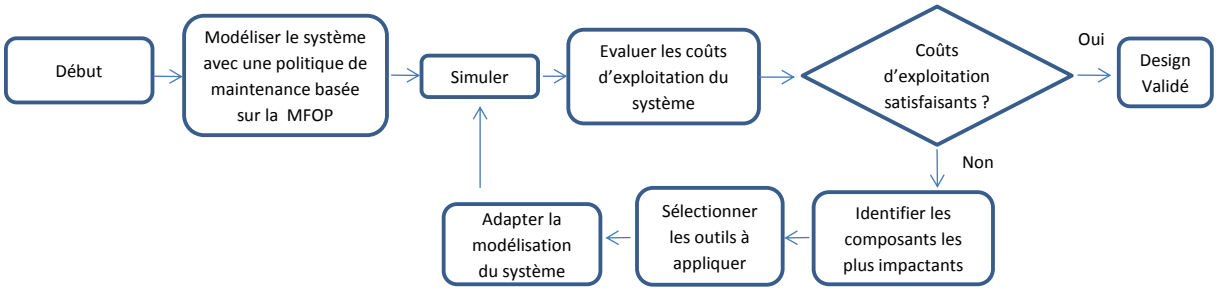

Figure 6.3: Méthodologie de conception pour la maintenance

Modélisation du système

Dans une première étape, l'objectif est de construire un modèle de maintenance pour le système considéré. Pour ce faire, nous devons tout d'abord modéliser la structure du système de référence en définissant les relations entre les différents composants. Un modèle de fiabilité est ensuite associé à chaque composant. Celui-ci correspond à un modèle de survie ou de dégradation suivant les données disponibles. Enfin, la politique de

maintenance appliquée à ce système doit être modélisée. Ce choix conduit à placer la maintenance au centre de la problématique de conception. Dans ce manuscrit, c'est la politique de maintenance dynamique basée sur la MFOP qui est retenue.

Evaluation des coûts d'exploitation

Une phase de simulation basée sur la méthode de Monte Carlo est ensuite nécessaire pour évaluer les coûts d'exploitation du système. Cette évaluation a pour but de réaliser des arbitrages entre les diverses propositions de conception. Dans le contexte de cette thèse, ces coûts sont évalués sur un cycle de vie fixé à 5 ans. Comme nous avons pu le voir précédemment, les constructeurs souhaitent proposer à leurs clients des contrats de service liés à l'utilisation de leur système. Ces contrats engagent donc le constructeur à assurer le fonctionnement du système pendant une période de temps définie. Pour le groupe Volvo, la durée de ces contrats est actuellement fixée à 5 ans. Notre objectif est ainsi de concevoir un système permettant de minimiser les coûts d'exploitation sur cette période.

Intéressons-nous maintenant à la manière dont ces coûts d'exploitation sont évalués. Pour un système donné, les coûts d'exploitation C_{Ex} sont définis par:

$$C_{Ex}(t) = C_I + C_{TM}(t) \tag{6.1}$$

avec C_I les coûts initiaux du système et $C_{TM}(t)$ le coût total de maintenance du système sur un intervalle de temps [0, t]. Pour le coût total de maintenance $C_{TM}(t)$, son expression est similaire à celle donnée dans le chapitre 4 (cf. expression 4.3). Les coûts initiaux du système, quant à eux, correspondent à:

$$C_I = \sum_{i=1}^{n} C_i + C_{NI,i} \tag{6.2}$$

avec n le nombre de composants dans le système, C_i le coût du composant i et $C_{NI,i}$ le coût lié au niveau d'information disponible sur le composant i. En effet, pour améliorer l'information sur un composant i donné, une architecture de surveillance plus perfectionnée peut être considérée. Ce choix conduit, par exemple, à ajouter des capteurs pour avoir accès à son état de fonctionnement ou si possible à son niveau de dégradation. Les surcoûts liés à la mise en place d'une surveillance améliorée sur certains composants vont impacter les coûts initiaux du système par l'intermédiaire du $C_{NI,i}$.

Identification des composants les plus impactants

La conception du système est validée en fonction de la valeur des coûts d'exploitation obtenus. Dans le cas où les coûts d'exploitation ne sont pas satisfaisants pour le concepteur, il va s'agir d'identifier les points faibles du système. Les points faibles désignent ici les

composants qui impactent le plus les coûts d'exploitation. Dans cette méthodologie, un facteur d'importance est construit pour identifier et hiérarchiser l'impact des différents composants sur les coûts d'exploitation. Les résultats obtenus permettent d'orienter le concepteur en priorisant les actions de conception à réaliser. Les détails de ce facteur d'importance sont proposés dans la partie suivante.

Sélection des outils à appliquer

Une fois les points faibles identifiés, la dernière étape consiste à proposer des solutions de conception pour diminuer leurs impacts sur les coûts d'exploitation. De manière similaire à Relf (1999), nous allons proposer différents outils capables d'offrir des solutions en matière de conception. Le choix entre ces outils est validé en évaluant la diminution des coûts d'exploitation. Les différents outils proposés sont répertoriés dans la sous-partie suivante.

6.2.2 Une boite à outils pour la conception

La conception d'un système multi-composant est un processus complexe qui dépend d'une multitude de facteurs. Dans ce contexte, il est illusoire de penser que la réponse aux problématiques de conception pour la maintenance se trouve dans un outil unique. Comme Relf (1999) le défend dans son article, la méthodologie proposée doit au contraire s'appuyer sur une combinaison d'outils et de techniques. Il va s'agir pour le concepteur de réaliser des arbitrages entre les différents outils disponibles afin de réduire les coûts d'exploitation du système.

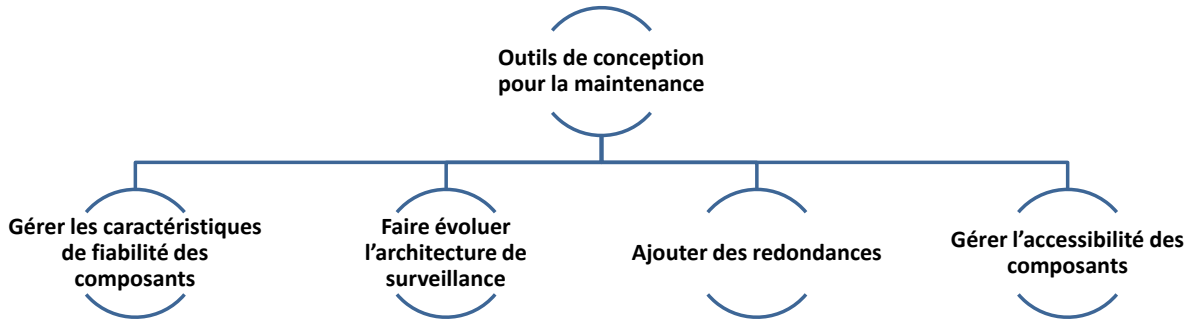

Figure 6.4 : Boite à outils de conception pour la maintenance

Les différents outils proposés dans ce manuscrit sont répertoriés à la figure 6.4. Le choix entre ces outils est potentiellement la partie la plus complexe. Pour le concepteur, le premier défi est d'évaluer la viabilité technique de ces différents outils suivant le composant concerné. Il peut, par exemple, être impossible d'installer un capteur sur un composant donné ou bien encore de le rendre plus accessible dans le système. En fonction des résultats de cette analyse technique, le nombre d'outils à la disposition du concepteur peut se réduire. Si plusieurs solutions subsistent, il va s'agir d'intégrer ces différents outils dans le modèle de maintenance initial pour évaluer leurs impacts sur les coûts d'exploitation.

Gérer les caractéristiques de fiabilité des composants

Cet outil se focalise sur la fiabilité de base associée aux composants identifiés comme les points faibles du système. Il va ainsi être recommandé d'améliorer cette fiabilité en travaillant sur les spécifications de ces composants ou bien encore sur le choix des fournisseurs. Cela conduit, par exemple, à augmenter la durée de vie moyenne de ce composant ou bien encore à réduire sa variabilité. Au niveau des coûts d'exploitation, l'amélioration des caractéristiques de fiabilité entraine une augmentation du coût initial pour ce composant. En contrepartie, on peut espérer des gains au niveau du nombre de remplacements mais également au niveau du nombre d'arrêts non planifiés.

Faire évoluer l'architecture de surveillance

Cet outil se concentre sur le niveau d'information de surveillance disponible pour un composant donné. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, un niveau d'information plus élevé permet d'améliorer notre connaissance sur l'état de santé courant d'un composant. Il s'agit ensuite d'utiliser cette connaissance pour optimiser la prise de décision de maintenance.

En pratique, nous allons faire l'hypothèse que l'information de surveillance que ce soit l'état de fonctionnement du composant ou sa dégradation s'obtient en ajoutant un capteur à l'architecture de surveillance existante. En conséquence, les coûts initiaux du composant concerné sont augmentés. A l'inverse, l'information nouvellement disponible entraine des décisions de maintenance au plus près de l'état réel du composant. On évite ainsi de surmaintenir le composant concerné et on peut également espérer une baisse du nombre d'arrêts non planifiés. Précisons néanmoins que cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée. Des travaux sur les techniques de surveillance visent, dans certaines conditions, à ne pas ajouter de capteurs mais à se servir des redondances analytiques présentes dans le système pour retrouver certaines informations (Patton et al., 2000) (Iserman, 2006).

Ajouter des redondances

La redondance consiste, pour un composant donné, à le faire fonctionner avec un ou plusieurs composants identiques en parallèle. On va donc ajouter des composants dans le système en plus du nombre minimal nécessaire à son fonctionnement. La mise en place de redondances peut permettre d'augmenter la fiabilité globale du système en réduisant les dysfonctionnements. Evidemment, cela a un coût et il faut trouver un compromis entre le coût des redondances et le gain de fiabilité qu'elles entrainent.

Gérer l'accessibilité des composants

Lorsque l'on conçoit la structure du système multi-composant, on peut veiller à rendre un composant plus accessible. Le gain d'accessibilité obtenu permet de réduire sa durée de remplacement. Cela a pour conséquence de diminuer le coût de la main d'œuvre associée au

remplacement et de réduire le temps d'indisponibilité du système. En contrepartie, les diverses études de conception menées pour rendre un composant plus accessible conduisent à augmenter le coût de la pièce. On peut également considérer qu'une contrainte d'accessibilité augmente le coût initial du système.

6.3 Priorisation des actions de conception

Dans la méthodologie proposée à la figure 6.3, une étape vise à identifier les points faibles, c'est-à-dire les composants les plus impactants sur les coûts d'exploitation C_{Ex}. Pour ce faire, un facteur d'importance basé sur le coût est introduit. Son objectif est d'aider le concepteur à hiérarchiser les actions de conception à réaliser sur le système. Dans cette partie, nous commençons par un état des lieux sur la prise en compte des coûts de maintenance dans les facteurs d'importance. Nous détaillons ensuite le facteur d'importance développé dans ce manuscrit.

6.3.1 Facteurs d'importance fiabilistes et coût de maintenance

Les facteurs d'importance fiabilistes sont des outils d'aide à la décision polyvalents qui sont utilisés pour hiérarchiser les composants d'un système. Ils peuvent intervenir dans des exemples d'application variés tels que l'aide à la conception, l'optimisation de la maintenance, la gestion de configuration, la définition des composants devant faire l'objet d'assurance qualité ou encore l'optimisation des périodicités de test (Duflot, 2007). Ils ont été étudiés par de nombreux auteurs (Birnbaum, 1969) (Barlow & Proschan, 1975) (Fussell, 1975). Parmi les facteurs d'importance les plus connus, on peut citer (Rausand & Høyland, 2004) (van der Borst & Schoonakker, 2001):

- Facteur d'importance marginal,
- Facteur d'augmentation du risque (Risk Achievement Worth),
- Facteur de diminution du risque (Risk Reduction Worth),
- Facteur d'importance critique (Critically Importance),
- Facteur d'importance de Fussell-Vesely.

En s'appuyant sur ces différents indicateurs, Rausand et Hoyland (2004) concluent que l'importance d'un composant dépend de trois critères:

- l'emplacement du composant dans le système,
- la fiabilité du composant,
- l'incertitude liée à l'estimation de la fiabilité du composant.

Dans leur article, Wu et Coolen (2013) pointent le besoin de compléter cette vision. Ils argumentent que l'importance d'un composant doit, en addition de ces critères, dépendre

de ces coûts d'entretien sur un intervalle de temps donné [0, t]. Les facteurs d'importance existants font très peu référence à ce genre de considérations. Pour un système donné, Wu et Coolen (2013) considèrent que les conséquences liées à l'amélioration de la fiabilité d'un composant, sur un intervalle de temps [0, t], se divisent en trois postes de coûts distincts:

- Coût 1: Les coûts liés à l'amélioration de la fiabilité du composant.
  Dans un système, les coûts liés à l'amélioration des caractéristiques de fiabilité sont différents selon les composants considérés, même si le niveau d'amélioration est identique.

- Coût 2: Les coûts liés à la défaillance du composant.
  Si un composant est en panne, celui-ci doit être remplacé. Les coûts engendrés par ce remplacement diffèrent suivant les composants considérés dans le système.

- Coût 3: Les coûts liés à la défaillance du système.
  Si le système est en panne, celui-ci va engendrer des coûts directs liés aux remplacements des composants incriminés, mais également des coûts indirects liés à son indisponibilité.

Dans ce cadre, Wu et Coolen (2013) proposent un facteur d'importance qui prend en compte les coûts engendrés par la maintenance du système et de ses composants sur un intervalle de temps fini. La nouveauté de ce facteur d'importance est de prendre en considération les coûts liés à la défaillance du composant et à la défaillance du système.

6.3.2 Un facteur d'importance basé sur les coûts

En s'appuyant sur les développements réalisés par Wu et Coolen (2013), un facteur d'importance basé sur les coûts, noté $I_a(t)$, est proposé. Celui-ci propose, en plus des coûts liés à la défaillance du composant et à la défaillance du système, de prendre en compte les coûts initiaux du composant. Pour un composant a donné, ce facteur d'importance peut être interprété comme le ratio des coûts d'exploitation engendrés par le composant a sur l'ensemble des coûts. Son expression est donnée par:

$$I_a(t) = \frac{C_{I,a} + C_{TM,a}(t)}{C_{Ex}(t)} \tag{6.3}$$

avec $C_{I,a}$ le coût initial du composant a, $C_{TM,a}(t)$ le coût de la maintenance du composant a sur l'intervalle de temps $[0, t]$ et $C_{Ex}(t)$ le coût d'exploitation total du système sur l'intervalle de temps [0, t]. Détaillons maintenant les différents coûts qui composent cette expression.

Le $C_{I,a}$ s'exprime de la façon suivante:

$$C_{I,a} = C_a + C_{NI,a} \tag{6.4}$$

avec C_a le coût du composant a (coût de la pièce) et $C_{NI,a}$ le coût lié au niveau d'information disponible sur le composant a. Ensuite $C_{TM,a}(t)$ se décompose ainsi:

$$C_{TM,a}(t) = C_{R,a}(t) + C_{SC,a}(t) + C_{SD,a}(t) \tag{6.5}$$

avec $C_{R,a}(t)$ le coût associé aux remplacements du composant a, $C_{SC,a}(t)$ le surcoût correctif pour le système lié à la panne du composant a et enfin $C_{SD,a}(t)$ le coût lié au diagnostic du composant a. A noter que ces différentes grandeurs sont évaluées sur l'intervalle de temps [0, t]. Pour le $C_{Ex}(t)$, on se réfère à l'expression 6.1 de ce chapitre. Focalisons-nous maintenant sur la façon d'évaluer les grandeurs associées au $C_{TM,a}(t)$. Le $C_{R,a}(t)$ correspond à:

$$C_{R,a}(t) = \sum_{k=1}^{N_{AM}(t)} \left[\left(\delta_{a,k} \times (C_a + D_a \times \tau_{MO}) \right) + \frac{C_{Log} * \delta_{a,k}}{N_{M_k}} \right] \tag{6.6}$$

avec $N_{AM}(t)$ le nombre d'arrêts de maintenance sur l'intervalle de temps [0, t], $\delta_{a,k}$ un booléen qui vaut 1 si le composant a est remplacé pendant l'arrêt de maintenance k, 0 sinon, D_a la durée de remplacement du composant a, τ_{MO} le taux horaire de la main d'œuvre, C_{Log} le coût logistique lié à l'entrée du système en atelier de maintenance, M_k l'ensemble des composants remplacés pendant l'arrêt de maintenance k, N_{M_k} le nombre de composants dans l'ensemble M_k.

Ensuite, pour évaluer $C_{SC,a}(t)$, nous allons considérer que le surcoût correctif lié à la panne l du système doit se répartir uniquement sur les composants responsables de cette panne. Pour identifier ces composants, la notion de « coupe minimale » est introduite.

Définition 17 *Une coupe décrit un ensemble de composants de base dont la défaillance entraine la défaillance du système. Une coupe est dite minimale si en retirant n'importe quel bloc de la liste, le système n'est plus défaillant* (Villemeur, 1988).

Notons que la taille (ou l'ordre) de la coupe est le nombre d'éléments dans la liste. La connaissance des coupes minimales permet d'établir qualitativement la liste des composants critiques d'après l'organisation fonctionnelle du système. En s'appuyant sur cette notion, le $C_{SC,a}(t)$ se définit de la manière suivante:

$$C_{SC,a}(t) = \sum_{l=1}^{N_P(t)} \frac{C_{SC}^{l}}{N_{CM_l}} * \delta_{a \in CM_l} \tag{6.7}$$

$$\text{avec} \quad C_{SC}^{l} = \left(\sum_{i=1}^{n} \delta_{i,l} \times (D_i \times \tau_I) \right) + C_{Remor} + \left(\left(D_{Remor} + D_{Log} \right) \times \tau_I \right) \tag{6.8}$$

avec $N_P(t)$ le nombre de pannes du système sur l'intervalle de temps $[0, t]$, C_{SC}^{l} le surcoût correctif lié à la panne l du système, CM_l la coupe minimale responsable de la panne l du système, N_{CM_l} le nombre de composants dans la coupe minimale, $\delta_{a \in CM_l}$ un booléen qui vaut 1 si le composant a appartient à la coupe minimale CM_l, 0 sinon, $\delta_{i,l}$ un booléen qui vaut 1 si le composant i est remplacé pendant l'arrêt de maintenance correctif l, 0 sinon, τ_I le coût de la perte d'exploitation par heure d'immobilisation, C_{Remor} le coût de remorquage du système, D_{Remor} la durée de remorquage du système et enfin D_{Log} la durée logistique de prise en charge du système à son entrée en atelier. Enfin, le coût lié au diagnostic du composant a est donné par:

$$C_{SD,a}(t) = \sum_{l=1}^{N_P(t)} \left[(C_{UD} + D_{UD} \times \tau_I) \times \delta_{a \in SIF} \right] \tag{6.9}$$

avec C_{UD} le coût unitaire de diagnostic pour un composant (coût supposé fixe), D_{UD} la durée unitaire de diagnostic pour un composant (durée supposée fixe) et enfin $\delta_{a \in SIF}$ une variable binaire qui vaut 1 si l'information de fonctionnement n'est pas disponible pour le composant a.

6.4 Illustration

Dans la dernière partie de ce chapitre, une illustration sur un système multi-composant est proposée afin de mettre en œuvre la méthodologie de conception développée. Nous commençons par présenter le système de référence et les coûts associés. Nous définissons ensuite les paramètres optimaux de la politique de maintenance en fonction des contraintes utilisateurs afin d'établir les premiers résultats. Nous appliquons enfin la méthodologie élaborée pour effectuer des recommandations de conception.

6.4.1 Définition du système de référence

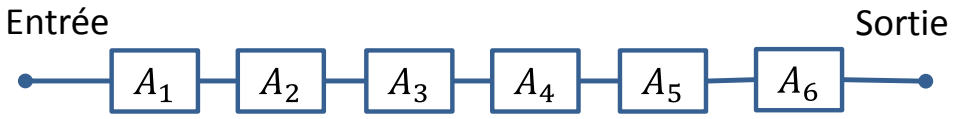

Figure 6.5: Structure du système multi-composant de référence

La structure du système multi-composant de référence est présentée à la figure 6.5. Nous choisissons ici de prendre un système série afin de pouvoir illustrer et justifier facilement les résultats obtenus par la méthodologie proposée. Dans un premier temps, nous allons détailler les coûts associés à ce système. Ainsi, le taux horaire de la main d'œuvre est fixé à $\tau_{MO} = 90€$ et le coût de la perte d'exploitation par heure d'immobilisation à $\tau_I = 100€$. Pour le remorquage, le coût et la durée considérés sont respectivement de $C_{Remor} = 1500€$ et $D_{Remor} = 5\text{h}$. Ensuite, le coût logistique lié à l'entrée du système en atelier de maintenance est de $C_{Log} = 100€$ pour une durée fixée à $D_{Log} = 30\ \text{min}$. Enfin, le coût et la durée unitaire de diagnostic sont respectivement de $C_{UD} = 20€$ et $D_{UD} = 5\ \text{min}$.

Intéressons-nous maintenant, aux différentes propriétés de ce système. Son kilométrage annuel est fixé à 100 000km. On suppose également que les opérations de maintenance sont indépendantes les unes des autres. Au niveau de l'information de surveillance, nous supposons que l'état de fonctionnement du système est connu. Cette hypothèse est réaliste si nous considérons que la panne du système entraine systématiquement une immobilisation. A l'inverse, nous considérons n'avoir aucune information sur l'état des composants. En conséquence, les $C_{NI,i}$ sont nuls. Notons enfin, que les coupes minimales sont au nombre de six. Elles sont toutes d'ordre 1 et contiennent chacune un composant différent du système de référence. Le tableau 6.1 synthétise les caractéristiques de fiabilité, les coûts et les durées de remplacement pour les composants du système étudié.

	$\mathbf{A_1}$	$\mathbf{A_2}$	$\mathbf{A_3}$	$\mathbf{A_4}$	$\mathbf{A_5}$	$\mathbf{A_6}$
Modèle de Fiabilité	W(3.5e5,2)	W(3.5e5,7)	W(4e5,3)	W(4.5e5,7)	G(1.1e-4,1.5) L = 20	G(8e-5,1.5) L = 20
$\boldsymbol{C_i}$ **(en €)**	500	500	500	500	500	500
$\boldsymbol{C_{NI,i}}$ **(en €)**	0	0	0	0	0	0
$\boldsymbol{D_i}$ **(en h)**	1	1	1	1	1	1

Tableau 6.1: Propriétés des composants du système (W=Loi de Weibull, G=Processus Gamma, L=Limite de dégradation)

6.4.2 Résultats initiaux

Dans le cadre de la méthodologie élaborée, la première étape consiste à construire le modèle de maintenance utilisé pour la simulation. Au-delà des caractéristiques de fiabilité définies dans la sous-partie précédente, la politique de maintenance appliquée au système doit être définie. Nous choisissons d'utiliser la politique basée sur le concept de la MFOP présentée au chapitre 4. Pour cette politique, le critère de décision J_1 est sélectionné.

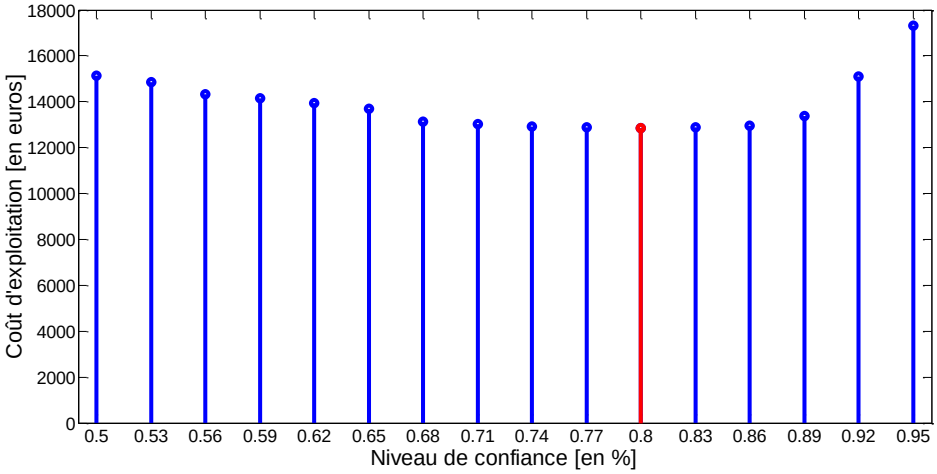

Figure 6.6: Coûts d'exploitation du système pour différents niveaux de confiance

En s'appuyant sur ce cadre général, l'objectif est de trouver les paramètres optimaux pour la MFOP et le niveau de confiance NC afin de minimiser les coûts d'exploitation initiaux. Pour cette illustration, nous considérons que les contraintes clients nous imposent une MFOP de 50 000km. L'optimisation se concentre donc uniquement sur le NC. Un modèle de maintenance a été développé sous Matlab afin de pouvoir évaluer les C_{Ex} sur un horizon de 5 ans. Pour garantir la convergence de l'estimation des C_{Ex}, 1000 histoires sont simulées. La figure 6.6 présente les résultats pour des NC allant de 50% à 95% par pas de 3%. Le coût d'exploitation optimal $C_{Ex} = 12843€$ est obtenu pour un $NC = 80\%$.

$C_{Ex} = 12843€$	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
$C_{I,a}$ (en €)	500	500	500	500	500	500
$C_{R,a}$ (en €)	1975	773	1309	683	1304	659
$C_{SC,a}$ (en €)	1263	404	616	283	225	121
$C_{SD,a}$ (en €)	38	38	38	38	38	38
I_a (en %)	29	13	19	12	16	10

Tableau 6.2: Facteurs d'importance pour le système de référence (MFOP=50000; NC=80)

Après avoir estimé le coût d'exploitation du système pour une politique de maintenance donnée, l'étape suivante consiste à identifier les composants les plus impactants. Pour ce

faire, la méthodologie développée prône l'utilisation du facteur d'importance I_a. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.2. Ces résultats nous permettent de hiérarchiser l'impact des différents composants sur les coûts d'exploitation du système. Nous avons ainsi:

$$I_1 > I_3 > I_5 > I_2 > I_4 > I_6$$

Dans ce cadre, les actions de conception doivent se focaliser en priorité sur le composant A_1.

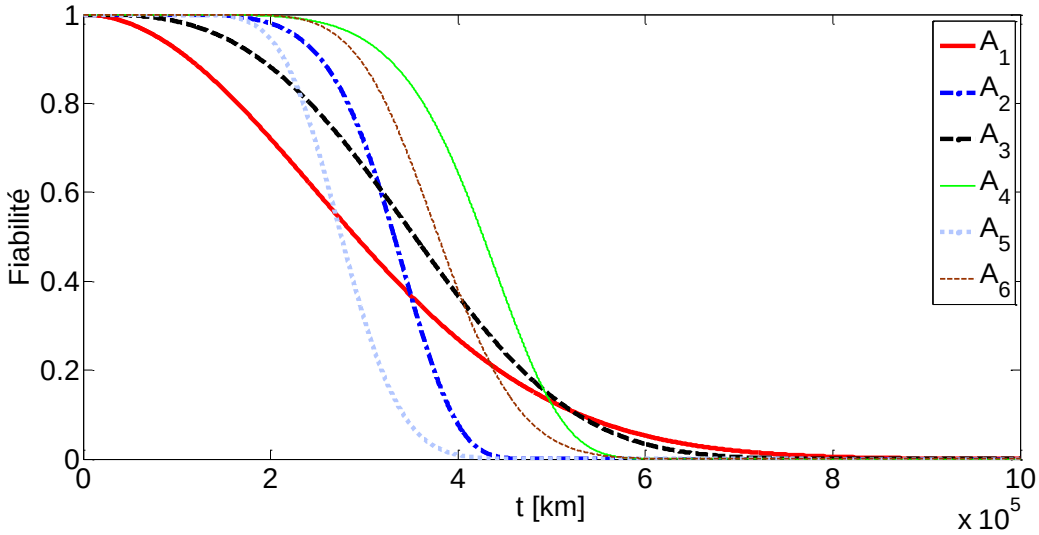

Figure 6.7: Modèles de fiabilité des composants du système

Ces résultats semblent cohérents au regard des propriétés des composants. Comme le coût et la durée de remplacement sont identiques, la distinction se fait au niveau des caractéristiques de fiabilité. La figure 6.7 regroupe les différents modèles de fiabilité associés aux composants du système. Le facteur d'importance distingue logiquement les composants A_1 et A_3. Comparativement aux autres composants, ils possèdent une variance très importante qui rend difficile la prise de décision de maintenance. Ils vont ainsi impacter le coût d'exploitation du système par le nombre de remplacements préventifs réalisés et par le nombre d'immobilisations qui en résulte.

6.4.3 Recommandations pour la conception

Les premières étapes de la méthodologie ont permis d'évaluer le C_{Ex} moyennant une politique de maintenance donnée et d'identifier les points faibles du système. Le composant A_1 a ainsi été désigné comme le composant prioritaire pour les actions de conception. Celui-ci contribue à hauteur de 29% aux coûts d'exploitation du système.

Gérer les caractéristiques de fiabilité des composants

Pour réduire l'impact de ce composant sur les coûts d'exploitation, une première solution est de travailler sur ses caractéristiques de fiabilité. A titre d'illustration, nous considérons

que de nouveaux composants capables de se substituer au composant A_1 sont disponibles sur le marché.

Nous supposons que ces nouveaux composants se décomposent en deux groupes. Le premier groupe permet d'améliorer le MTTF du composant initial de 10 à 50% suivant les cas considérés. Pour ces composants, la variance reste inchangée. En contrepartie, nous faisons l'hypothèse qu'une augmentation de x% du MTTF entraine une augmentation de x% du coût de la pièce. Le tableau 6.3 synthétise les caractéristiques des composants appartenant à ce premier groupe.

	Modèle de fiabilité	MTTF (en km)	Variance	A_1 (en €)
Conception initiale	W(3.5e5,2)	310179	2.62e10	500
Conception 1	W(3.9e5,2.2)	341194 (+10%)	2.62e10	550 (+10%)
Conception 2	W(4.2e5,2.5)	372213 (+20%)	2.62e10	600 (+20%)
Conception 3	W(4.5e5,2.7)	403233 (+30%)	2.62e10	650 (+30%)
Conception 4	W(4.9e5,2.9)	434250 (+40%)	2.62e10	700 (+40%)
Conception 5	W(5.2e5,3.1)	465266 (+50%)	2.62e10	750 (+50%)

Tableau 6.3: Caractéristiques des composants appartenant au premier groupe

Pour chaque proposition de conception, il s'agit d'adapter le modèle de maintenance initial afin d'évaluer l'impact sur le coût d'exploitation du système. Les résultats sont présentés à la figure 6.8. Parmi les différentes propositions de conception, le meilleur résultat est obtenu par la Conception 4. En considérant que les autres propriétés du modèle de maintenance restent stables, la substitution du composant A_1 initial par la Conception 4 permet d'obtenir une diminution de l'ordre de 9% des coûts d'exploitation.

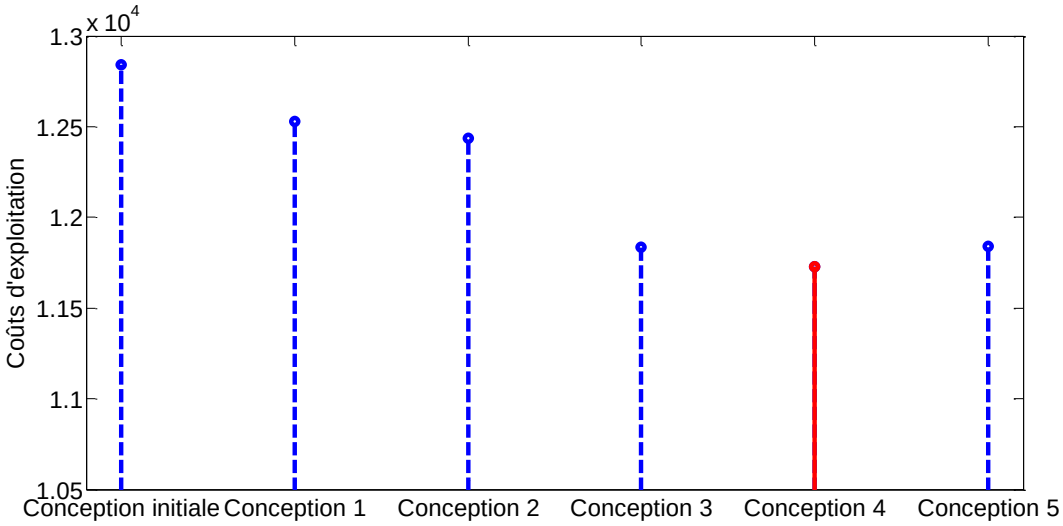

Figure 6.8: Coûts d'exploitation du système pour différentes propositions de conception

Le second groupe permet de diminuer la variance du composant initial de 10% à 50% suivant les cas considérés. Pour ces composants, le MTTF reste inchangé. En contrepartie, nous supposons qu'une diminution de x% de la variance entraine une augmentation de x% du coût de la pièce. Le tableau 6.4 synthétise les caractéristiques des composants appartenant à ce second groupe.

	Modèle de fiabilité	MTTF (en km)	Variance	A_1 (en €)
Conception initiale	W(3.5e5,2)	310179	2.62e10	500
Conception 6	W(3.5e5,2.1)	310179	2.37e10 (-10%)	550 (+10%)
Conception 7	W(3.5e5,2.3)	310179	2.1e10 (-20%)	600 (+20%)
Conception 8	W(3.5e5,2.4)	310179	1.84e10 (-30%)	650 (+30%)
Conception 9	W(3.5e5,2.7)	310179	1.58e10 (-40%)	700 (+40%)
Conception 10	W(3.5e5,2.9)	310179	1.31e10 (-50%)	750 (+50%)

Tableau 6.4: Caractéristiques des composants appartenant au second groupe

De manière similaire aux composants du premier groupe, le modèle de maintenance initial doit être adapté à chaque proposition de conception. Les résultats, présentés à la figure 6.9, illustrent leurs impacts sur le coût d'exploitation du système. Parmi les différentes propositions de conception, le meilleur résultat est obtenu par la Conception 6. Notons néanmoins, que la diminution, de l'ordre de 1%, du coût d'exploitation est beaucoup plus faible que pour la Conception 4. Ce résultat est bien évidement à mettre en perspectives avec les hypothèses posées dans le tableau 6.4.

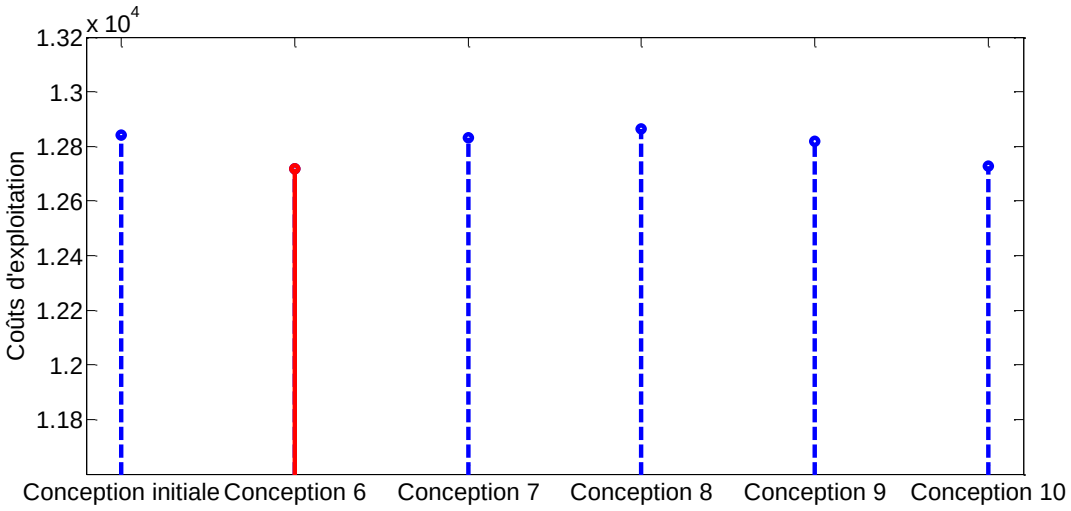

Figure 6.9: Coûts d'exploitation du système pour différentes propositions de conception

Globalement, après avoir étudié ces diverses propositions de conception pour le composant A_1, la Conception 4 semble la solution à privilégier. Le tableau 6.5 présente les facteurs d'importance pour les différents composants du système, en supposant que le

composant A_1 initial a été remplacé par la Conception 4. Nous constatons que les efforts de conception au niveau des caractéristiques de fiabilité du composant A_1 permettent de faire diminuer son impact sur les coûts d'exploitation de 29% à 22%.

$C_{Ex} = 11724€$	A_1 (Conception 4)	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
$C_{I,a}$ (en €)	700	500	500	500	500	500
$C_{R,a}$ (en €)	950	759	1315	687	1328	661
$C_{SC,a}$ (en €)	917	423	755	143	261	121
$C_{SD,a}$ (en €)	34	34	34	34	34	34
I_a (en %)	22	15	22	12	18	11

Tableau 6.5: Facteurs d'importance pour le système après remplacement du composant A_1 par la Conception 4 (MFOP=50000; NC=80)

Faire évoluer l'architecture de surveillance

Une seconde solution consiste à investir dans une architecture de surveillance plus complète pour le système étudié. Pour l'illustration, nous considérons qu'un capteur est disponible sur le marché pour renseigner sur l'état de fonctionnement du composant A_1. La mise en place de ce capteur va entrainer un coût $C_{NI,1} = 50€$ qui correspond à 10% du coût du composant. Le résultat de cette proposition de conception que l'on nomme « Conception 11 » est présenté dans le tableau 6.6.

$C_{Ex} = 12855€$	A_1 (Conception 11)	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
$C_{I,a}$ (en €)	550	500	500	500	500	500
$C_{R,a}$ (en €)	1975	773	1309	683	1304	659
$C_{SC,a}$ (en €)	1263	404	616	283	225	121
$C_{SD,a}$ (en €)	0	38	38	38	38	38
I_a (en %)	29	13	19	12	16	10

Tableau 6.6: Facteurs d'importance pour le système après ajout d'un capteur sur le composant A_1 (MFOP=50000; NC=80)

De façon générale, ce résultat montre que la proposition de Conception 11 entraine une légère augmentation des coûts d'exploitation du système. Si on excepte le coût initial et le surcoût de diagnostic du composant A_1, les valeurs répertoriées dans le tableau 6.6 sont les mêmes que pour le système initial. Ce résultat est lié à la structure du système multi-composant étudié et au niveau d'information de surveillance disponible.

En effet, dans un système série, savoir que le système fonctionne implique que tous les composants du système fonctionnent. Cela signifie que le capteur n'apporte aucune information nouvelle quand le système est en marche. Les décisions de maintenance sont donc identiques avec ou sans l'ajout du capteur. A contrario, quand le système est en panne,

le capteur permet d'éviter le diagnostic sur le composant A_1, ce qui explique que $C_{SD,1} = 0$. Pour avoir une influence sur les décisions de maintenance dans un système série, il est nécessaire d'avoir accès au niveau de dégradation des composants du système.

Ajouter des redondances

Il est également possible d'envisager la mise en place d'une redondance sur le composant A_1. Comme nous l'avons décrit précédemment, cet outil de conception a pour but d'augmenter la fiabilité globale du système en diminuant le nombre d'immobilisations liées au composant A_1.

Dans cette illustration, nous considérons qu'une redondance passive est mise en œuvre. Cette redondance est matérialisée par un septième composant placé en parallèle du composant A_1. Contrairement à une redondance active où les deux composants en parallèle fonctionnent en même temps, dans une redondance passive un seul composant fonctionne à la fois. Le second composant est en attente et prend instantanément le relai quand le composant qui fonctionne tombe en panne (Gaudoin, 2014).

Les propriétés du composant A_7 sont supposées identiques au composant A_1. Quand le composant A_1 tombe en panne, le composant A_7 prend alors le relai jusqu'à la fin de la MFOP. Le composant A_1, en panne, est alors remplacé sans entrainer une immobilisation du système. L'âge du composant A_7 correspond au kilométrage auquel il va se substituer au composant A_1. Nous supposons également qu'il n'est pas maintenu en cas de défaillance. Enfin, pour mettre en place cette redondance passive, un capteur capable de renseigner sur l'état de fonctionnement du composant A_1 est nécessaire. La mise en place de ce capteur va entrainer un coût $C_{NI,1} = 50€$ qui correspond à 10% du coût du composant. Le résultat de cette proposition de conception que l'on nomme « Conception 12 » est présenté dans le tableau 6.7.

$C_{Ex} = 12032€$	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7 (Conception 12)
$C_{I,a}$ (en €)	550	500	500	500	500	500	500
$C_{R,a}$ (en €)	1941	752	1311	681	1299	659	0
$C_{SC,a}$ (en €)	0	413	633	305	249	129	0
$C_{SD,a}$ (en €)	0	22	22	22	22	22	0
I_a (en %)	21	14	20	13	17	11	4

Tableau 6.7: Facteurs d'importance pour le système après ajout d'une redondance sur le composant A_1 (MFOP=50000; NC=80)

Cette solution de conception permet de réduire de 6% les coûts d'exploitation du système. De plus, l'impact du composant A_1 sur ces mêmes coûts d'exploitation passe de 29% à 21%.

La redondance passive sur ce composant permet d'éviter les immobilisations dues à la panne du composant A_1.

Gérer l'accessibilité des composants

Nous envisageons enfin de travailler sur l'accessibilité du composant A_1. A titre d'illustration, nous supposons que ces travaux permettent de diminuer de moitié le temps de remplacement de la pièce, nous avons donc $D_1 = 30\ \mathrm{min}$. Nous considérons également que les modifications apportées au système entrainent une augmentation du prix de la pièce de l'ordre de 10%. Le résultat de cette solution de conception appelée « Conception 13 » est synthétisé dans le tableau 6.8.

$C_{Ex} = 12656€$	$\mathbf{A_1}$ (Conception 13)	$\mathbf{A_2}$	$\mathbf{A_3}$	$\mathbf{A_4}$	$\mathbf{A_5}$	$\mathbf{A_6}$
$C_{I,a}$ (en €)	550	500	500	500	500	500
$C_{R,a}$ (en €)	1416	873	1457	681	1322	661
$C_{SC,a}$ (en €)	1621	380	471	142	231	117
$C_{SD,a}$ (en €)	39	39	39	39	39	39
I_a (en %)	29	14	19	11	17	10

Tableau 6.8: Facteurs d'importance pour le système après amélioration de l'accessibilité du composant A_1 (MFOP=50000; NC=80)

Tout d'abord, nous constatons que cette solution de Conception 13 permet de réduire de 1,5% les coûts d'exploitation du système par rapport à la configuration initiale. En regardant plus en détails les différents coûts associés au composant A_1, nous constatons que le coût de remplacement a diminué et que le surcoût correctif a augmenté. Selon les hypothèses considérées pour la Conception 13, nous notons que le coût (pièce + main d'œuvre) du composant A_1 a augmenté. Cette augmentation va avoir pour conséquence de modifier les décisions de maintenance sur le composant A_1 en diminuant le nombre de remplacements préventifs. Nous illustrons ainsi l'importance de prendre en compte la politique de maintenance pour faire des choix en termes de conception.

6.5 Conclusion

La méthodologie présentée fournit au concepteur un outil d'aide à la décision permettant de hiérarchiser l'impact des composants sur les coûts d'exploitation du système et d'évaluer les propositions de conception disponibles. Pour hiérarchiser l'impact des composants, un facteur d'importance basé sur les coûts a été introduit. La plus-value de cette méthodologie se trouve dans la prise en compte de la structure du système et de la politique de maintenance pour faire des recommandations de conception.

Parmi les recommandations possibles, nous pouvons citer le choix entre des composants aux caractéristiques de fiabilité différentes, le choix d'investir dans une architecture de

surveillance plus complète, le choix d'envisager de mettre un composant en redondance ou encore le choix de travailler sur l'accessibilité des composants.

A noter que cette méthodologie n'a pas vocation à déterminer la conception optimale pour un système donné. Elle va avoir pour prétention de guider le concepteur dans ses choix en intégrant les problématiques de maintenance. Le but étant de diminuer les coûts d'exploitation du système étudié.

Chapitre 7

Application à un sous-système du véhicule industriel

Dans ce chapitre, le système multi-composant considéré fait référence à un sous-système du véhicule industriel. Par souci de confidentialité, le nom de ce système n'est pas précisé. L'objectif est d'appliquer la politique de maintenance exposée précédemment en tenant compte de la structure du système étudié et des informations de surveillance disponibles. Pour ce faire, les différentes étapes conduisant à la mise en place de cette politique sont détaillées. Précisons que cette application a été menée dans le cadre d'un projet interne de recherche dans le groupe Volvo.

Le chapitre est construit comme suit. La première partie se concentre sur le contexte de notre étude. Les recommandations qui ont entrainé la sélection du système sont précisées et un inventaire des données disponibles est réalisé. La seconde partie spécifie la construction du modèle de maintenance. Dans ce cadre, les différentes hypothèses inhérentes à la modélisation du système et à la politique de maintenance sont introduites. En s'appuyant sur ce modèle, une évaluation de la politique est présentée dans une troisième partie. Une comparaison avec la politique de maintenance actuellement appliquée est effectuée.

7.1 Présentation du contexte de notre étude

Comme nous l'avons évoqué en introduction, le système étudié ne correspond pas à l'ensemble du véhicule industriel mais uniquement à un de ses sous-systèmes. Précisons, néanmoins, que les travaux présentés dans ce chapitre peuvent être étendus à l'ensemble des sous-systèmes constituant le véhicule. Cette partie débute en précisant la façon dont l'identification du système a été réalisée. Nous nous focalisons ensuite sur un inventaire et une analyse des données disponibles. Ces données constituent le prérequis nécessaire à la construction du modèle de maintenance pour le système spécifié.

7.1.1 Sélection du système multi-composant

Pour identifier le système utilisé dans cette application, différentes recommandations ont été introduites par le groupe Volvo. Parmi l'ensemble de ces recommandations, nous retenons principalement:

- Identifier un système impactant fortement la disponibilité du véhicule pour privilégier les systèmes dont la panne entraine l'immobilisation du véhicule.

- Identifier un système sur lequel le groupe Volvo possède une forte expertise interne. pour déterminer la structure du système spécifié et valider les modélisations réalisées.

- Identifier un système présent sur la majorité des véhicules pour garantir la représentativité des données disponibles et pour renforcer l'intérêt de l'application considérée.

- Identifier un système en adéquation avec les préoccupations du groupe Volvo en termes de maintenance. En effet, la question de l'efficacité de la politique de maintenance actuelle se pose sur certains composants. Il serait donc intéressant qu'ils appartiennent au moins en partie au système cible.

En s'appuyant sur ces différentes recommandations, un système composé de 18 composants a été retenu. Les travaux réalisés avec des experts du groupe sur la structure du système, noté A, ont permis d'établir le diagramme de fiabilité présenté à la figure 7.1. Il s'agit d'un système dit série/parallèle. La partie série est constituée de quatre composants $\{A_1, A_2, A_3, A_4\}$. Une panne sur l'un d'entre eux entraîne immédiatement le dysfonctionnement du système et l'arrêt du véhicule. A l'inverse, une structure parallèle distingue les groupes de composants $\{A_5, A_7, A_9, A_{11}, A_{13}, A_{15}, A_{17}\}$ et $\{A_6, A_8, A_{10}, A_{12}, A_{14}, A_{16}, A_{18}\}$. Ce choix au niveau de la représentation indique que l'apparition d'une panne sur l'un de ces deux groupes n'entraîne pas le dysfonctionnement du système. Le véhicule peut ainsi continuer sa mission sans que sa disponibilité ne soit impactée.

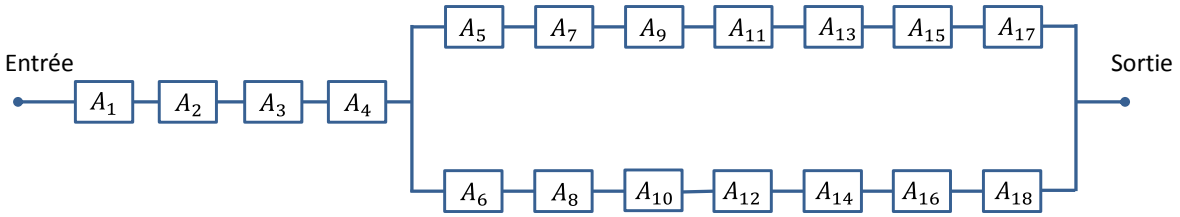

Figure 7.1: Diagramme de fiabilité du système retenu pour l'application

7.1.2 Inventaire des données disponibles

Avant de faire l'inventaire des données disponibles, il est nécessaire de préciser le cadre exact de notre étude. De manière pragmatique, nous nous focalisons sur la gamme qui contient le plus de véhicule. Le recueil des données s'établit à partir de véhicules mis en

circulation entre 2007 et 2008. La fin de l'étude est fixée au 31 décembre 2013. Nous disposons donc au minimum d'un horizon de 5 ans pour l'ensemble des véhicules concernés. Concentrons-nous maintenant sur les données disponibles pour mener à bien cette étude. Tout d'abord, la base de données répertorie des informations d'ordre général au niveau des véhicules et des contrats de maintenance associés. Nous disposons ainsi de:

- Données « Véhicule »
  - Numéro d'identification (noté VIN)
  - Numéro de châssis
  - Date de mise en circulation

- Données « Contrat de Maintenance »
  - Numéro du contrat
  - Type de contrat
  - Date de début du contrat
  - Date de fin du contrat
  - Couverture: Le pourcentage de temps passé sous contrat depuis la mise en circulation du véhicule jusqu'à la fin de l'étude

Ensuite, pour chaque opération de maintenance effectuée sur un véhicule, les données suivantes sont disponibles :

- Données « Opération de Maintenance »
  - Date de l'opération
  - Description de l'opération
  - Référence et Quantité de la pièce remplacée
  - Coût de remplacement (prix de la pièce)
  - Durée de remplacement
  - Age du véhicule
  - Kilométrage du véhicule

7.1.3 Nettoyage des données disponibles

Les données doivent être nettoyées pour assurer la pertinence de notre étude. Il s'agit notamment d'identifier les données aberrantes et de tenir compte des données incomplètes. Dans cette sous-partie, nous allons expliciter ces problématiques et présenter les réponses proposées.

Données aberrantes au niveau des kilométrages véhicule

Les premières études de fiabilité ont dévoilé des durées de vie aberrantes pour certains composants du système. Ces données aberrantes faussent la moyenne et l'écart type de

l'ensemble des durées de vie rencontrées. Elles rendent également les modèles statistiques sous-jacents peu fiables.

L'histogramme présenté à la figure 7.2, illustre les durées de vie en kilomètres obtenues pour un composant donné. La majorité de ces données est comprise entre 0 et 1 million de kilomètres. Néanmoins, une durée de vie est enregistrée à plus de 5 millions de kilomètres. Compte tenu de la fenêtre de temps sur laquelle cette étude est réalisée, ce kilométrage ne peut décemment pas être observé pour un véhicule. Cette donnée est jugée aberrante et doit être supprimée de notre étude. Précisons que les kilométrages sont saisis manuellement par un opérateur lors de l'entrée du véhicule à l'atelier. L'apparition de ces données aberrantes trouve son origine par des erreurs de saisie lors de cette étape manuelle.

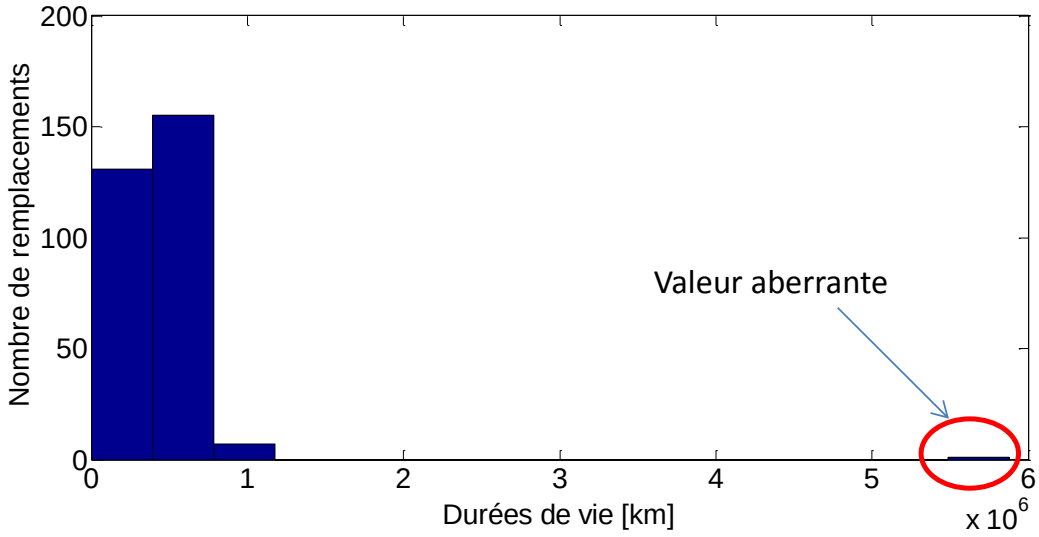

Figure 7.2: Illustration des valeurs aberrantes rencontrées sur les données disponibles

Pour identifier automatiquement ces données aberrantes et ainsi pouvoir les supprimer, nous proposons d'utiliser une méthode simple et largement utilisée: le filtre de Tukey (Tukey, 1977). Cette méthode considère une donnée Ω comme aberrante si:

$$\Omega < (q_1 - 1.5 \times (q_3 - q_1)) \quad \text{ou} \quad \Omega > (q_3 + 1.5 \times (q_3 - q_1)) \tag{7.1}$$

avec q_1 et q_3 respectivement les premier et troisième quartiles calculés à partir de l'ensemble des données de durées de vie disponibles pour un composant.

Prise en compte des données incomplètes

Rappelons que notre objectif est d'utiliser les données disponibles pour estimer la fonction de fiabilité (ou de défiabilité) associée aux différents composants du système retenu. La démarche classique pour estimer cette fonction est de relever la durée de bon

fonctionnement de chaque composant sur l'ensemble des véhicules de notre échantillon (cf. figure 7.3 observation 1). Pour un certain nombre de composants, les durées de bon fonctionnement, exprimées en kilomètres, sont inconnues. Ceci implique que les données de survie que l'on collecte sont généralement incomplètes. Dans le contexte de notre étude, ces données incomplètes peuvent être divisées en deux types.

Tout d'abord, ces données incomplètes peuvent être associées à des véhicules qui effectuent leurs maintenances hors du réseau Volvo. Dans ce cas, le composant aurait pu être remplacé dans un atelier non Volvo mais il est actuellement impossible d'accéder à cette information (cf. figure 7.3 observation 3). Ce type de données incomplètes ne doit pas être considéré pour la construction des modèles de fiabilité. L'objectif est ainsi de les identifier et de les supprimer de notre étude pour ne pas fausser les résultats.

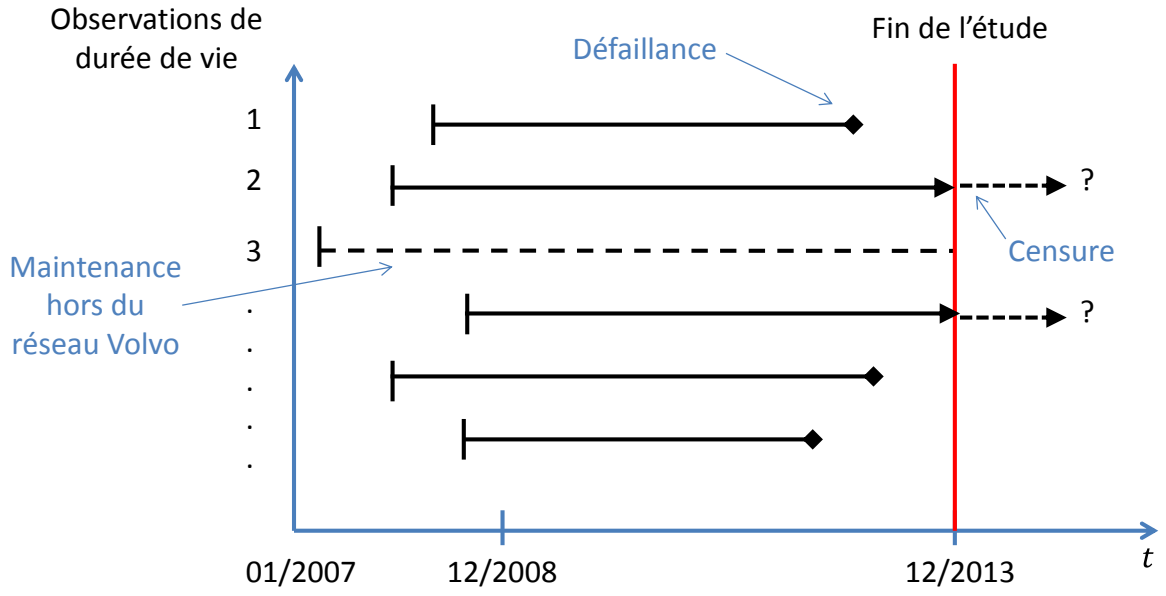

Figure 7.3: Illustration des données complètes et incomplètes

A l'inverse, un autre type de données incomplètes fait référence à des données dites censurées. Cela signifie que le composant suivi n'est pas tombé en panne à la fin de l'étude. Il est donc impossible de connaitre sa durée de vie exacte mais celle-ci reste supérieure au kilométrage parcouru entre sa mise en circulation et la fin de l'expérience (cf. figure 7.3 observation 2). Ces données censurées apportent donc de l'information qui doit être prise en compte pour estimer la fonction de fiabilité. Notons que plusieurs types de censures existent et qu'ils correspondent chacun à une situation bien particulière. Les différents mécanismes de censure sont expliqués dans de nombreux ouvrages notamment (Meeker & Escobar, 1998) (Rausand & Høyland, 2004). Dans le contexte de notre étude, les composants sont mis en exploitation à des dates différentes comprises entre 2007 et 2008. L'analyse menée jusqu'à une date prédéterminée, se termine avant que tous les composants ne soient défaillants. On parle dans ce cas de censures multiples à droite (Berthon, 2008).

Rappelons que la durée de vie d'un composant est exprimée dans notre cas d'application en kilomètres. Ainsi, à la date de censure, il est nécessaire d'estimer le kilométrage du véhicule pour déterminer cette durée de vie censurée. Pour ce faire, une régression linéaire robuste est utilisée à partir des kilométrages répertoriés du véhicule. Notons, que le nombre annuel de kilomètres parcourus par un véhicule évolue tout au long de sa vie. Les études réalisées sur ce sujet témoignent qu'un changement est souvent opéré à partir de la deuxième année de roulage. En s'appuyant sur cette remarque, la régression est effectuée sur les kilométrages du véhicule à partir de la deuxième année. L'évolution linéaire du kilométrage n'est pas vérifiée pour l'ensemble des véhicules néanmoins cette hypothèse est pertinente pour la gamme de véhicule utilisée dans notre étude. L'avantage de cette régression, réalisée à l'aide de la fonction « robustfit » de Matlab, réside dans sa capacité à résister aux données aberrantes. Cela signifie qu'elle est capable de les identifier et de ne pas en tenir compte dans la régression (cf. figure 7.4).

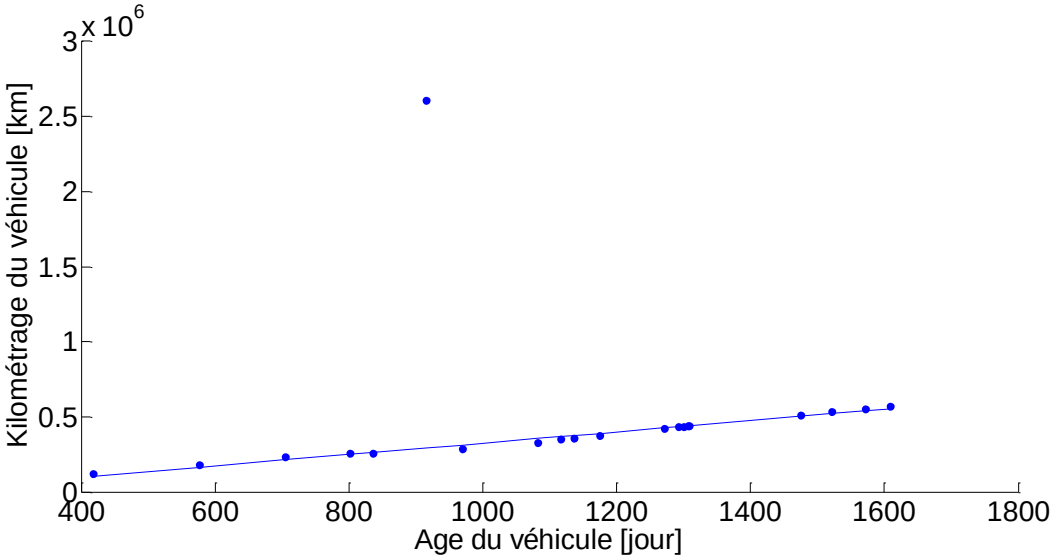

Figure 7.4: Régression linéaire robuste appliquée à un véhicule donné

Par la suite, pour estimer la fonction de fiabilité, l'enjeu est de définir si les données incomplètes proviennent de composants qui ont été remplacés hors du réseau Volvo ou de composants dont la durée de vie est censurée. Pour réaliser cette distinction, la notion de fidélité des véhicules va être introduite. L'hypothèse est de considérer qu'un véhicule captif revient systématiquement dans un atelier Volvo pour réaliser sa maintenance. Ainsi, pour les véhicules captifs, les données incomplètes sont considérées comme censurées à droite. A l'inverse, nous supposons que les véhicules dont la fidélité n'est pas démontrée peuvent aller faire leur maintenance chez un concurrent. Dans ce contexte, les données incomplètes associées à ces véhicules ne sont pas prises en compte dans l'estimation de la fiabilité. Dans cette étude, un véhicule est considéré comme captif si le pourcentage de temps passé sous contrat depuis sa mise en circulation jusqu'à la fin de l'étude est supérieur à 80%. Ce seuil de

80% a été défini avec des experts du groupe qui estiment qu'à ce niveau il est très peu probable que les utilisateurs de ces véhicules aillent effectuer leur maintenance hors du réseau Volvo.

Au final, pour estimer la fonction de fiabilité associée à un composant, les données récupérées sont:

- soit des durées de bon fonctionnement (en km) pour les composants tombés en panne sur la période d'étude,
- soit des temps de censure (en km) pour les composants qui n'ont pas encore été défaillants à la fin de la période d'observation (censure à droite)

La méthode utilisée pour intégrer les durées de vie censurées dans l'estimation de la fonction de fiabilité est détaillée dans la partie suivante.

7.2 Construction du modèle de maintenance

Dans cette partie, l'objectif est de présenter les différentes étapes associées à la construction du modèle de maintenance. Rappelons qu'un modèle de maintenance combine un modèle de fiabilité du système et une politique de maintenance. Ce modèle est utilisé, par la suite, pour évaluer les performances de la politique de maintenance retenue.

7.2.1 Modélisation de la fiabilité du système

Pour établir le modèle de fiabilité associé au système présenté à la figure 7.1, la première étape consiste à estimer la fonction de fiabilité de chaque composant. Dans les études de fiabilité réalisées actuellement dans le groupe Volvo, les données censurées telles qu'elles ont été définies précédemment, ne sont pas considérées. En effet, les modèles actuels sont déterminés uniquement à partir des composants tombés en panne sur la période d'étude. Les estimations obtenues sont donc forcément sous-estimées car les données censurées ne sont pas prises en compte. Les éliminer entraîne une perte d'information importante, puisque l'on ne tient pas compte des composants qui ont justement une durée de vie plus longue.

La présence de données censurées impose un traitement statistique particulier. Dans ce manuscrit, la méthode du maximum de vraisemblance est proposée pour intégrer cette information censurée. Cette méthode paramétrique est fréquemment utilisée pour déduire les paramètres de la distribution de probabilité d'un échantillon donné. Son estimateur est convergent, exhaustif, asymptotiquement sans biais et efficace (Berthon, 2008).

Ainsi, dans le cas d'un échantillon de N données de survie indépendantes et non censurées, la fonction de vraisemblance s'écrit:

$$L(X_1, X_2, \dots, X_N\,;\phi) = \prod_{o=1}^{N} f(X_o;\phi) \tag{7.2}$$

avec $f(X_o,\phi)$ la densité de probabilité évaluée à l'instant de défaillance X_o. Dans le cas où il y a des données de survie censurées à droite, les N données de survie peuvent être divisées en deux ensembles disjoints: Ψ_{NC} correspondant aux données non censurées et Ψ_{CD} correspondant aux données censurées à droite (Rausand & Høyland, 2004). La fonction de vraisemblance s'écrit alors:

$$L(X_1, X_2, \dots, X_N\,;\phi) = \prod_{o\,\in\,\Psi_{NC}} f(X_o;\phi) \prod_{o\,\in\,\Psi_{CD}} R(X_o;\phi) \tag{7.3}$$

avec $R(X_o;\phi)$ la probabilité de survie au-delà de X_o. Chercher l'estimateur du maximum de vraisemblance revient à chercher la valeur du paramètre ϕ qui rend l'échantillon le plus « probable » possible. En d'autres termes, on va chercher à maximiser $L(X_1, X_2, \dots, X_N\,;\phi)$ ou de manière équivalente à maximiser $\ln[L(X_1, X_2, \dots, X_N\,;\phi)]$.

Application au système multi-composant retenu

Après avoir défini la méthode statistique à utiliser pour intégrer les données de survie censurées, celle-ci est appliquée sur les différents composants du système retenu. Nous nous plaçons dans le cas de censures multiples à droite (cf. figure 7.3) et nous supposons que les différents échantillons suivent une loi de Weibull à deux paramètres que nous cherchons à déterminer.

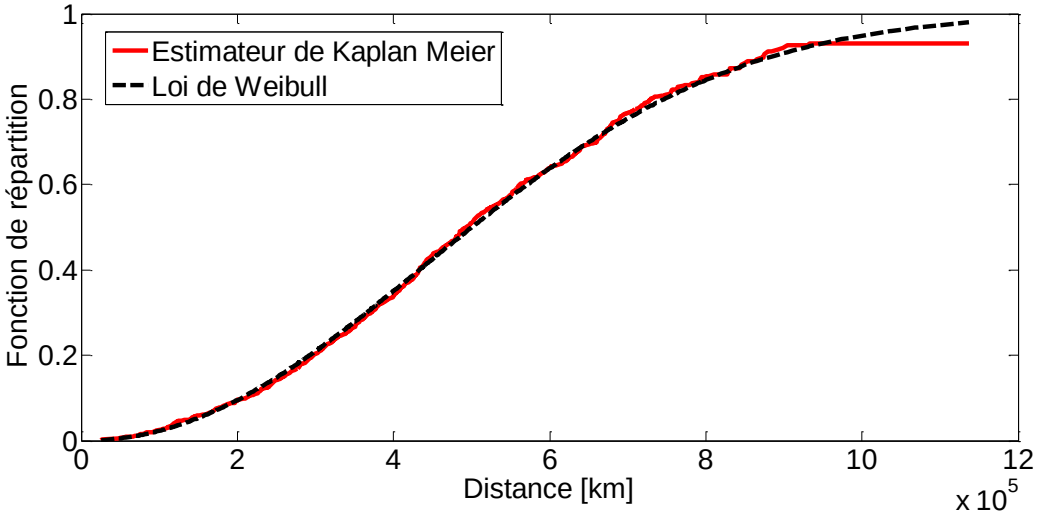

Figure 7.5: Fonction de répartition obtenue pour le composant A_2 avec prise en compte des données de survie censurées

La figure 7.5 illustre la fonction de répartition obtenue pour le composant A_2 avec prise en compte des données censurées. Pour ce composant, notre échantillon de données de survie se compose de 803 observations de panne sur la durée de l'étude et de 260 données censurées. Afin de pouvoir constater visuellement l'adéquation entre la loi de Weibull définie et l'échantillon de données considéré, l'estimateur de Kaplan-Meier est représenté. Celui-ci est l'estimateur non paramétrique le plus direct de la fonction de répartition. Il est également capable de s'adapter à la présence de données censurées. En s'appuyant sur la figure 7.5, nous constatons qu'environ 90% de notre échantillon est tombé en panne à 900 000 km.

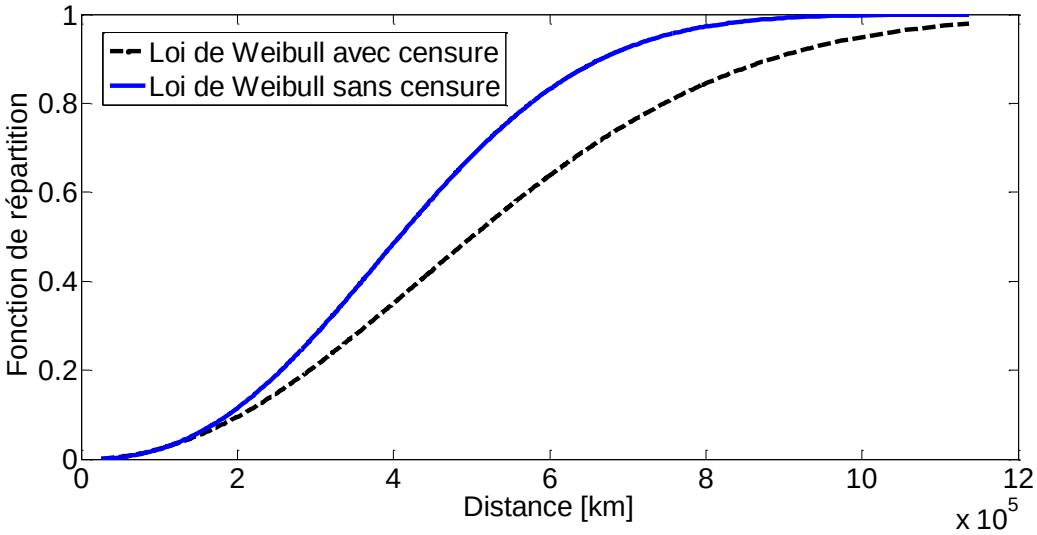

Figure 7.6: Fonctions de répartition obtenues avec et sans prise en compte des données de survie censurées pour le composant A_2

La figure 7.6 compare les fonctions de répartition obtenues avec et sans prise en compte des données censurées pour le composant A_2. En s'appuyant uniquement sur les 803 observations de panne de notre échantillon, un impact significatif est visible sur la fonction de répartition. En effet, si on reprend la valeur observée à 900 000 km, le modèle sans censure indique que toute la population est en panne. On observe donc sur cette valeur un écart de l'ordre de 10% en comparaison du modèle avec censure.

La figure 7.7 réalise cette même comparaison avec le composant A_4. Pour celui-ci, la proportion des données censurées est beaucoup plus importante que pour le composant A_2. La différence entre les deux fonctions de répartition est visuellement plus marquée. Cela signifie que l'erreur commise en omettant les données censurées est plus importante pour ce composant. Si on compare la valeur de la fonction de réparation à 900 000 km, l'écart est proche de 40% sur le pourcentage de la population tombée en panne. Le choix d'un modèle avec prise en compte des données censurées entraine des modifications importantes sur le choix de la politique de maintenance optimale pour ce composant.

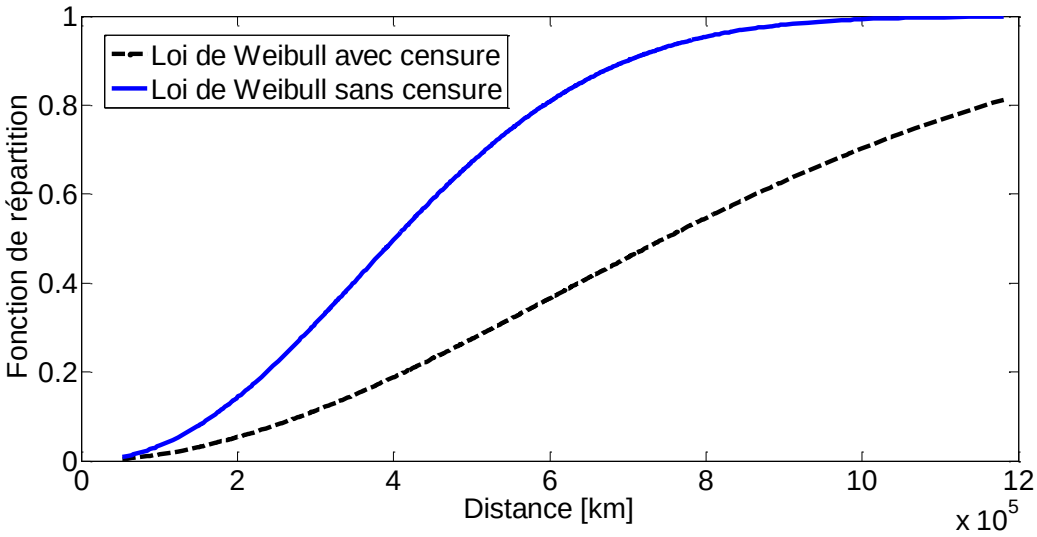

Figure 7.7: Fonctions de répartition obtenues avec et sans prise en compte des données de survie censurées pour le composant A_4

En finalité, les modèles de fiabilité obtenus à partir des données censurées ont été validés en interne par les experts des différents composants car ils correspondent mieux à la situation réelle. Ils jugent ainsi que la prise en compte de l'information de censure est nécessaire pour garantir la pertinence des résultats et des décisions de maintenance qui peuvent en résulter.

Précisons enfin qu'une modélisation spécifique est introduite pour les composants $\{A_{15}, A_{16}, A_{17}, A_{18}\}$. Dans une thèse effectuée précédemment pour le groupe Volvo (Bouvard, 2010), il a été démontré que la dégradation de ces composants peut être modélisée par un processus gamma. En s'appuyant sur ces résultats, des processus de dégradation vont être définis pour ces quatre composants. Bien que ces processus ne s'appuient pas directement sur des mesures de dégradations, ils sont construits en cohérence avec les modèles de survie obtenus à partir des données disponibles. Les seuils de dégradation à partir desquels les composants sont considérés comme défaillants ont été définis par le bureau d'études.

7.2.2 Modélisation de la politique de maintenance

La politique de maintenance dynamique détaillée dans les chapitres 4 et 5 est appliquée. Rappelons que cette politique vise à assurer le bon fonctionnement du système sur une période donnée moyennant un niveau de confiance spécifié. Pour ce faire, le principe est d'évaluer, à la fin de chaque MFOP, la nécessité de maintenir le système. Cette évaluation est basée sur un indicateur, la $MFOPS$ qui intègre les informations de surveillance disponibles et la structure du système. Si l'intervention de maintenance est jugée indispensable, la politique sélectionne les opérations à effectuer selon un critère défini.

Le diagramme de fiabilité, représenté à la figure 7.1, pour le système multi-composant étudié, fait état d'une structure série/parallèle. La politique de maintenance utilise cette structure pour prendre une décision de maintenance à la fin de chaque MFOP. Suivant les paramètres de cette politique ($MFOP$, NC), le système peut être autorisé à repartir malgré une information sur le non-fonctionnement de l'une des deux branches parallèles. Nous illustrons ici une des caractéristiques majeure de la politique de maintenance développée. En effet, c'est l'état du système qui est utilisé pour diriger la décision de maintenance et non pas l'état des différents composants.

Bien que les experts valident le diagramme de fiabilité retenu, ils précisent que la décision de laisser repartir le système n'est jamais prise si la défaillance de l'une des branches est avérée. Cette contrainte, liée à des problématiques de sécurité, doit être intégrée à la politique de maintenance. Pour ce faire, nous proposons de faire évoluer la politique développée en introduisant un diagramme de fiabilité différent pour la modélisation de la fiabilité et la prise de décision de maintenance.

Concernant la modélisation de la fiabilité du système, le diagramme de fiabilité reste identique à celui défini à la figure 7.1. A l'inverse, pour prendre en compte la contrainte spécifiée par les experts, le diagramme de fiabilité présenté à la figure 7.8 est introduit. Cette nouvelle structure entièrement série, est utilisée uniquement dans le processus de décision de maintenance. Cela signifie qu'elle va intervenir dans l'évaluation de la $MFOPS$ et dans la sélection des opérations de maintenance. Le choix de cette modélisation série permet d'imposer l'arrêt du système si l'information de panne est connue pour l'un des composants. La contrainte de sécurité est donc respectée.

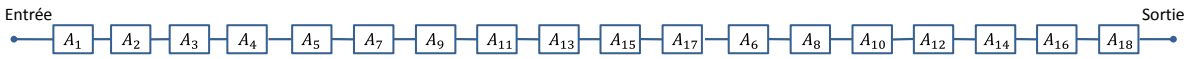

Figure 7.8: Diagramme de fiabilité du système utilisé pour la décision de maintenance

Cette adaptation de la politique de maintenance permet de découpler le diagramme de fiabilité modélisant la structure fiabiliste du système et le processus de décision de maintenance. Cette approche modulaire, très flexible, permet de modéliser et de prendre en compte des contraintes métiers dans le processus de décision de maintenance.

7.3 Analyse et comparaison des résultats

Dans cette dernière partie, une illustration sur le système retenu est proposée. Dans un premier temps, l'objectif est d'évaluer le coût total de maintenance de ce sous-système en considérant la politique de maintenance développée. Dans un deuxième temps, une comparaison avec la politique actuellement appliquée sur ce système est réalisée.

7.3.1 Définition du système

La structure du système multi-composant utilisée pour cette illustration est décrite dans la figure 7.1. Pour ce système, nous considérons que le coût et la durée unitaire de diagnostic sont respectivement de $C_{UD} = 20€$ et $D_{UD} = 5$ min. Le taux horaire de la main d'œuvre est fixé à $\tau_{MO} = 70€$ et le coût de la perte d'exploitation par heure d'immobilisation équivaut à $\tau_I = 100€$. Ensuite pour le remorquage, le coût et la durée considérés sont respectivement de $C_{Remor} = 1500€$ et $D_{Remor} = 5\text{h}$. Enfin, le coût logistique lié à l'entrée du système en atelier de maintenance est de $C_{Log} = 100€$ pour une durée fixée à $D_{Log} = 30$ min. Pour les différents composants du système, le tableau 7.1 synthétise les propriétés de fiabilité, les coûts et les durées de remplacement.

	$\mathbf{A_1}$	$\mathbf{A_2}$	$\mathbf{A_3}$	$\mathbf{A_4}$	$\mathbf{A_5}$	$\mathbf{A_6}$
Modèle de Fiabilité	W(1.31e6,1.7)	W(5.95e5,2.1)	W(9.9e7,0.6)	W(9.39e5,1.7)	W(2.03e6,2.2)	W(3.3e6,0.6)
$\boldsymbol{C_i}$ **(en €)**	1434	607	236	512	1125	1125
$\boldsymbol{D_i}$ **(en h)**	2	1.3	0.9	1.4	0.9	1
	$\mathbf{A_7}$	$\mathbf{A_8}$	$\mathbf{A_9}$	$\mathbf{A_{10}}$	$\mathbf{A_{11}}$	$\mathbf{A_{12}}$
Modèle de Fiabilité	W(4.78e7,1.1)	R=1	W(4.78e7,1.1)	R=1	R=1	W(3.28e6, 1.2)
$\mathbf{C_i}$ **(en €)**	470	400	470	400	1000	1000
$\mathbf{D_i}$ **(en h)**	0.8	1.3	0.8	1.3	1.6	1.6
	$\mathbf{A_{13}}$	$\mathbf{A_{14}}$	$\mathbf{A_{15}}$	$\mathbf{A_{16}}$	$\mathbf{A_{17}}$	$\mathbf{A_{18}}$
Modèle de Fiabilité	R=1	W(3.28e6, 1.2)	G(2.45e-5,0.16) L = 29	G(1.98e-5,0.15) L = 29	G(1.18e-5,0.79) L = 6.3	G(1.39e-5,1.05) L = 6.3
$\boldsymbol{C_i}$ **(en €)**	1000	1000	187	187	434	500
$\boldsymbol{D_i}$ **(en h)**	1.6	1.6	1.3	1.3	2	2.99

Tableau 7.1: Propriétés des composants du système (W=Loi de Weibull, G=Processus Gamma, L=Limite de dégradation)

Dans ce tableau, certains composants possèdent un modèle de fiabilité égal à 1. Cela signifie qu'aucune panne n'est répertoriée pour ces composants dans l'historique de maintenance disponible. Comme nous disposons d'un horizon de cinq ans pour l'ensemble des véhicules, soit un horizon identique à nos simulations, nous considérons une fiabilité égale à 1 pour ces composants.

7.3.2 Résultats issus du modèle de maintenance

En s'appuyant sur les propriétés du système et sur le modèle de maintenance défini dans la partie 7.2, des simulations sont mises en place pour évaluer les coûts totaux de maintenance $C_{TM}(t)$. Ces simulations basées sur la méthode de Monte Carlo sont réalisées sur un horizon de 5 ans. Considérons que le système étudié parcourt en moyenne 100 000 km par an. Nous supposons également que la MFOP est fixée à 50 000 km. Ce choix, défini avec des experts internes, permet de limiter le nombre annuel d'arrêts de

maintenance. Cette valeur de la MFOP coïncide avec l'objectif du groupe Volvo qui est d'avoir, au plus, deux arrêts de maintenance par an.

Pour définir les paramètres optimaux de la politique de maintenance, des simulations sont effectuées en considérant un niveau de confiance NC allant de 30% à 85% par pas de 5%. Avec la structure du système représentée à la figure 7.8 et les propriétés de fiabilité des composants, il est en effet impossible de garantir une $MFOPS$ de plus de 86%. Au niveau de l'information de surveillance, des mesures de dégradations sont disponibles pour les composants $\{A_{15}, A_{16}, A_{17}, A_{18}\}$. Pour les autres composants du système, aucune information n'est disponible. La figure 7.9 illustre l'évolution du C_{TM} pour les différents paramètres de la politique en utilisant le critère de décision J_1. En considérant une MFOP fixée à 50 000 km, un C_{TM} optimal de 7232€ est obtenu pour un NC = 50%.

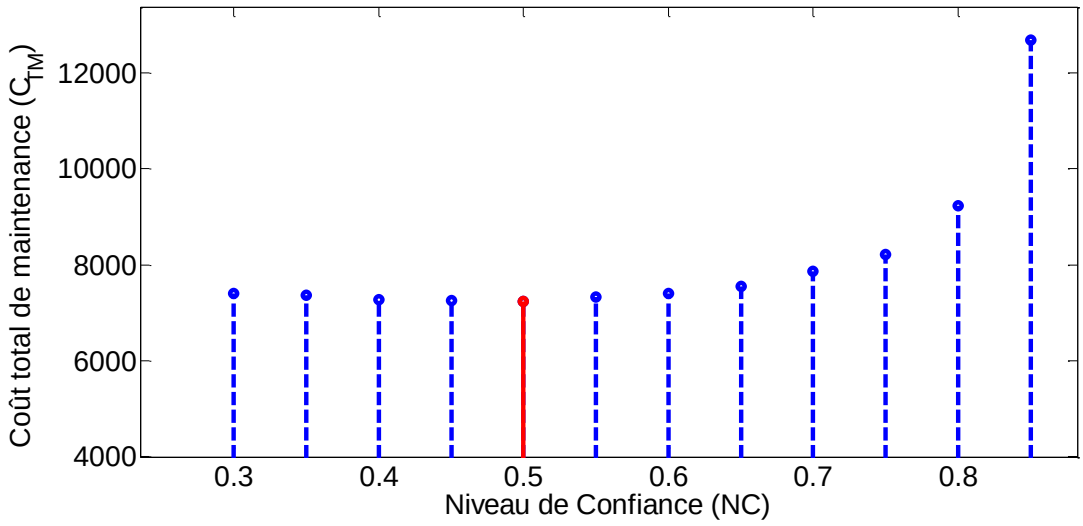

Figure 7.9: Coût total de maintenance pour différents niveaux de confiance (MFOP = 50 000km)

7.3.3 Comparaison avec la politique actuelle

Pour évaluer la politique appliquée actuellement sur ce système et pouvoir ainsi comparer avec celle présentée dans ce manuscrit, un modèle de maintenance doit être construit. Considérons, tout d'abord, que les propriétés de fiabilité ainsi que les coûts et les durées mentionnées dans la partie 7.3.1 sont identiques. La structure du système est représentée à la figure 7.1. La connaissance de cette structure fiabiliste est nécessaire à la gestion des immobilisations. Enfin, le modèle de coût nécessaire à l'évaluation des $C_{TM}(t)$ est similaire à celui utilisé précédemment.

Au niveau de la politique de maintenance, celle-ci est essentiellement corrective. Le groupe Volvo considère que la plupart des composants de ce système ne doit pas tomber en panne

sur la période couverte par le contrat de maintenance. Une politique de maintenance préventive conditionnelle est appliquée uniquement sur les composants $\{A_{15}, A_{16}, A_{17}, A_{18}\}$ (cf. figure 7.10).

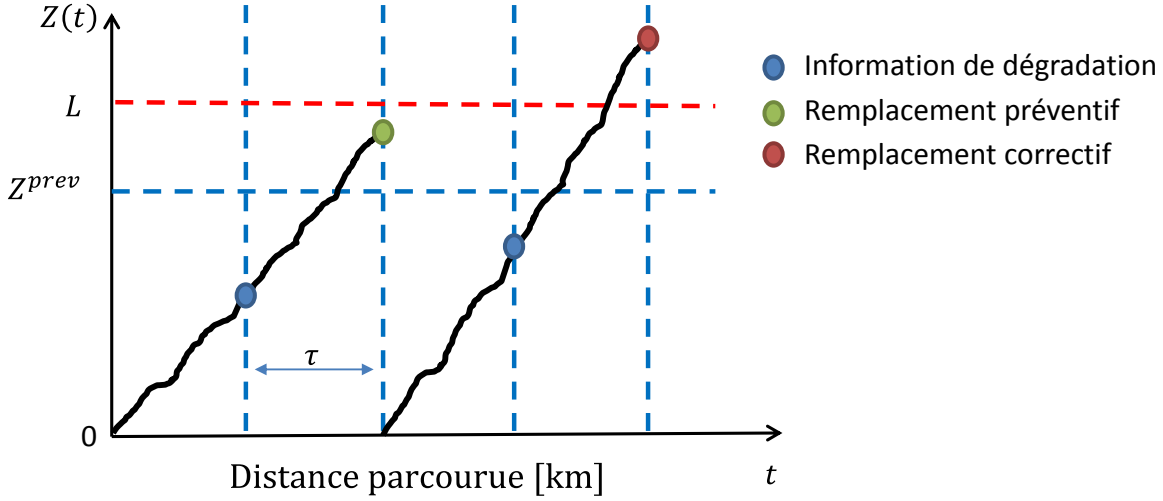

Figure 7.10: Politique de maintenance conditionnelle appliquée sur les composants $\{\mathbf{A_{15}}, \mathbf{A_{16}}, \mathbf{A_{17}}, \mathbf{A_{18}}\}$

Pour modéliser le processus de décision de maintenance, supposons que des informations de dégradation sont transmises tous les $\tau = 50\,000$ km pour ces quatre composants. Supposons également que la dégradation de ces composants est connue en cas d'immobilisation du système. Un seuil de dégradation préventif Z^{prev}, défini grâce aux spécifications techniques, est considéré pour chaque composant. Celui-ci est de $Z^{prev}_{A_{15}} = Z^{prev}_{A_{16}} = 26$ pour les composants $\{A_{15}, A_{16}\}$ et de $Z^{prev}_{A_{17}} = Z^{prev}_{A_{18}} = 5.8$ pour les composants $\{A_{17}, A_{18}\}$. Suivant les informations disponibles, plusieurs cas peuvent être répertoriés pour un composant:

- Si l'information de dégradation indique que $Z(t) < Z^{prev}$, aucune maintenance n'est effectuée à l'instant t sur le composant.

- Si l'information de dégradation indique que $L > Z(t) > Z^{prev}$, le composant est encore en fonctionnement mais une maintenance préventive est jugée nécessaire et doit être réalisée à l'instant t.

- Dès que $Z(t) > L$, le composant ne fonctionne plus. Suivant la structure et l'état du système, ce composant est remplacé soit lors de la prochaine information de dégradation disponible soit lors de l'immobilisation du système.

Pour les autres composants soumis à une maintenance corrective, aucune information n'est disponible. Néanmoins, un diagnostic est effectué sur l'ensemble des composants quand le

système est immobilisé. Celui-ci permet d'identifier les composants en panne et de déclencher leur remplacement. Pour évaluer le C_{TM} de ce système soumis à la politique de maintenance actuelle, la méthode de Monte Carlo est appliquée.

	Politique de maintenance actuelle	**Politique de maintenance basée sur la MFOP**	**Gain**
$\boldsymbol{C_{TM}}$	7736€	7232€	6.5%

Tableau 7.2: Comparaison de C_{TM} des deux politiques de maintenance considérées

Le tableau 7.2 compare les $C_{TM}(t)$ obtenus en considérant la politique de maintenance actuelle et la politique de maintenance basée sur la MFOP. La politique de maintenance développée dans ce manuscrit permet ainsi de réduire de plus de 6% les $C_{TM}(t)$ comparativement à la situation actuelle. Cette baisse au niveau du coût de maintenance s'explique essentiellement par une réduction drastique des immobilisations de plus de 14%. Ces résultats permettent ainsi de justifier la plus-value de la politique de maintenance développée dans ce manuscrit sur un système réel. La politique basée sur la MFOP entraine également une légère baisse au niveau de la dispersion des coûts pour les individus simulés.

7.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une application à un système réel de la politique de maintenance développée dans ce travail de thèse. Il présente ainsi les différentes étapes nécessaires à la mise en place et à l'évaluation de cette politique basée sur la MFOP.

Parmi l'ensemble de ces étapes, la construction des modèles de fiabilité associés aux composants du système est primordiale. La pertinence de notre modèle de maintenance et des décisions qui peuvent en découler dépend de la qualité des modèles de fiabilité. En fonction des caractéristiques inhérentes aux données (complètes, erronées, censurées…), l'objectif est d'utiliser au mieux ces informations pour définir des modèles de fiabilité pertinents. Nous avons notamment démontré dans ce chapitre, comment la prise en compte des données censurées pouvait améliorer cette modélisation.

L'application de cette politique à un système réel a nécessité quelques ajustements au niveau de la politique de maintenance à considérer. Pour respecter les contraintes de maintenance, les diagrammes de fiabilités utilisés pour la modélisation du système et pour la prise de décision de maintenance ont été dissociés. Cette adaptation aux contraintes métier a permis d'illustrer la flexibilité de cette méthode.

Enfin, la comparaison avec la politique actuelle a permis de vérifier la plus-value de la politique de maintenance développée sur le coût total de maintenance du système étudié.

Chapitre 8

Conclusions et perspectives

8.1 Conclusions

Les travaux présentés dans cette thèse ont traité des problèmes de maintenance associés aux véhicules industriels considérés comme des systèmes multi-composant. Nous avons concentré nos recherches sur deux axes principaux: la planification des opérations de maintenance et le développement d'une méthodologie de conception pour la maintenance. Actuellement, le planning de maintenance est établi à partir de la configuration du véhicule et de ses conditions d'utilisations prévues. Celui-ci est statique dans le sens où les informations utilisées pour construire le planning initial ne sont pas mises à jour pendant la vie du véhicule. Les opérations de maintenance sont planifiées à intervalles réguliers et chaque composant est considéré indépendamment du système. Enfin, le retour d'expérience, issu des activités de maintenance, est très peu utilisé pour faire évoluer la conception des véhicules.

L'objectif de cette thèse a été de proposer une offre de maintenance personnalisée en fonction de l'utilisation réelle du système et adaptée aux contraintes des utilisateurs. Dans l'industrie du transport, ces contraintes se caractérisent par un nombre limité d'opportunités de maintenance et des immobilisations à fortes conséquences financières. Cette offre a vocation à garantir un niveau de disponibilité élevé du système tout en réduisant l'impact de la maintenance sur les coûts d'exploitation.

Développement d'une politique de maintenance dynamique

Pour ce faire, nous avons développé une politique de maintenance dynamique pour des systèmes multi-composant. Celle-ci consiste à assurer, moyennant un certain risque, l'autonomie du système sur des périodes d'opérations données. Ces périodes, appelées MFOP, permettent aux utilisateurs de réaliser leurs missions sans être perturbés par des défaillances du système ou des opérations de maintenance. A la fin de chaque période, le processus de décision évalue la nécessité d'une intervention de maintenance pour garantir la prochaine MFOP avec un niveau de confiance spécifié. Lorsque la maintenance est jugée indispensable, un problème d'optimisation sous contrainte a été considéré pour sélectionner les remplacements à réaliser. Contrairement à un système mono-composant, le choix des maintenances à effectuer sur un système multi-composant peut être réalisé de différentes manières. Pour diriger ce choix, des critères de décision basés sur les coûts de remplacements et sur l'efficacité globale des opérations de maintenance ont été introduits.

Un algorithme génétique a également été proposé pour réduire le temps de calcul et éviter l'explosion combinatoire.

Mise en place d'une forme originale de regroupement

L'idée directrice de cette politique est de différer virtuellement toutes les maintenances correctives à venir vers des intervalles de temps planifiés de maintenances préventives situés à la fin de chaque MFOP. Contrairement à la plupart des politiques de regroupement disponibles dans la littérature, les opportunités de maintenance ne sont pas fixées par les composants mais bien par l'état du système. Cette forme originale de regroupement dynamique repose sur un processus de décision qui s'appuie à la fois sur les modèles de fiabilité des composants, sur la structure fiabiliste du système et sur les informations de surveillance disponibles en ligne.

Intégration de la structure du système et des informations de surveillance

L'intégration de la structure du système dans la décision de maintenance a permis de faire évoluer la méthode de planification d'une approche « composant » vers une approche « système ». Ensuite, la prise en compte des informations de surveillance a été primordiale pour s'adapter à l'utilisation réelle du système. Ces informations ont pris la forme d'indications sur l'état de santé des composants et sur leurs conditions d'utilisation. Pour soutenir le processus de décision mis en place, des méthodes ont été développées pour intégrer les différents types d'informations de surveillance. La flexibilité du processus a ainsi permis d'intégrer dans la décision des niveaux d'information hétérogènes selon les composants.

Définition d'un modèle de maintenance pour l'évaluation et l'optimisation de la politique

Les paramètres de cette politique, à savoir la longueur de la période et le niveau de confiance, ont été optimisés en fonction du coût total de maintenance. Ce coût intègre les coûts directs associés aux opérations de maintenance et les coûts indirects engendrés par les immobilisations. Pour être en mesure d'évaluer ce coût sur un horizon fini, des modèles de maintenance ont été introduits. Un modèle de maintenance est un outil de simulation permettant d'évaluer les performances d'une politique de maintenance appliquée sur un système donné. Cet outil a l'avantage de rendre compte de l'évolution de l'état d'un système soumis à une politique de maintenance spécifique. Ces modèles nous ont également permis de réaliser des études prospectives sur le développement d'une instrumentation de surveillance dédiée et de procédures de recueil de données adaptées. Les résultats ont montré que l'accès à des informations de surveillance plus fines, comme les mesures de dégradation ou la connaissance des conditions d'utilisation, permet d'optimiser la politique de maintenance et de réduire les coûts.

Elaboration d'une méthodologie de conception pour la maintenance

Pour envisager une réduction significative du coût d'exploitation du système, l'optimisation de la politique de maintenance seule ne suffit pas. Il est, en effet, primordial de mener une réflexion plus large associant le système et sa maintenance dès la conception. Pour diriger cette réflexion, nous avons développé une méthodologie de conception pour la maintenance. Celle-ci fournit au concepteur un outil permettant de hiérarchiser l'impact des composants sur les coûts d'exploitation et d'évaluer les propositions de conception disponibles. Pour hiérarchiser l'impact des composants, un facteur d'importance basé sur les coûts a été introduit. Différentes options de conception sont ensuite évaluées, par simulation, sur les composants jugés prioritaires. Parmi ces options, nous pouvons citer le choix entre des composants aux caractéristiques de fiabilité différentes, le choix d'investir dans une architecture de surveillance plus complète, le choix d'envisager de mettre un composant en redondance ou encore le choix de travailler sur l'accessibilité des composants. Les options retenues conduisent à réduire les coûts globaux d'exploitation. La plus-value de cette méthodologie se trouve dans la prise en compte de la structure du système et de la politique de maintenance pour faire des recommandations de conception.

Application sur un sous-système du véhicule

Enfin, dans le chapitre 7, nous avons appliqué la politique de maintenance développée sur un système réel. Les différentes étapes nécessaires à la mise en place et à l'évaluation de cette politique ont été détaillées. Nous avons notamment insisté sur l'importance à accorder à la construction des modèles de fiabilité. En fonction des caractéristiques inhérentes aux données (complètes, erronées, censurées…), l'objectif a été d'utiliser au mieux ces informations pour définir des modèles de fiabilité pertinents. Nous avons ainsi démontré comment la prise en compte des données censurées pouvait améliorer cette modélisation. Cette application a également nécessité quelques ajustements au niveau de la politique de maintenance à considérer. Pour respecter les contraintes de maintenance, les diagrammes de fiabilité utilisés pour la modélisation du système et pour la prise de décision de maintenance ont été dissociés. Cette adaptation aux contraintes métier a permis d'illustrer la flexibilité de cette méthode de planification. Les résultats des simulations menées sur le système réel ont permis de vérifier la plus-value de la politique développée sur le coût total de maintenance en comparaison à la politique actuelle.

La première partie de ce chapitre a permis de conclure sur les contributions de la thèse en réponse aux objectifs industriels et aux enjeux méthodologiques définis initialement. Nous allons maintenant évoquer dans une seconde partie les perspectives de ces travaux de thèse.

8.2 Perspectives

Court terme: Poursuivre les travaux en levant les hypothèses simplificatrices

A cout terme, les perspectives consistent principalement à étendre les travaux effectués en levant les hypothèses simplificatrices utilisées dans la modélisation.

Premièrement, des hypothèses plus restrictives peuvent être envisagées au niveau des MRP (Maintenance Recovery Periods). En effet, dans la politique proposée actuellement, aucune contrainte n'est imposée sur la durée des opérations de maintenance à effectuer. Néanmoins, pour certains utilisateurs, il pourrait être nécessaire de définir une contrainte de temps sur la MRP. Dans ce cadre, le problème d'optimisation sous contrainte utilisé pour sélectionner les opérations de maintenance à réaliser doit être adapté.

Deuxièmement, il serait intéressant de considérer une durée variable au niveau des MFOP. Actuellement, la durée de la MFOP est supposée fixe sur l'horizon de simulation. Cette hypothèse pourrait ainsi être abandonnée pour permettre à la durée de la MFOP de s'adapter à chaque mission des utilisateurs.

De façon plus globale, nous pourrions adapter le processus de décision de maintenance à des applications spécifiques. Dans nos travaux actuels, le critère utilisé pour l'évaluation de la politique est basé sur des problématiques de coûts. Dans certains cas spécifiques, nous pouvons imaginer que l'objectif ne soit pas d'optimiser les coûts mais de réduire le nombre de défaillances du système pendant une MFOP. Nous pourrions ainsi envisager de maintenir le système pendant une période de temps limitée à la fin de chaque MFOP afin de maximiser la $MFOPS$.

Concentrons-nous maintenant sur les hypothèses simplificatrices utilisées pour la prise en compte de l'information de surveillance dans le processus de décision de maintenance. Une première hypothèse a été de considérer que nous connaissions parfaitement les processus de dégradation suivis par les composants. Il serait pertinent d'analyser l'évolution du coût de maintenance dans le cas où les paramètres des processus de dégradation ne sont pas connus de manière exacte. Toujours dans la même thématique, le processus de décision actuel fait l'hypothèse que les conditions d'utilisation futures des composants sont similaires à leurs utilisations passées. Nous pourrions ainsi étudier le comportement de la politique développée si les conditions d'utilisations des composants changent très nettement au cours de la vie du système. Les différents éléments mentionnés dans ce paragraphe consistent à mener une analyse de robustesse sur la politique de maintenance développée. Nous souhaitons ainsi vérifier que les performances de la politique ne sont pas altérées si les hypothèses effectuées ne sont pas exactement respectées.

Ces perspectives à court terme permettent encore une fois de justifier la très grande flexibilité de la politique de maintenance proposée.

Long terme: Mettre en œuvre les méthodes développées

Cette thèse a permis de proposer une méthodologie de planification personnalisée en fonction de l'utilisation réelle du système et adaptée aux contraintes des utilisateurs. La thématique de la maintenance étant un domaine très porteur au sein du groupe AB Volvo, une réflexion est menée actuellement sur l'implantation de ces méthodes.

Les différents travaux et résultats présentés dans ce manuscrit ont été obtenus sur une plateforme de simulation. La perspective technologique à plus long terme consiste à passer de cette plateforme de simulation à la mise en place sur un système réel. En d'autres termes, il est nécessaire de déterminer par quels moyens technologiques nous pouvons mettre en œuvre les développements réalisés.

Les méthodes développées nécessitent la mise en place de procédures de recueil de données adaptées et l'accès à des informations de surveillance sur les composants. Il s'agit donc de travailler sur les technologies permettant d'accéder, d'analyser, de stocker et de transmettre l'ensemble de ces informations. Par exemple, nous avons précisé dans le chapitre 5 ne pas avoir accès aux conditions d'utilisation des composants. Pour pallier à ce manque d'informations, une base de données a été générée par simulation pour chacun des composants du système. Actuellement, de nombreux projets sont en cours au sein du groupe Volvo pour accéder à une connaissance précise de l'environnement dynamique dans lequel évolue chaque système. L'objectif de ces projets est de mettre en place une architecture de surveillance permettant de déterminer dans quelles conditions les différents composants du système sont utilisés. Un effort est également effectué pour mettre en place des procédures de recueil de données adaptées aux besoins de la maintenance.

Précisons enfin que le concept émergent d'IVHM (Integrated Vehicle Health Management) offre une perspective technologique séduisante (Esperon-Miguez et al., 2013) (Holland S. W., 2008). Cette technologie intègre la possibilité d'utiliser les processus de surveillance embarqués sur les systèmes avec des processus décisionnels de maintenance. L'objectif de cette technologie est de mettre en œuvre une politique de maintenance en ligne capable de prendre une décision cohérente à partir d'un suivi de la santé du véhicule.

Bibliographie

Abdel-Hameed, M. (1975). A gamma wear process. *IEEE Transactions on Reliability, 24*(2), pp. 152-153.

AFNOR. (1988). *Terminologie relative à la fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité.* X NF, 60-500.

AFNOR. (2001). *Terminologie de la maintenance.* NF-EN-13306-X-60-319.

Ait Kadi, D., & Cléroux, R. (1991). Replacement strategies with mixed corrective actions at failure. *Computer and Operation Research*, 141-149.

Al Shaalane, A., & Vlok, P. J. (2013). Application of the aviation derived maintenance free operating period concept in the south african mining industry. *South African Journal of Industrial Engineering*, 150-165.

Andréasson, N. (2004). *Optimization of opportunistic replacement activities in deterministic and stochastic multi-component systems.* Master's thesis, Chalmers University of Technology.

Ansell, J. I., & Phillips, M. J. (1997). Practical aspects of modelling of repairable systems data using proportional hazards models. *Reliability Engineering and System Safety, 58*, 165-171.

Antelman, G. R., & Savage, R. I. (1965). Surveillance problems : Wiener processes. *Naval Research Logistics Quaterly, 12*, pp. 35-55.

Appleton, D. P. (1996). Future offensive aircraft - maintenance free operating periods. *R, M & T for Future Projects Seminar.* London.

Archibald, Y. W., & Dekker, R. (1996). Modified block replacement for multiple-component systems. *IEEE Transactions on Reliability* , 75-83.

Artus, S., & Bein, T. (2009). *Maintenance On Demand.* Seventh Framework Programme Theme 7 - Sustainable Surface Transport, Annex I, Grant agreement no. : 233890.

Asmussen, S. (2003). *Applied probability and queues, Applications of Mathematics* (Vol. 51). New York: Springer-Verlag.

Assaf, D., & Shanthikumar, J. G. (1987). Optimal group maintenance policies with continuous and periodic inspections. *Management Science, 33*, 1440-1452.

Bagdonavicius, V., & Nikulin, M. (2009). Statistical models to analyze failure, wear, fatigue and degradation data with explanatory variables. *Communications in Statistics Theory and Methods, 38*(16), pp. 3031–3047.

Barata, J., Soares, C., Marseguerra, M., & Zio, E. (2002). Simulation modelling of repairable multi-component deteriorating systems for on condition maintenance optimisation. *Reliability Engineering and System Safety, 76*(3), 255-264.

Barlow, R. E., & Proschan, F. (1975). Importance of system components and fault tree events. *Stochastic Processes and their Applications, 2*, 153-173.

Barlow, R. E., & Proschan, F. (1996). *Mathematical Theory of Reliability.* New-York: Wiley.

Barlow, R. E., & Unter, L. C. (1960). Optimum preventive maintenance policies. *Operations Research, 8*, 90-100.

Barros, A. (2006). *Maintenance des systèmes multicomposants sous surveillance imparfaite: modélisation stochastique et optimisation.* Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Troyes, France.

Bein, T., Elberskirch, D., Bonnot, T., Philipp, F., Kemps, P., Peeters, B., et al. (2014). The MoDe project – Maintenance On Demand concepts for commercial vehicles. *Transport Research Arena.* Paris.

Berg, M., & Epstein, B. (1976). A modified block replacement policy. *Naval Research Logistics, 23*, 15-24.

Berthon, J. (2008). *Nouvelle approche de la fiabilité opérationnelle.* Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, France.

Birnbaum, Z. (1969). On the importance of different components in a multicomponent system. *Multivariate Analysis, 2*, 581-592.

Boulenger, A. (1988). *Vers le Zero Panne avec la Maintenance Conditionnelle.* Paris: AFNOR.

Bouvard, K. (2010). *Planification de la maintenance base sur la dégradation de composants. Application à un véhicule industriel.* Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, France.

Bouvard, K., Artus, S., Bérenguer, C., & Cocquempot, V. (2011). Condition-based dynamic maintenance operations planning and grouping - Application to commercial heavy vehicles. *Reliability Engineering and System Safety, 96*(6), 601-610.

Brown, M., & Hockley, C. (2001). Cost of specifying maintenance/failure free operating periods for the Royal Air Force aircraft. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 425-432.

Carr, M., & Wang, W. (2011). An approximate algorithm for prognostic modelling using condition monitoring information. *European Journal of Operational Research, 211*, 90-96.

Castanier, B. (2002). *Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle.* Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Troyes, France.

Castanier, B., Grall, A., & Bérenguer, C. (2005). A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-series system. *Reliability Engineering and System Safety, 87*(1), 109-120.

Chew, S. P., Dunnett, S. J., & Andrews, J. D. (2008). Phased mission modelling of systems with maintenance-free operating periods using simulated Petri nets. *Reliability Engineering and System Safety, 93*, 980-994.

Cho, D., & Parlar, M. (1991). A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research, 51*(1), 1-23.

Christer, A. H., & Wang, W. (1992). A model of condition monitoring of a production plant. *International Journal of Production Research, 30*, 2199-2211.

Cini, P. F., & Griffith, P. (1999). Designing for MFOP: towards the autonomous aircraft. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 296-306.

Comité National Routier. (2014). *Longue distance 40 T*. Consulté le août 1, 2014, sur http://www.cnr.fr/Indices-Statistiques/Longue-distance-40T#haut

Commission européenne. (2014). *Rapport de la commission au parlement européen et au conseil sur l'état du marché du transport routier dans l'union européenne*. Consulté le août 1, 2014, sur http://ec.europa.eu/transport/modes/road/news/com(2014)-222_fr.pdf

Cox, D. R. (1972). Regression models and life tables. *Journal of the Royal Statistics, B*(34), 187–202.

Crowder, M., & Lawless, J. (2007). On a scheme for predictive maintenance. *European Journal of Operational Research, 176*(3), pp. 1713-1722.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarian, T. (2002). A Fast Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6*, 182-197.

Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering and System Safety, 51*, 229-240.

Dekker, R., & Scarf, P. A. (1998). On the impact of optimisation models in maintenance decision making: the state of the art. *Reliability Engineering and System Safety, 60*(2), 111-119.

Dekker, R., van der Duyn Schouten, F., & Wildeman, R. (1997). A Review of Multi-Component Maintenance Models with Economic Dependence. *Mathematical Methods of Operations Research, 45*, 411-435.

Deloux, E. (2008). *Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant.* Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France.

Deloux, E., Castanier, B., & Bérenguer, C. (2008). Maintenance policy for a deteriorating system evolving in a stressful environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability, 222*(4), pp. 613–622.

Dieulle, L., Berenguer, C., Grall, A., & Roussignol, M. (2003). Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system. *European Journal of Operation Research, 150*(2), 451-461.

Do Van, P., Barros, A., Bérenguer, C., Bouvard, K., & Brissaud, F. (2013). Dynamic grouping maintenance strategy with time limited opportunities. *Reliability Engineering and System Safety*.

Do Van, P., Vu, H. C., Barros, A., & Berenguer, C. (2012). Grouping maintenance strategy with availability constraint under limited repairmen. *8th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety of Technical Processes.* Mexico.

Duflot, N. (2007). *Les mesures d'importance fiabilistes issues des études probabilistes de sûreté nucléaire : contrôle des incertitudes et nouvelles applications pour l'aide à la décision.* Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Troyes, France.

Esperon-Miguez, M., John, P., & Jennions, I. K. (2013). A review of Integrated Vehicle Health Management tools for legacy platforms: Challenges and opportunities. *Progress in Aerospace Sciences, 56*, 19-34.

Fouladirad, M., & Grall, A. (2011). Condition-based maintenance for a system subject to a non-homogeneous wear process with a wear rate transition. *Reliability Engineering and System Safety, 96*(6), 611-618.

Fouladirad, M., Grall, A., & Dieulle, L. (2008). On the use of on-line detection for maintenance of gradually deteriorating systems. *Reliability Engineering and System Safety, 93*(12), 1814–1820.

Franke, M., Bhide, S., Liang, J., Neitz, M., & Hamm, T. (2014). Development Trends for Commercial and Industrial Engines. *SAE Int. J. Engines, 7*(4), 1629-1636.

Fritzsche, R. (2012). Cost adjustment for single item pooling models using a dynamic failure rate: A calculation for the aircraft industry. *Transportation Research Part E, 48*, 1065-1079.

Fusaro, J. P., Nielsen, R., & Scheike, T. H. (1993). Marker dependent hazard estimation: an application to aids. *Statistics in Medicine, 12*, 843-865.

Fussell, J. B. (1975). How to handcalculate system safety and reliability characteristics. *IEEE Transactions on Reliability, 24*, 169-174.

Galante, G., & Passannanti, G. (2009). An exact algorithm for preventive maintenance planning of series–parallel systems. *Reliability Engineering & System Safety, 94*, 1517-1525.

Gaudoin, O. (2014). *Fiabilité des Systèmes et des Logiciels - Notes de cours - Institut National Polytechnique de Grenoble*. Consulté le Septembre 1, 2014, sur http://www-ljk.imag.fr/membres/Olivier.Gaudoin/FSL.pdf

Gertsbakh, I. (1977). *Models of Preventive Maintenance.* North-Holland.

Gertsbakh, I. (2000). *Reliability Theory - With Applications to Preventive Maintenance.* Springer.

Goffaux, G., Vande Wouwer, A., & Bernard, O. (2009). Improving continuous discrete interval observers with application to microalgae-based bioprocesses. *Journal of Process Control, 19*(7), 1182-1190.

Grall, A., Bérenguer, C., & Dieulle, L. (2002). A Condition-Based Maintenance Policy for a Stochastically Deteriorating System. *Reliability Engineering and System Safety, 76*(2), 167-180.

Hockley, C. (1998). Design for success. *Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 212*(6), 371-378.

Hockley, C., & Appleton, D. (1997). Settings the requirements for the Royal Air Force's next generation aircraft. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 44-49.

Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems.* Cambridge: MIT Press.

Holland, S. W. (2008). Integrated vehicle health management in the auto industry. *Electronics System-Integration Technology Conference.* Greenwich.

Huynh, K. (2011). *Quantification de l'apport de l'information de surveillance dans la prise de décision en maintenance.* Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Troyes, France.

Iserman, R. (2006). *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Tolerance* (Vol. XVIII). Springer.

Jury, J., & Sturdivant, K. (1995). Translate your customer focus into bottom line results. *IIE Solutions: Industrial Engineering, 27*, 34-37.

Keller, E. (2003). Customer Support: Delivering Enhanced Services through Intelligent Device Management. *Service Business Magazine*.

Khoury, E. (2012). *Modélisation de la durée de vie résiduelle et maintenance prédictive: application à des véhicules industriels.* Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Troyes, France.

Kumar, U. D. (1999). New trends in aircraft reliability and maintenance measures. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 287-295.

Kumar, U. D., Knezevic, J., & Crocker, J. (1999). Maintenance free operating period - an alternative measure to MTBF and failure rate for specifying reliability ? *Reliability Engineering & System Safety, 64*, 127-131.

Laprie, J. C. (1996). *Guide de la sûreté de fonctionnement.* Toulouse: Cépaduès.

Lawless, J., & Crowder, M. (2004). Covariates and random effects in a Gamma process model with application to degradation failure. *Lifetime Data Analysis, 19*, pp. 213-227.

Lebarbier, E., & Mary-Huard, T. (2008). *Classification non supervisée.* Polycopié de cours AgroParisTech.

Lesobre, R., Bouvard, K., Bérenguer, C., & Grall, A. (2012). Tailored maintenance optimization within Maintenance on Demand project. *ESREL 2012.* Helsinki.

Lesobre, R., Bouvard, K., Berenguer, C., Barros, A., & Cocquempot, V. (2013). A maintenance free operating period policy for a multi-component system with different information levels on the components state. *Chemical Engineering Transactions, 33*, 1051-1056.

Lesobre, R., Bouvard, K., Bérenguer, C., Barros, A., & Cocquempot, V. (2014a). A Usage-Informed Preventive Maintenance Policy to Optimize the Maintenance Free Operating Period for Multi-Component Systems. *Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 12).* Honolulu.

Lesobre, R., Bouvard, K., Bérenguer, C., Barros, A., & Cocquempot, V. (2014b). Evaluation of decision criteria to optimize a dynamic maintenance policy based on Maintenance Free Operating Period concept. *8th International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability.* Oxford.

Lesobre, R., Bouvard, K., Bérenguer, C., Barros, A., & Cocquempot, V. (2014c). Politique de maintenance dynamique pour un système multi-composant intégrant les information de surveillance. *Lambda Mu 19.* Dijon .

Liao, H., Elsayed, E., & Chan, L. (2006). Maintenance of continuously monitored degrading systems. *European Journal of Operational Research, 175*(2), 821–835.

Long, J., Shenoi, R. A., & Jiang, W. (2009). A reliability-centred maintenance strategy based on maintenance free operating period philosophy and total lifetime operating cost analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 223*, 711-719.

Manzini, R., Regattieri, A., Pham, H., & Ferrari, E. (2010). *Maintenance for industrial systems .* Springer Verlag .

Markeset, T., & Kumar, U. (2001). R&M and Risk-Analysis Tools in Product Design, to Reduce Life-Cycle Cost and Improve Attractiveness. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 116-122.

Meeker, W. Q., & Escobar, L. A. (1998). *Statistical Methods for Reliability Data.* Wiley series in probability and statistics.

Michalewicz, Z., & Schouenauer, M. (1996). Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems. *Evolutionary Computation, 4*, 1-32.

Mihalache, A. G. (2007). *Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques: Application sur un système embarqué.* Thèse de Doctorat, Université d'Angers, France.

MIL-HDBK-217F. (1991). Military Handbook. Reliability prediction of electronic equipment. Department Of Defense. Washington DC.

Mitchell, P. (1999). What the customer wants - Maintenance Free and Failure Free operating periods to improve overall system availability and reliability. *RTO AVT Specialists' Meeting on "Design for Low Cost Operation and Support".* Ottawa: RTO MP-37.

Myers, L. E. (1981). Survival functions induced by stochastic covariate processes. *Journal of Applied Probability, 18*, 523-529.

Nelson, W. (1990). *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analysis.* New York: Ed. Wiley.

Newby, M., & Dagg, R. (2004). Optimal inspection and perfect repair. *IMA Journal of Management Mathematics, 15*(2), 175.

Nicolai, R. P., & Dekker, R. (2008). Optimal maintenance of multi-component systems: a review. *Complex system maintenance handbook*, 263–286.

Nicolai, R., Frenk, J., & Dekker, R. (2009). Modelling and optimizing imperfect maintenance of coatings on steel structures. *Structural Safety, 31*(3), 234-244.

Okumoto, K., & Elsayed, E. A. (1983). An optimum group maintenance policy. *Naval Research Logistics Quaterly, 30*, 667-674.

Ouali, M., Tadj, L., Yacout, S., & Ait-Kadi, D. (2011). *A survey of replacement models with minimal repair.* London: Springer Series in Reliability Engineering.

Pagès, A., & Gondran, M. (1980). *Fiabilité des systèmes.* Paris: Eyrolles.

Park, K. S. (1988). Optimal Continuous Wear Limit Replacement under Periodoc Inspections. *IEEE Transactions on Reliability, 37*(1), 97-102.

Patton, R. J., Frank, P. M., & Clark, R. N. (2000). *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems* (Vol. XXV). Springer.

Ponchet, A., Fouladirad, M., & Grall, A. (2010). Assessment of a maintenance model for a multi-deteriorating mode system. *Reliability Engineering and System Safety, 95*(11), 1244–1254.

Puterman, M. L. (1994). *Markov Decision Process: Discrete Stochastic Dynamic Programming.* New York: Wiley .

Rausand, M., & Høyland, A. (2004). *System Reliability Theory: Models, Statistical methods, and Applications.* Hoboken: Wiley.

Razali, A. M., & Al-Wakeel, A. A. (2013). Mixture Weibull distributions for fitting failure times data. *Applied Mathematics and Computation*, 11358-11364.

Relf, M. N. (1999). Maintenance Free Operating Periods - The Designer's challenge. *Quality and Reliability Engineering International, 15*, 111-116.

Ross, S. M. (1984). A model in which component failure rates depend on the working set. *Naval Research Logistics Quaterly, 31*, 297-300.

Saassouh, B. (2007). *Maintenance conditionnelle pour des sytèmes soumis à plusieurs modes de fonctionnement: approche stochastique.* Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Troyes, France.

Sheriff, Y. S., & Smith, M. L. (1981). Optimal maintenance models for systems subject to failure – a review. *Naval research logistics quarterly, 28*.

Si, X., Wang, W., Hu, C., & Zhou, D. (2011). Remaining useful life estimation - A review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operationnal Research*, 1-14.

Singpurwalla, N. (1995). Survival in dynamic environments. *Statistical Science, 10*, pp. 85-103.

Smith, D. J. (1997). *Reliability, maintenability and risk: Practical methods for engineers.* Oxford: Butterworth Heinemann.

Stanton, D. (2013). Systematic Development of Highly Efficient and Clean Engines to Meet Future Commercial Vehicle Greenhouse Gas Regulations. *SAE Int. J. Engines, 6*(3), 1395-1480.

Takata, S., Kimura, F., Van Houten, F. J., Westkamper, E., Shpitalni, M., Ceglarek, D., et al. (2004). Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management. *CIRP Annals – Manufacturing Technology, 53*(2), 643-655.

Tango, T. (1978). Extended block replacement policy with used items. *Journal of Applied Probability, 15*, 560-572.

Thomas, L. C. (1986). A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems. *Reliability Engineering and System Safety, 16*(4), 297-309.

Tijms, H. C. (1986). *Stochastic Modelling and Analysis.* Chichester: Wiley.

Tinga, T. (2010). Application of physical failure models to enable usage and load based maintenance. *Reliability Engineering & System Safety, 95*, 1061-1075.

Tinga, T., & Janssen, R. H. (2013). The interplay between deployment and optimal maintenance intervals for complex multi-component systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 1-14.

Tukey, J. (1977). *Exploratory Data Analysis.* Addison-Wesley.

Valdez-Flores, C., & Feldman., R. M. (1989). A survey or preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. *36*, 419-446.

van der Borst, M., & Schoonakker, H. (2001). An overview of PSA importance measures. *Reliability Engineering & System Safety, 72*, 241-245.

Van Noortwijk, J. (2009). A survey of the application of Gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering and System Safety, 94*, pp. 2–21.

Villemeur, A. (1988). *Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Industriels.* Paris: Eyrolles.

Vu, H. C., Do Van, P., Barros, A., & Berenguer, C. (2012). Maintenance activities planning and grouping for complex structure systems. *European Safety and Reliability Conference.* Helsinki.

Vu, H. C., Do Van, P., Barros, A., & Bérenguer, C. (2014). Maintenance planning and dynamic grouping for multi-component systems with positive and negative economic dependencies. *IMA Journal of Management Mathematics. Advance Access*.

Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research , 139*, 469-489.

Wang, P., & Coit, D. W. (2007). Reliability and degradation modeling with random or uncertain failure threshold. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium.*

Wang, Y., & Pham, H. (2011). Imperfect preventive maintenance policies for two-process cumulative damage model of degradation and random shocks. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management, 2*(1), 66-77.

Warrington, L., Jones, J. A., & Davis, N. (2002). Modelling of maintenance, within discrete event simulation. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium.*

Whitemore, G. A. (1995). Estimating degradation by a wiener diffusion process subject to measurement error. *Lifetime Data Analysis, 1*, 307-319.

Wildeman, R. E. (1996). *The Art of Grouping Maintenance.* PhD thesis, Erasmus Universiteit Rotterdam.

Wildeman, R. E., Dekker, R., & Smit, A. C. (1997). A dynamic policy for grouping maintenance activities. *European Journal of Operational Research, 99*(3), 530-551.

Wu, S., & Coolen, F. P. (2013). A cost-based importance measure for system components: An extension of the Birnbaum importance. *European Journal of Operational Research, 225*, 189-195.

Zhao, X., Fouladirad, M., Bérenguer, C., & Bordes, L. (2010). Condition-based inspection/replacement policies for non-monotone deteriorating systems with environmental covariates. *Reliability Engineering and System Safety, 95*(8), 921-934.

Zuckerman, D. (1989). Optimal Inspection Policy for a Multi-Unit Machine. *Journal of Applied Probability, 26*, 543-551.