

UQAC

Université du Québec
à Chicoutimi

**CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL AUTOMATISÉ BASÉ SUR LA
STRATÉGIE DE MAINTENANCE PRÉVISIONNELLE DES ÉQUIPEMENTS MINIER**

THÈSE

PRÉSENTÉE À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DU DOCTORAT EN INGÉNIERIE

PAR

NICOLAS LA ROCHE-CARRIER

QUÉBEC, CANADA

©Nicolas La Roche-Carrier, 2020

Université du Québec

Doctorat en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de *Philosophiæ doctor* (Ph. D.)

Programme offert en extension par l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)

en vertu d'une entente de collaboration avec

l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)

**Conception et développement d'un outil automatisé basé sur la stratégie de maintenance
prévisionnelle des équipements miniers**

Par

Nicolas La Roche-Carrier

Thèse soutenue devant les membres du jury composé de :

Guyh Dituba Ngoma, ing., Ph. D. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
Direction de recherche Rattachement institutionnel

Yasar Kocaefe, ing., Ph. D. Université du Québec à Chicoutimi
Codirection de recherche Rattachement institutionnel

Fouad Erchiqui, Ph. D. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
Évaluateur Rattachement institutionnel

Nabil Nahas, Ph. D. Université de Moncton
Évaluateur externe Rattachement institutionnel

Hassan Ezzaidi, ing., Ph. D. Université du Québec à Chicoutimi
Président du jury Rattachement institutionnel

Duygu Kocaefe, ing., Ph. D. Université du Québec à Chicoutimi
Directrice de programme Rattachement institutionnel

À la mémoire de mon grand-père Mark.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude à mon directeur de recherche, le professeur Guyh Dituba Ngoma de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT). Je le remercie pour son attention, ses conseils, ainsi que la confiance qu'il m'a toujours témoignée en me donnant libre cours à mes propres initiatives. Je voudrais qu'il retrouve ici l'expression de toute ma reconnaissance et ma sympathie.

Ma gratitude s'adresse également au professeur Yasar Kocaefe de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) qui a accepté la fonction de codirecteur dans le cadre de ma recherche. Tous ses commentaires et ses mots d'encouragement pendant le cheminement doctoral ont été appréciés. Je le remercie d'avoir eu l'amabilité de réviser la présente thèse et de suggérer certaines modifications.

Ce travail de recherche n'aurait pu se concrétiser sans l'aide précieuse d'un ensemble de personnes présentes chez Agnico Eagle, que je tiens à remercier pour leur encadrement, leurs compétences et leur soutien. À commencer par l'initiateur du projet de recherche, le surintendant du département de la maintenance de la mine LaRonde Christian Quirion et à son successeur Sébastien Laflamme. L'achèvement de cette thèse a été possible par la précieuse collaboration des planificateurs seniors Karine Paquette et Dominic Audy, ainsi que de la coordonnatrice de la planification Chantal Vaugeois. D'ailleurs, je veux souligner l'apport important de ces derniers dans ce projet, en m'offrant leur temps pour répondre à mes questionnements et à mes commentaires lors de nos rencontres. Je suis aussi reconnaissant au personnel que j'ai fréquenté de proche ou de loin lors de mes passages à la mine LaRonde et qui m'ont offert leur assistance pendant mon doctorat : le superviseur général de la maintenance Dominic Goulet, les ingénieurs Dave Pigeon et Olivier Desrochers, et le planificateur Louis Bourgoin.

Je remercie l'assistance technique apportée par le centre de support et développement de l'entreprise (CSD). Je veux saluer particulièrement l'aide offerte par l'analyste programmeur Alexandre Grenier et le stagiaire en programmation Guillaume Larouche. Je remercie la contribution apportée par l'analyste JDE Hugo Pascal pour ses recommandations pertinentes en lien avec la codification des applications Oracle® JD Edwards et ReportsNow®. J'adresse mes remerciements à Dany Laflamme et son équipe, Kaven Bertrand-Brochu, Jocelyn Crête et Keven Plante-Marquis, pour m'avoir accueillie dans leur lieu de travail lorsque nécessaire.

Je tiens à remercier également Jean-Guy Pelletier, ancien directeur du corporatif maintenance, pour ses encouragements et sa confiance qu'il m'a toujours témoignée, ainsi qu'à ses commentaires pertinents qui ont été apportés lors de la recherche. Je veux saluer la collaboration de Carlos Canizalez, ancien conseiller en fiabilité du corporatif maintenance, pour sa générosité lors nos rencontres et de son aide qui fut toujours bénéfique.

Je suis reconnaissant à l'ensemble des membres du jury de l'intérêt porté à ce travail de recherche.

Et je ne saurais terminer cette partie sans exprimer ma gratitude à ma famille qui m'a encouragé durant tout mon cheminement universitaire.

RÉSUMÉ

Les concepts de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité sont des paramètres clés dans l'industrie minière en raison de la complexité de l'environnement et de la gestion des coûts liés au bon fonctionnement des équipements miniers. La compréhension de ces concepts est essentielle lorsqu'il s'agit d'analyser l'état d'un équipement minier et de prédire la maintenance adéquate. La recherche de stratégies appropriées pour améliorer les performances globales des maintenances vise à contrôler les défaillances et à définir les actions menant au renforcement de la fiabilité.

Toutefois, le manque de renseignements lors du suivi des maintenances en temps réel ajouté à la complexité de recherche d'informations dans la base de données mènent parfois à des problématiques liées à la gestion des maintenances pour les équipements miniers et leurs composants. Par l'entremise du partenaire industriel, le sujet de recherche propose la conception et le développement d'un procédé qui génère des statistiques de fiabilité et de maintenance pour les équipements miniers dans le but d'anticiper les maintenances prévisionnelles et de déceler des anomalies dans les interventions. La conception du nouvel outil de calcul automatisé est réalisée en exploitant les modèles mathématiques des processus stochastiques tels que le processus de renouvellement (RP), le processus de Poisson homogène (HPP) et le processus de Poisson non homogène (NHPP). Cette thèse considère aussi des approches moins conventionnelles comme le processus de branchement de Poisson (BPP) ainsi que l'approche de Bayes avec un modèle *a priori* de type non informatif pour un échantillon de très faible taille. Au-delà des aspects théoriques des processus recensés dans la revue de la littérature, la conception de l'outil est transposable dans un contexte unique réel. En employant, entre autres, le langage de programmation VBA, un outil est mis en place pour déterminer les paramètres associés aux processus stochastiques, les lois de probabilité ajustées aux données observées, la durée de vie moyenne et l'estimation de la fiabilité des composants présents sur les équipements du site minier. La stratégie de maintenance prévisionnelle proposée aide à prendre de meilleures décisions lors des interventions. Les méthodologies développées peuvent de leur côté être utilisées lors de l'évaluation de la fiabilité et l'optimisation de la maintenance de tous les équipements miniers ayant des temps de bon fonctionnement.

Pour mettre en évidence la pertinence de l'approche développée, des analyses de défaillances et de fiabilité des sous-systèmes provenant des flottes de boulonneuses, boulonneuses à plateforme et foreuses long trou ont été réalisées à partir des données d'interventions et des temps de bon fonctionnement du partenaire industriel. L'étude tient compte du système de maintenance existant et de l'historique des équipements critiques. La dernière contribution considère l'optimisation du temps de remplacement préventif de composants critiques. Divers modèles sont présentés, à savoir les stratégies de maintenance de type âge, de type bloc et séquentielle. Cette thèse propose des temps de remplacement optimal en fonction de la stratégie la mieux adaptée aux données d'interventions.

Ainsi, cette recherche offre des résultats inédits sur la maintenance des équipements mobiles considérés critiques et essentiels dans les opérations minières souterraines. Les résultats observés entourant la fiabilité des sous-systèmes contribuent à la compréhension de leurs modes de défaillance, leur criticité, leurs états de fonctionnement, leurs similitudes et leurs différences avec les flottes d'équipements. Les constats émis permettront de mieux prévenir les défaillances de ces machines en appliquant des stratégies de maintenance appropriées et en optimisant le temps de remplacement de leurs composants selon les performances et les coûts des maintenances.

Mots-clés : Équipement minier mobile, fiabilité, stratégie de maintenance prévisionnelle, processus stochastique, base de données, programmation, optimisation de maintenance.

ABSTRACT

The concepts of reliability, maintainability, availability and safety are key parameters in the mining industry because of the environment's complexity and the cost of management needed for an effective mining equipment functioning. A thorough understanding of these concepts is essential to conduct a proper analysis of the mining equipment's condition and to predict a proper maintenance. Developing appropriate strategies to improve overall maintenance performance aims to control failures and define actions, altogether leading to an increased reliability.

However, the lack of information while monitoring maintenance in real time coupled to the complexity in seeking information through the database sometimes generates problems related to maintenance of mining equipment and its components. Through the industrial partnership, this research subject puts forward a design and process development generating reliability and maintenance statistics on mining equipment in the aims of anticipating the forecast maintenance and detecting anomalies in the interventions. The design of the new automated calculation tool is performed by exploiting mathematical models of stochastic processes such as the Renewal Process (RP), the Homogeneous Poisson Process (HPP) and the NonHomogeneous Poisson Process (NHPP). This thesis also considers less conventional approaches such as the Branching Poisson Process (BPP) and the Bayesian approach with a non-informative prior model designed for a very small sample. Beyond the theory of resolution processes found in the literature review, this tool's design is easily transferrable to a unique and actual context. By using, among others, the VBA programming language, the tool development is implemented to determine the parameters associated with the stochastic processes, the probability laws based on observed data, the average operating time and estimated reliability of the equipment part on the mining site. The proposed predictive maintenance strategy helps in the decision-making during the intervention process, whereas the developed methodologies may be used in the evaluation of the maintenance's reliability and optimization for all mining equipment with times ranging between failure data.

To highlight the relevance of the approach developed, failure and reliability analysis of subsystems from rock bolters fleet, platform rock bolters fleet and drill rigs fleet were carried out using intervention data and time between the mining partner's failures. The study takes into account the existing maintenance system as well as the critical equipment's history. The last contribution considers the optimization of the preventive critical components' replacement time. Various maintenance models are suggested : age PM policy, block PM policy and sequential PM policy. This thesis proposes optimal replacement times according to the best strategy able to adapt to the intervention data.

Thus, this research generates unprecedented results regarding mobile equipment maintenance, which is considered critical in the comprehension of underground mining operations. The observed results related to the subsystems' reliability contribute to the understanding of their failure modes, their criticality, their operating states as well as the similarities and differences between equipment fleets. The study results will hopefully prevent future failures through the application of appropriate maintenance strategies and the optimization of the components' replacement time according to performance and maintenance costs.

Keywords : Mobile mining equipment, reliability, predictive maintenance strategy, stochastic process, database, programming, maintenance optimization.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	ii
Abstract	iii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xii
Liste des symboles	xiv
Liste des abréviations et sigles	xvii
Glossaire	xix
Chapitre 1 Introduction	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Problématique	6
1.3 Objectifs	7
1.3.1 Objectifs à long terme	7
1.3.2 Objectifs spécifiques et méthodologies	7
1.4 Originalité de la recherche	9
1.5 Contenu de la thèse	10
Chapitre 2 Revue de littérature	11
2.1 Sûreté de fonctionnement	11
2.1.1 Densité de probabilité	12
2.1.2 Fonction de fiabilité	13
2.1.3 Fonction de répartition	13
2.1.4 Taux de défaillance	13
2.1.5 Temps moyen de fonctionnement avant défaillance et temps moyen entre défaillances	15
2.1.6 Temps moyen de réparation	15
2.1.7 Disponibilité	16
2.2 Schéma fonctionnel	17
2.2.1 Système de configuration en série	18
2.2.2 Système de configuration en parallèle	18
2.2.3 Système de configuration mixte	19
2.3 Loi de probabilité	19
2.3.1 Loi exponentielle	20
2.3.2 Loi normale	21
2.3.3 Loi log-normale	23
2.3.4 Loi de Weibull	25
2.4 Gestion de la maintenance	28

2.5	Programme de maintenance	29
2.6	Types de maintenance	33
2.6.1	Maintenance corrective	34
2.6.2	Maintenance préventive	35
2.6.3	Maintenance prédictive	36
2.7	Classification des approches de pronostic	37
2.7.1	Pronostic à base de modèles	38
2.7.2	Pronostic guidé par les données	38
2.7.3	Pronostic basé sur l'expérience	38
2.8	Processus stochastiques	39
2.8.1	Entité réparable	40
2.8.2	Entité non réparable	41
2.8.3	Processus de renouvellement (RP)	41
2.8.4	Processus de Poisson homogène (HPP)	42
2.8.5	Processus de Poisson non homogène (NHPP)	43
2.8.6	Processus de branchement de Poisson (BPP)	47
2.8.7	Processus avec approche bayésienne	53
2.9	Études de la fiabilité et de la maintenance des équipements miniers	58
2.9.1	Études de conception et développement d'outil logiciel	60
2.9.2	Études de la chargeuse-navette	61
2.9.3	Études de la pelle mécanique hydraulique	63
2.9.4	Études de la pelle à benne traînante	64
2.9.5	Synthèse des études	65
Chapitre 3 Démarche méthodologique		68
3.1	Méthodologie	68
3.2	Source et traitement des données	69
3.3	Processus de résolution avec approche fiabiliste	70
3.4	Test de tendance	72
3.4.1	Méthode graphique	72
3.4.2	Test de Mann-Kendall	74
3.4.3	Test de Laplace	75
3.4.4	Test MIL-HDBK-189	76
3.5	Test de dépendance	77
3.5.1	Méthode graphique	77
3.5.2	Corrélation de Pearson	78
3.6	Choix d'une loi de probabilité et estimation des paramètres	79
3.6.1	Méthode du maximum de vraisemblance	79
3.6.2	Méthode des moindres carrés	81
3.6.3	Estimation des lois de probabilité	83
3.7	Test d'ajustement	86
3.7.1	Test du khi carré	87
3.7.2	Test de Kolmogorov-Smirnov	87
3.7.3	Test de Cramér-von Mises	88
Chapitre 4 Conception et développement de l'outil automatisé		89
4.1	Conception de l'outil automatisé	89
4.2	Développement de l'outil automatisé	90
4.2.1	Acquisition de données	91
4.2.2	Nettoyage de données	96
4.2.3	Résolution	98
4.3	Hypothèses et limitations de l'outil automatisé	105

4.4	Validation du code Visual Basic	106
4.4.1	Validation 1 : test de Laplace	106
4.4.2	Validation 2 : test MIL-HDBK-189 et test de Cramér-von Mises	107
4.4.3	Validation 3 : estimation par la méthode des moindres carrés	110
4.4.4	Validation 4 : test de Kolmogorov-Smirnov	111
4.4.5	Validation 5 : processus de Poisson non homogène	112
4.4.6	Validation 6 : test de dépendance et processus de branchement de Poisson	113
4.4.7	Validation 7 : processus avec approche bayésienne	115
4.5	Stratégie de maintenance prévisionnelle	116
Chapitre 5 Études des défaillances et de la fiabilité d'équipements miniers mobiles		119
5.1	Sélection des équipements miniers mobiles	119
5.2	Opération de forage	122
5.3	Opération de boulonnage	123
5.4	Hypothèses et limitations des études de cas	124
5.5	Classement et modes de défaillance généraux	125
5.6	Étude de la boulonneuse (BO2102-BO2103)	126
5.6.1	Modes de défaillance spécifiques	131
5.6.2	Analyse avec approche non paramétrique : résultats et discussion	133
5.6.3	Analyse avec approche fiabiliste : résultats et discussion	137
5.7	Étude de boulonneuse à plateforme (BO1111-BO1115)	151
5.7.1	Modes de défaillance spécifiques	153
5.7.2	Analyse avec approche non paramétrique : résultats et discussion	155
5.7.3	Analyse avec approche fiabiliste : résultats et discussion	161
5.8	Étude de la foreuse long trou (FO2103, FO2104, FO2106 et FO2107)	192
5.8.1	Modes de défaillance spécifiques	196
5.8.2	Analyse avec approche non paramétrique : résultats et discussion	198
5.8.3	Analyse avec approche fiabiliste : résultats et discussion	203
5.9	Synthèse des résultats	227
Chapitre 6 Optimisation du remplacement de composants critiques		229
6.1	Optimisation de la maintenance	229
6.2	Maintenance préventive périodique	230
6.2.1	Stratégie de maintenance de type âge	230
6.2.2	Stratégie de maintenance de type bloc	232
6.3	Maintenance préventive séquentielle	234
6.4	Étude des composants critiques réparables	236
6.5	Choix des modèles	237
6.6	Description des coûts	238
6.6.1	Coûts directs	238
6.6.2	Coûts indirects	239
6.6.3	Coûts totaux	239
6.7	Résultats et discussion	240
Chapitre 7 Conclusions et perspectives		261
7.1	Conclusions	261
7.2	Perspectives	264
Publications		267
Références		268

Annexes		278
I	Table de la loi normale centrée réduite	279
II	Table de la loi du khi carré	280
III	Table de la loi de Student	281
IV	Table de la statistique de Kolmogorov-Smirnov	282
V	Table de la statistique de Cramér-von Mises	283
VI	Code composant	284
VII	Code action	285

LISTE DES FIGURES

1.1	Emplacement géographique des grappes de l'industrie minière et des régions d'exploitation minérale au Canada (tirée de Association minière du Canada, 2019)	1
1.2	Vue aérienne du complexe minier de LaRonde avec l'usine de traitement, le puits Penna et le parc à résidus miniers (tirée de Agnico Eagle, 2019)	3
1.3	Vue longitudinale des gisements du complexe minier de LaRonde (tirée de Agnico Eagle, 2019)	5
2.1	Concepts de la sûreté de fonctionnement (adaptée de Hami et Radi, 2011)	12
2.2	Courbe en baignoire typique (adaptée de Bufferne, 2008)	14
2.3	Indicateurs de maintenance (tirée de Shahinez, 2011)	17
2.4	Système de configuration en série (tirée de Pham, 2006)	18
2.5	Système de configuration en parallèle (tirée de Pham, 2006)	18
2.6	Système de configuration mixte (tirée de Pham, 2006)	19
2.7	Graphique typique de la densité de probabilité d'une loi exponentielle	20
2.8	Graphique typique du taux de défaillance d'une loi exponentielle	21
2.9	Graphique typique de la densité de probabilité d'une loi normale	22
2.10	Graphique typique du taux de défaillance d'une loi normale	23
2.11	Graphique typique de la densité de probabilité d'une loi log-normale	24
2.12	Graphique typique du taux de défaillance d'une loi log-normale	25
2.13	Graphique typique de la densité de probabilité d'une loi de Weibull	26
2.14	Graphique typique du taux de défaillance d'une loi de Weibull	27
2.15	Processus de gestion de maintenance pour les équipements miniers mobiles	32
2.16	Types de maintenance (adaptée de Traoré, 2010)	33
2.17	Classification des approches de pronostic (adaptée de Ribot, 2009)	37
2.18	Temps entre les défaillances d'un équipement (adaptée de Ahmad et al., 2006)	39
2.19	Détérioration d'un système en fonction de l'âge (tirée de Tobias et Trindade, 2012)	43
2.20	Processus de branchement de Poisson (tirée de Rigdon et Basu, 2000)	48
2.21	Chargeuse-navette typique (tirée de Caterpillar Inc., 2011)	61
2.22	Pelle mécanique hydraulique typique (tirée de Caterpillar Inc., 2015)	63
2.23	Pelle à benne traînante typique (tirée de Caterpillar Inc., 2014)	65
3.1	Logique de méthodologie de maintenance (adaptée de Jardine et Tsang, 2013)	69
3.2	Processus de résolution (adaptée de Ascher et Feingold, 1984)	71
3.3	Graphiques des défaillances cumulatives en fonction du temps : (a) tendance croissante, (b) tendance décroissante, (c) sans tendance, (d) deux différentes périodes, (e) tendance non monotone (tirée de Louit et al., 2009)	73
3.4	Graphiques TTT : (a) tendance croissante, (b) tendance décroissante, (c) tendance non monotone (tirée de Louit et al., 2009)	73
3.5	Graphique des durées de vie successives (tirée de Louit et al., 2009)	77
4.1	Tables de la gestion de la maintenance intégrées dans JDE (fournie par AEM)	93
4.2	Interface de la gestion des interventions entrées/sorties	97

4.3	Logigramme de l'outil automatisé	99
4.4	Interface des tests de Laplace et du MIL-HDBK-189	101
4.5	Interface du test de Cramér-von Mises	101
4.6	Interface du test de corrélation de Pearson	102
4.7	Interface de l'estimation des paramètres des lois de probabilité	103
4.8	Interface du test de Kolmogorov-Smirnov	103
4.9	Interface d'accueil avec les résultats des analyses	104
4.10	Stratégie de maintenance prévisionnelle	117
4.11	Historique pour un actif et ses événements de maintenance	118
5.1	Principe de forage (tirée de Atlas Copco, 1982)	122
5.2	Principe de boulonnage (tirée de Tatiya, 2005)	123
5.3	Vue d'ensemble de la boulonneuse (fournie par AEM)	126
5.4	Vue d'ensemble du module arrière de la boulonneuse (fournie par AEM)	127
5.5	Vue en plan du module arrière de la boulonneuse (fournie par AEM)	127
5.6	Module de forage et de boulonnage (fournie par AEM)	128
5.7	Flèche (fournie par AEM)	128
5.8	Tête de boulonnage (fournie par AEM)	129
5.9	Avance de boulon (fournie par AEM)	129
5.10	Avance de foration (fournie par AEM)	130
5.11	Marteau perforateur ou foreuse (fournie par AEM)	130
5.12	Diagramme de la fréquence d'interventions [BO2102]	135
5.13	Diagramme de Pareto [BO2102]	135
5.14	Diagramme de la fréquence d'interventions [BO2103]	136
5.15	Diagramme de Pareto [BO2103]	136
5.16	Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO2102]	147
5.17	Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO2102]	147
5.18	Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO2103]	148
5.19	Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO2103]	148
5.20	Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO2102]	149
5.21	Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO2102]	149
5.22	Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO2103]	150
5.23	Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO2103]	150
5.24	Vue en élévation de la boulonneuse à plateforme (fournie par AEM)	151
5.25	Vue en plan de la boulonneuse à plateforme (fournie par AEM)	151
5.26	Vue de la boulonneuse à plateforme en opération (fournie par AEM)	152
5.27	Diagramme de la fréquence d'interventions [BO1111]	156
5.28	Diagramme de Pareto [BO1111]	156
5.29	Diagramme de la fréquence d'interventions [BO1112]	157
5.30	Diagramme de Pareto [BO1112]	157
5.31	Diagramme de la fréquence d'interventions [BO1113]	158
5.32	Diagramme de Pareto [BO1113]	158
5.33	Diagramme de la fréquence d'interventions [BO1114]	159
5.34	Diagramme de Pareto [BO1114]	159
5.35	Diagramme de la fréquence d'interventions [BO1115]	160
5.36	Diagramme de Pareto [BO1115]	160
5.37	Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1111]	182
5.38	Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO1111]	182
5.39	Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1112]	183
5.40	Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO1112]	183

5.41	Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1113]	184
5.42	Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO1113]	184
5.43	Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1114]	185
5.44	Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO1114]	185
5.45	Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1115]	186
5.46	Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO1115]	186
5.47	Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1111]	187
5.48	Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO1111]	187
5.49	Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1112]	188
5.50	Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO1112]	188
5.51	Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1113]	189
5.52	Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO1113]	189
5.53	Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1114]	190
5.54	Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO1114]	190
5.55	Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1115]	191
5.56	Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO1115]	191
5.57	Vue d'ensemble de la foreuse long trou (fournie par AEM)	192
5.58	Vue de la foreuse long trou en opération (fournie par AEM)	192
5.59	Vue en élévation du module arrière de la foreuse long trou (fournie par AEM)	193
5.60	Vue en plan du module arrière de la foreuse long trou (fournie par AEM)	193
5.61	Module de forage (fournie par AEM)	194
5.62	Flèche (fournie par AEM)	194
5.63	Changeur de tige (fournie par AEM)	195
5.64	Avance de la foreuse (fournie par AEM)	195
5.65	Marteau perforateur ou foreuse (fournie par AEM)	195
5.66	Diagramme de la fréquence d'interventions [FO2103]	199
5.67	Diagramme de Pareto [FO2103]	199
5.68	Diagramme de la fréquence d'interventions [FO2104]	200
5.69	Diagramme de Pareto [FO2104]	200
5.70	Diagramme de la fréquence d'interventions [FO2106]	201
5.71	Diagramme de Pareto [FO2106]	201
5.72	Diagramme de la fréquence d'interventions [FO2107]	202
5.73	Diagramme de Pareto [FO2107]	202
5.74	Fiabilité des sous-systèmes du module de forage [FO2103]	219
5.75	Fiabilité des sous-systèmes du chariot [FO2103]	219
5.76	Fiabilité des sous-systèmes du module de forage [FO2104]	220
5.77	Fiabilité des sous-systèmes du chariot [FO2104]	220
5.78	Fiabilité des sous-systèmes du module de forage [FO2106]	221
5.79	Fiabilité des sous-systèmes du chariot [FO2106]	221
5.80	Fiabilité des sous-systèmes du module de forage [FO2107]	222
5.81	Fiabilité des sous-systèmes du chariot [FO2107]	222
5.82	Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage [FO2103]	223
5.83	Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [FO2103]	223
5.84	Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage [FO2104]	224
5.85	Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [FO2104]	224
5.86	Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage [FO2106]	225
5.87	Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [FO2106]	225
5.88	Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage [FO2107]	226
5.89	Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [FO2107]	226

6.1	Temps optimal de remplacement (tirée de Dodson, 1994)	230
6.2	Cycle de la maintenance de type âge (tirée de Jardine et Tsang, 2013)	231
6.3	Possibilités du cycle de la maintenance de type âge (tirée de Jardine et Tsang, 2013)	231
6.4	Cycle de la maintenance de type bloc (tirée de Jardine et Tsang, 2013)	232
6.5	Stratégie d'optimisation de remplacement	238
6.6	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO2103]	241
6.7	Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse RDXXX [BO2103]	241
6.8	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1111]	242
6.9	Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse RDXXX [BO1111]	242
6.10	Temps de remplacement optimisé de type âge - boulonneuse HBXXX [BO1111]	243
6.11	Temps de remplacement optimisé de type bloc - boulonneuse HBXXX [BO1111]	243
6.12	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1112]	244
6.13	Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse RDXXX [BO1112]	244
6.14	Temps de remplacement optimisé de type âge - boulonneuse HBXXX [BO1112]	245
6.15	Temps de remplacement optimisé de type bloc - boulonneuse HBXXX [BO1112]	245
6.16	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1113]	246
6.17	Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse RDXXX [BO1113]	246
6.18	Temps de remplacement optimisé de type âge - boulonneuse HBXXX [BO1113]	247
6.19	Temps de remplacement optimisé de type bloc - boulonneuse HBXXX [BO1113]	247
6.20	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1114]	248
6.21	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1114]	248
6.22	Temps de remplacement optimisé de type âge - boulonneuse HBXXX [BO1114]	249
6.23	Temps de remplacement optimisé de type bloc - boulonneuse HBXXX [BO1114]	249
6.24	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1115]	250
6.25	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1115]	250
6.26	Temps de remplacement optimisé de type âge - boulonneuse HBXXX [BO1115]	251
6.27	Temps de remplacement optimisé de type bloc - boulonneuse HBXXX [BO1115]	251
6.28	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse HLXXX1 [FO2103]	252
6.29	Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse HLXXX1 [FO2103]	252
6.30	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse HLXXX1 [FO2104]	253
6.31	Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse HLXXX1 [FO2104]	253
6.32	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse HLXXX2 [FO2106]	254
6.33	Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse HLXXX2 [FO2106]	254
6.34	Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse HLXXX2 [FO2107]	255
6.35	Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse HLXXX2 [FO2107]	255
6.36	Temps de remplacement optimisé de type âge en fonction de différents ratios C_f/C_p	259
6.37	Temps de remplacement optimisé de type bloc en fonction de différents ratios C_f/C_p	259

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Liste des études de la fiabilité et de la maintenance des équipements miniers . . .	59
4.1	Champs nécessaires à la collecte de données	95
4.2	Validation du test de Laplace	106
4.3	Validation du test MIL-HDBK-189	108
4.4	Première validation du test de Cramér-von Mises	109
4.5	Deuxième validation du test de Cramér-von Mises	110
4.6	Validation des paramètres pour la distribution exponentielle	110
4.7	Validation des paramètres pour les distributions normale, log-normale et Weibull	111
4.8	Première validation du test de Kolmogorov-Smirnov	111
4.9	Deuxième validation du test de Kolmogorov-Smirnov	112
4.10	Première validation des paramètres du processus de Poisson non homogène	112
4.11	Deuxième validation des paramètres du processus de Poisson non homogène	112
4.12	Validation du coefficient de corrélation	113
4.13	Validation des paramètres du processus de branchement de Poisson	114
4.14	Validation de la fiabilité avec approches classique et bayésienne	115
5.1	Classement des équipements miniers mobiles en fonction de leur criticité	120
5.2	Équipements miniers mobiles sélectionnés	121
5.3	Informations techniques et classement des sous-systèmes de la boulonneuse	131
5.4	Modes de défaillance récurrents des composants de la boulonneuse	132
5.5	Calcul numérique du test de tendance [BO2102]	138
5.6	Calcul numérique du test de tendance [BO2103]	139
5.7	Calcul numérique du test de dépendance [BO2102]	140
5.8	Calcul numérique du test de dépendance [BO2103]	141
5.9	Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO2102]	142
5.10	Modèle, estimation des paramètres et MTBF [BO2103]	143
5.11	Résumé de la fiabilité de la flotte de boulonneuses	146
5.12	Informations techniques et classement des sous-systèmes de la boulonneuse à plateforme	152
5.13	Modes de défaillance récurrents des composants de la boulonneuse à plateforme	154
5.14	Calcul numérique du test de tendance [BO1111]	162
5.15	Calcul numérique du test de tendance [BO1112]	163
5.16	Calcul numérique du test de tendance [BO1113]	164
5.17	Calcul numérique du test de tendance [BO1114]	165
5.18	Calcul numérique du test de tendance [BO1115]	166
5.19	Calcul numérique du test de dépendance [BO1111]	167
5.20	Calcul numérique du test de dépendance [BO1112]	168
5.21	Calcul numérique du test de dépendance [BO1113]	169
5.22	Calcul numérique du test de dépendance [BO1114]	170
5.23	Calcul numérique du test de dépendance [BO1115]	171
5.24	Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO1111]	172
5.25	Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO1112]	173

5.26	Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO1113]	174
5.27	Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO1114]	175
5.28	Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO1115]	176
5.29	Résumé de la fiabilité de la flotte de boulonneuses à plateforme	181
5.30	Informations techniques et classement des sous-systèmes de la foreuse long trou	196
5.31	Modes de défaillance récurrents des composants de la foreuse long trou	197
5.32	Calcul numérique du test de tendance [FO2103]	204
5.33	Calcul numérique du test de tendance [FO2104]	205
5.34	Calcul numérique du test de tendance [FO2106]	206
5.35	Calcul numérique du test de tendance [FO2107]	207
5.36	Calcul numérique du test de dépendance [FO2103]	208
5.37	Calcul numérique du test de dépendance [FO2104]	209
5.38	Calcul numérique du test de dépendance [FO2106]	210
5.39	Calcul numérique du test de dépendance [FO2107]	211
5.40	Loi, estimation des paramètres et MTBF [FO2103]	212
5.41	Loi, estimation des paramètres et MTBF [FO2104]	213
5.42	Loi, estimation des paramètres et MTBF [FO2106]	214
5.43	Loi, estimation des paramètres et MTBF [FO2107]	215
5.44	Résumé de la fiabilité de la flotte de foreuses long trou	218
6.1	Maintenance préventive actuelle et ratio des coûts des composants critiques	237
6.2	Loi, estimation des paramètres et temps de remplacement	256
6.3	Résumé du temps de remplacement optimal	260

LISTE DES SYMBOLES

Alphabet latin

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
$A(t)$	fonction de disponibilité
C_b	coût de la panne (\$)
C_f	coût total de la maintenance corrective (\$)
C_I	coût d'inaction (\$)
C_L	coût de la main-d'œuvre (\$)
C_m	coût de la réparation minimale (\$)
C_M	expression du test de Cramér-von Mises, coût du matériel (\$)
C_o	coût de la réparation (\$)
C_p	coût total de la maintenance préventive (\$)
C_r	coût de remplacement (\$)
D_n	expression du test de Kolmogorov-Smirnov
erf	fonction d'erreur
erfc	fonction d'erreur complémentaire
$\mathbb{E}(X)$	espérance mathématique d'une variable aléatoire
$f(t)$	fonction de densité ou densité de probabilité
$F(t)$	fonction de répartition ou fonction de défaillance
H_0	hypothèse statistique nulle
H_1	hypothèse statistique alternative
$I(\gamma)$	information de Fisher
k	nombre d'intervalles, paramètre de forme
$L(x, \theta)$	fonction de vraisemblance

L_p	coût du déficit engendré par l'inaction de l'équipement (\$)
$m(t)$	fonction du taux d'occurrence de défaillances ou fonction d'intensité
$M(t)$	fonction de maintenabilité, espérance du nombre prévu de défaillances
MH	expression statistique du test MIL-HDBK-189
n	nombre de défaillances
\hat{n}	nombre de défaillances selon le type de censure
N	nombre de défaillances
\mathcal{N}	loi normale
$Log-\mathcal{N}$	loi log-normale
$p(\gamma)$	distribution antérieure ou <i>a priori</i>
$p(\gamma t)$	distribution postérieure ou <i>a posteriori</i>
$\mathbb{P}(X)$	probabilité d'une variable aléatoire
r	coefficient de corrélation de Pearson
$R(t)$	fonction de fiabilité
R	nombre d'arrangements inverses, nombre de réparations
S	loi de Student, somme des carrés des erreurs
t	temps (h)
t_i	temps de la i^e défaillance (h)
t_p	temps préventif optimal (h)
T	temps (h), temps total du test (h)
T_a	temps initial de l'intervalle d'observation (h)
T_b	temps final de l'intervalle d'observation (h)
T_n	temps observé sur la dernière défaillance (h)
T_{50}	valeur médiane de la fonction log-normale (h)
$V(X)$	variance d'une variable aléatoire
x_i	variable aléatoire de la i^e défaillance
Z	expression statistique de la loi normale centrée réduite
Z_L	expression statistique du test de Laplace
Z_p	expression statistique du test de l'arrangement inverse

Alphabet grec

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
α	paramètre d'échelle, seuil de signification
$\bar{\alpha}$	paramètre d'échelle non biaisé
β	paramètre de forme, paramètre d'intensité
$\bar{\beta}$	paramètre de forme non biaisé
γ	fonction gamma incomplète, ensemble d'estimateurs
Γ	fonction gamma
Δ	différence entre deux grandeurs
θ	ensemble d'estimateurs
λ	paramètre d'intensité
$\lambda(t)$	fonction du taux de défaillance, fonction d'intensité de la loi de puissance
Λ	logarithme népérien de la fonction de vraisemblance
μ	espérance
$\mu_{\ln t}$	espérance basée sur une échelle de temps logarithmique
ν	degré de liberté
σ	écart type
$\sigma_{\ln t}$	écart type basé sur une échelle de temps logarithmique
ϕ	fonction de probabilité de la distribution normale standard
Φ	fonction de probabilité cumulée de la distribution normale standard
χ^2	loi du khi carré, expression statistique du test du khi carré

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

	Expression anglaise	Expression française
AEM	<i>Agnico Eagle Mines Limited</i>	Mines Agnico Eagle Limitée
AMSAA	<i>Army Materiel Systems Analysis Activity</i>	-
BPP	<i>Branching Poisson Process</i>	Processus de branchement de Poisson
BT	<i>Work Order</i>	Bon de travail
CM	<i>Corrective Maintenance</i>	Maintenance corrective
CBM	<i>Condition-based Maintenance</i>	Maintenance conditionnelle
HPP	<i>Homogeneous Poisson Process</i>	Processus de Poisson homogène
i.d.d.	<i>Independent and Identically Distributed</i>	Indépendant et identiquement distribué
JDE	<i>JD Edwards</i>	-
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>	Indicateur clé de performance
LHD	<i>Load, Haul, Dump Machine</i>	Chargeuse-navette
LSM	<i>Least Squares Method</i>	Méthode des moindres carrés
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation</i>	Estimation du maximum de vraisemblance
MDT	<i>Mean Down Time</i>	Temps moyen d'indisponibilité
MUT	<i>Mean Up Time</i>	Temps moyen de fonctionnement après réparation
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>	Temps moyen entre défaillances
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i>	Temps moyen de fonctionnement avant défaillance
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>	Temps moyen de réparation
NHPP	<i>NonHomogeneous Poisson Process</i>	Processus de Poisson non homogène
PM	<i>Preventive Maintenance</i>	Maintenance préventive
PHM	<i>Proportional Hazards Model</i>	Modèle à risque proportionnel

RP	<i>Renewal Process</i>	Processus de renouvellement
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>	Maintenance basée sur la fiabilité
ROCOF	<i>Rate of Occurrence of Failures</i>	Taux d'occurrence de défaillances
SMM	<i>Strategic Maintenance Management</i>	Gestion stratégique de la maintenance
TBF	<i>Time Between Failures</i>	Temps de bon fonctionnement
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>	Maintenance productive totale
TTR	<i>Time to Repair</i>	Temps technique de réparation
TTT	<i>Total Time on Test</i>	Temps total sur le test
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>	Visual Basic pour applications

GLOSSAIRE

Défaillance. Perte de l'aptitude à fonctionner tel que requis.

Disponibilité. Aptitude à être en état de fonctionner tel que requis.

Entité. Sujet que l'on considère comme une pièce isolée, un composant, un dispositif, une unité fonctionnelle, un équipement, un sous-système ou un système.

Fiabilité. Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné.

Maintenabilité. Aptitude à être maintenu ou rétabli dans un état permettant de fonctionner tel que requis, dans des conditions données d'utilisation et de maintenance.

Maintenance. Combinaison de toutes les actions techniques et administratives, destinées à maintenir ou à remettre une entité dans un état lui permettant d'accomplir la fonction requise.

Maintenance conditionnelle. Maintenance préventive reposant sur l'évaluation de la condition physique.

Maintenance corrective. Maintenance effectuée après une détection de panne pour procéder à un rétablissement.

Maintenance prédictive. Maintenance basée sur une prévision de l'état futur d'une entité établie par estimation ou calcul à partir d'un ensemble défini de données d'historique et de paramètres opérationnels futurs connus.

Maintenance préventive. Maintenance effectuée pour limiter la dégradation et réduire la probabilité de défaillance.

Mode de défaillance. Manière selon laquelle une défaillance se produit.

Panne. Inaptitude à fonctionner tel que requis, due à un état interne.

Période d'observation. Intervalle de temps (temps calendaire) entre le début et la fin de la collecte de données.

Taux de défaillance. Probabilité conditionnelle par unité de temps pour que la défaillance de l'entité se produise entre les instants t et $t + \Delta t$.

Temps de fonctionnement. Intervalle de temps pendant lequel une entité est dans un état de fonctionnement. La durée du temps de fonctionnement peut être exprimée en unités appropriées à l'entité concernée [...] : temps calendaire, cycles de fonctionnement, distance couverte.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

L'industrie minière canadienne est un secteur essentiel à la vigueur économique du pays. À l'échelle internationale, le Canada est l'un des pays les plus importants dans la production minérale, avec ses quelques 60 minéraux et de métaux, qu'il exporte dans plus d'une centaine de pays à travers le monde ([Ressources naturelles Canada, 2019](#)). L'industrie se distingue par une exploitation vaste et diversifiée telle que vue par l'emplacement géographique des grappes et des régions d'exploitation minérale à la figure 1.1. Le secteur des mines et de la fabrication de produits minéraux englobe les mines métalliques, non métalliques et de charbon, l'extraction des sables bitumineux ainsi que les activités des fonderies, des affineries et des usines de fabrication ([Association minière du Canada, 2019](#)).

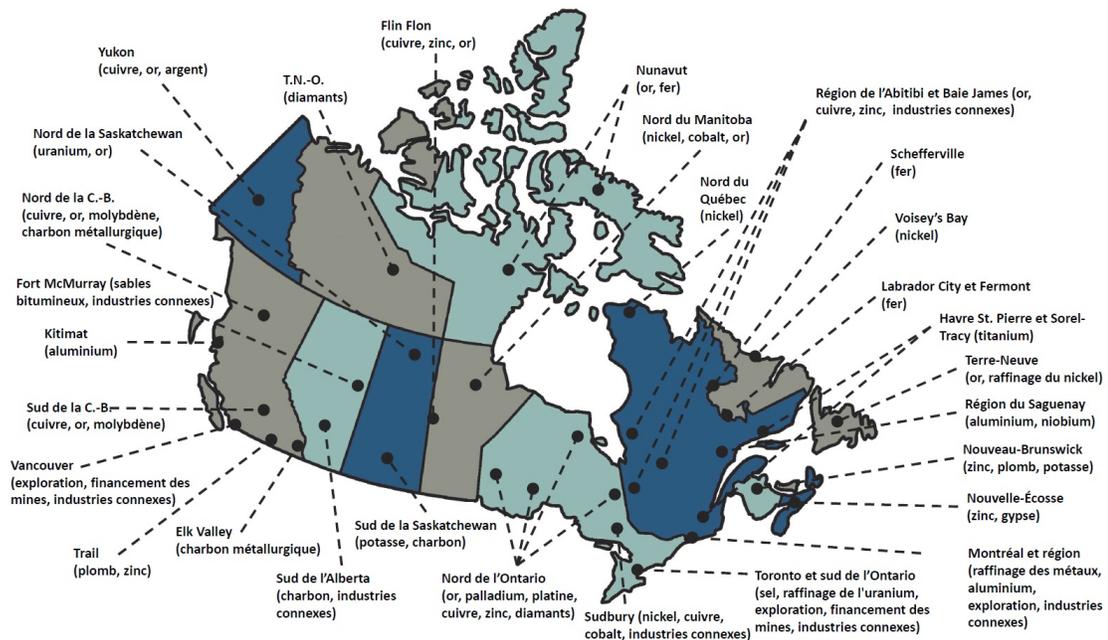


Figure 1.1: Emplacement géographique des grappes de l'industrie minière et des régions d'exploitation minérale au Canada (tirée de [Association minière du Canada, 2019](#))

Dans le processus d'extraction et de transformation du minerai, l'emploi de diverses machineries est essentiel afin de maximiser la production. Par conséquent, l'efficacité de ces équipements constitue un des facteurs essentiels qui caractérisent la compétitivité et la rentabilité des compagnies minières. Or, comme ces équipements miniers sont exposés à des opérations de maintenance servant à rétablir le bon fonctionnement, la gestion des contraintes et des coûts dus aux défaillances représente un défi de taille. Les coûts des maintenances peuvent représenter de 20 % à 35 %, voire plus, du budget total d'une mine souterraine typique (Hall et Daneshmend, 2003a). Au cours des dernières années, les études menées sur des équipements miniers en lien avec la maintenance (voir sect. 2.9) indiquent d'ailleurs que les sociétés minières sont stimulées à trouver des stratégies adéquates dans le but d'améliorer et d'optimiser la performance globale de ces machines (Samanta et al., 2000). Les théories et les concepts de l'analyse de la fiabilité (voir sect. 2.1) sont notamment progressivement employés comme outils de planification des maintenances dans le secteur des mines (Vagenas et al., 1997). À cet égard, la maintenance basée sur la fiabilité permet une amélioration de la performance des équipements miniers en élaborant des stratégies de maintenance appropriées pour les composants critiques et ainsi économiser sur plusieurs aspects, tels que la gestion de la logistique et les réparations inutiles.

Toutefois, les problèmes liés aux défaillances et au bon maintien des équipements miniers sont variés, et les systèmes sont de plus en plus complexes et imposants pour être traités de manière globale par les mines actuelles (Dhillon, 2008). En plus, l'exploitation d'un gisement en grande profondeur se déroule dans un environnement souvent hostile. Depuis le début du XXI^e siècle, ce contexte est d'autant plus vrai : l'exploitation minière souterraine a continué de progresser à des niveaux plus profonds, une situation causée par l'épuisement progressif et inévitable des ressources minérales à des niveaux moindres (Ranjith et al., 2017). Pour poursuivre ses activités, le rendement d'un équipement de production dépend de différents facteurs tels que la fiabilité de la machine, de l'environnement minier qui l'entoure, de l'efficacité de la maintenance et du processus d'opération (Barabady, 2005). Il faut ajouter le fait que la collecte de données nécessaires aux suivis provient de multiples sources d'informations, chacune avec ses contextes d'exploitation et d'utilisation spécifiques. De plus, une bonne conception de la stratégie de maintenance exige une détermination avec précision de tous les paramètres clés sur une longue période de temps (Murthy et al., 2002). Ces paramètres importants comprennent, entre autres, la compréhension de la gestion de maintenance des équipements, la collecte adéquate d'informations, la construction de modèles conséquents aux actions de maintenance et le diagnostic de l'état des équipements.

Cet ensemble de circonstances s'applique à la mine LaRonde de la société Mines Agnico Eagle Limitée (AEM). Le site minier est situé près de la municipalité de Preissac dans la région de l'Abitibi, à mi-chemin entre les villes de Val-d'Or et de Rouyn-Noranda (*voir fig. 1.2*). Agnico Eagle est une entreprise minière canadienne qui se spécialise dans l'extraction, la transformation et la production d'or. L'évolution de la société minière a été fulgurante : elle est passée en quelques années d'une exploitation minière aurifère régionale située dans le nord-ouest du Québec, à un producteur mondial dont les activités sont présentes à travers plusieurs exploitations et projets miniers, réparties au Canada, au Mexique et en Finlande (Davies, 2017).



Figure 1.2: Vue aérienne du complexe minier de LaRonde avec l'usine de traitement, le puits Penna et le parc à résidus miniers (tirée de [Agnico Eagle, 2019](#))

En production depuis 1988, la mine LaRonde est le complexe minier phare de l'entreprise Agnico Eagle avec plus de 1 300 employés et entrepreneurs, pour une production moyenne de 7000 tonnes par jour. Le gisement aurifère de la mine LaRonde, l'un des plus grands au Canada, est caractérisé par un complexe de lentilles de sulfures massifs de classe mondiale. Les gisements de la propriété minière se situent à l'extrémité du corridor est-ouest du camp minier de Cadillac (Doyon-Bousquet-LaRonde) formé par le groupe volcanique Blake River ([Doucet et Lafrance, 2005](#)). La plupart des activités minières à LaRonde sont centrées sur deux zones d'exploitation, où ces dernières contiennent plus de 90 % des réserves ([Mercier-Langevin, 2011](#)).

En complément à ces gisements, il faut ajouter la nouvelle exploitation provenant de la zone 5 (LZ5). Située à proximité de la propriété minière LaRonde (voir fig. 1.3), la zone de production de LZ5 a débuté en 2018 avec des réserves minérales prouvées et probables à 681 000 onces d'or. À ce jour, la mine et l'usine de traitement ont produit plus de 6 millions d'onces d'or et autres sous-produits monnayables, tels que l'argent, le cuivre, le plomb et le zinc (Agnico Eagle, 2019).

Les chantiers miniers de LaRonde comprennent un système de rampes qui mesure 25 km de long et la distance des galeries d'accès et des voies souterraines est d'au moins 125 km (Davies, 2017). Deux méthodes de minage sont employées à la mine LaRonde, soit par chantiers ouverts longitudinaux et transversaux (Martel, 2016). Les chantiers longitudinaux utilisés sont systématiquement remblayés par remblai cimenté ou en pâte. Minés avec une avancée en chevron, les chantiers transversaux primaires (première passe) sont remblayés avec du remblai cimenté ou en pâte et les chantiers transversaux secondaires récupérés (seconde passe) sont remblayés avec du remblai rocheux ou en pâte à faible pourcentage (Martel, 2016).

Débutée en 2011, la production récente provenant de la partie profonde du gisement, située à plus de 3000 m sous terre (voir fig. 1.3), prolongera la durée de vie actuelle de la mine au-delà de 2025 (Agnico Eagle, 2019). La construction du dernier puits permet à la mine d'extraire des réserves situées au-dessous du niveau 245, soit 2450 m sous terre. En parallèle, des travaux de forage s'effectuent afin d'évaluer le potentiel d'accroissement des réserves minérales et la possibilité d'extraire le minerai à une profondeur de plus de 3500 m sous terre (Agnico Eagle, 2019). Tel que mentionné en préambule, l'exploitation d'un gisement à grande profondeur n'est pas sans conséquence, notamment : la température peut atteindre plus de 40 °C et l'humidité est extrême. De ce fait, l'aménagement d'unités souterraines de climatisation a été nécessaire afin d'assurer une aération et un milieu de travail convenable pour les mineurs. D'ailleurs, le prolongement des galeries à cette profondeur est formé par une roche plus dure et cassante, nécessitant un meilleur support de terrain (Davies, 2017). Combinées à des contraintes *in situ*, estimées à plus de 105 MPa à partir du niveau 245, les excavations proches du gisement présentent des degrés de compression élevés, où la fermeture totale peut dépasser plusieurs dizaines de centimètres en quelques mois (Mercier-Langevin, 2011). De plus, il faut tenir compte des dangers de déplacement pour les travailleurs, ainsi que de la complexité logistique pour la mobilité des équipements et l'acheminement du matériel nécessaire. Conséquemment, l'extension du complexe minier de LaRonde est un projet hors du commun avec de nombreux défis à surmonter, et cela dans diverses sphères d'activités qui englobent l'exploration et la production.

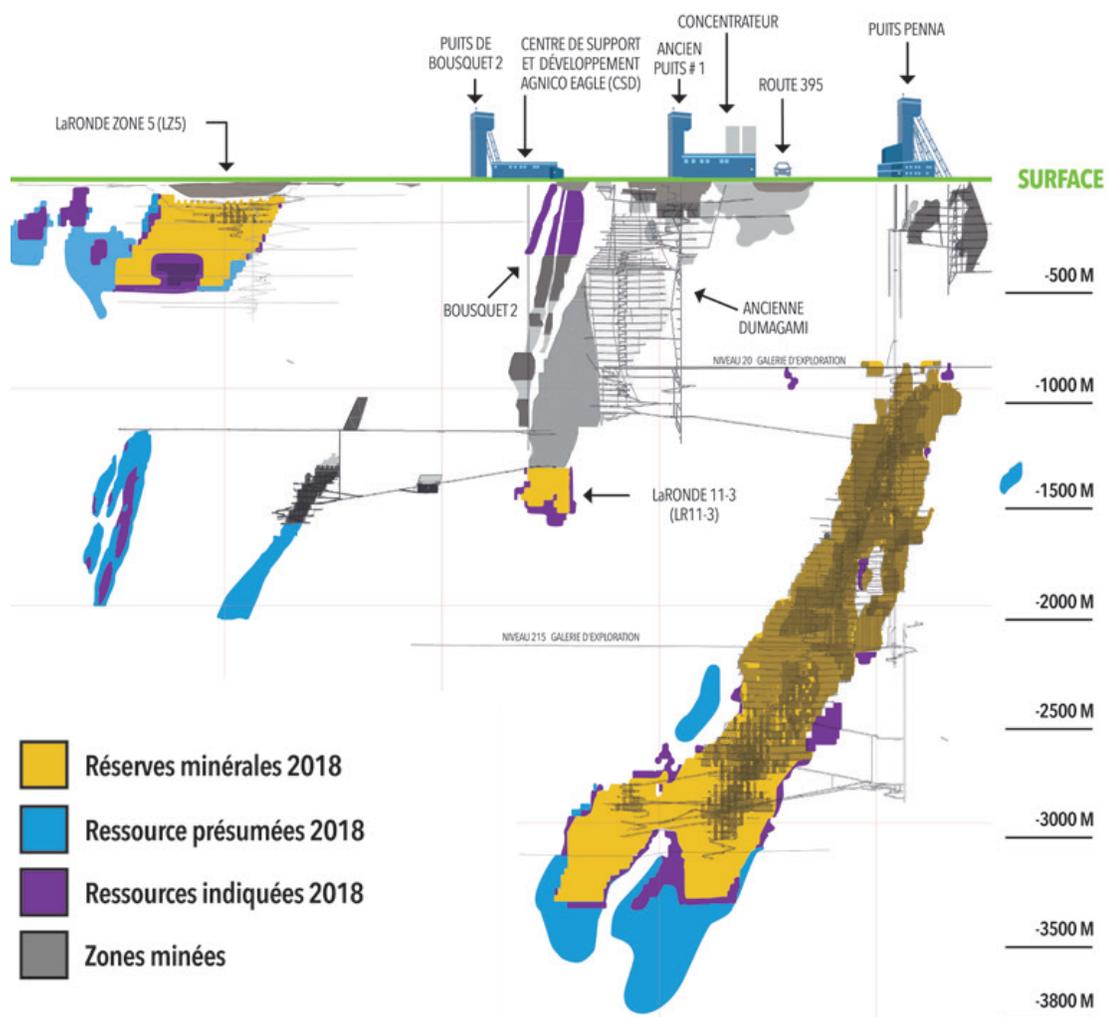


Figure 1.3: Vue longitudinale des gisements du complexe minier de LaRonde (tirée de [Agnico Eagle, 2019](#))

1.2 Problématique

Comme cela a été discuté précédemment, l'exploitation d'une mine exige l'utilisation d'un nombre important d'équipements mécaniques dits fixes (p. ex. pompe, compresseur) et dits mobiles (p. ex. foreuse, chargeuse-navette). Un des rôles du département de maintenance d'une société minière est de réduire le nombre de défaillances et les temps d'arrêt de ces équipements. Puisque chaque équipement nécessite des maintenances spécifiques, cela complexifie le processus de suivi étant donné la grande présence d'équipements à gérer. Dans le contexte de la mine partenaire, il faut interroger manuellement le système de base de données afin de réaliser un suivi des maintenances et obtenir les informations jugées pertinentes à la prise de décision. La base de données contient des renseignements sur les équipements, les maintenances, l'inventaire, les commandes générées, etc. Cependant, la gestion et la navigation à travers ce grand volume de données peuvent rendre l'accès à l'information difficile, donc la base de données n'est pas exploitée à son plein potentiel. De ce fait, le manque d'informations disponibles sur les maintenances en temps réel amène les intervenants à prendre des décisions parfois non éclairées. De plus, la pression exercée pour que la production minière se poursuive contraint le personnel de maintenance à remettre la machine en panne à l'état de fonctionnement le plus rapidement possible. Diverses questions liées à cette prémisse ont été soulevées autour de la gestion de la maintenance. Entre autres :

- *Comment obtenir des statistiques sur la maintenance de façon simple et rapide ?*
- *Quel est l'état de la fiabilité des équipements et de leurs composants en temps réel ?*
- *Quels sont la durée de vie moyenne et le meilleur temps de remplacement pour un composant présent dans l'équipement ?*
- *Quelle est approximativement la durée de vie résiduelle d'un composant présent dans l'équipement ?*

Les éléments de réponses sont reliés au sujet de recherche présenté, soit la mise en place d'un procédé qui génère des statistiques de fiabilité et de maintenance pour les équipements miniers et leurs composants. Ces informations sont essentielles afin de prévoir les futures maintenances et déceler les anomalies dans les interventions, le cas échéant.

1.3 Objectifs

Dans le cadre de cette proposition de recherche, l'objectif principal est de développer un outil automatisé qui évalue la performance des équipements miniers existants, en guidant la prise de décision pour les maintenances anticipées des composants présents dans ces équipements. Le système de base de données Oracle® JD Edwards intégré dans l'entreprise est pris en considération pour mettre en place les méthodologies proposées. L'implantation de l'outil automatisé comme stratégie de maintenance prévisionnelle a pour bienfait d'assurer une durée de vie supérieure aux équipements et leurs composants, d'optimiser les activités de maintenance et de réduire les coûts associés au budget de maintenance.

1.3.1 Objectifs à long terme

À long terme, la recherche permettra d'atteindre les objectifs suivants :

- optimiser la planification des maintenances des équipements miniers ;
- prévenir la défaillance des équipements miniers, mieux estimer la qualité de leurs composants et améliorer les processus opérationnels ;
- augmenter la durée de vie des équipements miniers tout en minimisant les coûts de maintenance et en améliorant la productivité.

1.3.2 Objectifs spécifiques et méthodologies

Pour parvenir aux objectifs à long terme énoncés ci-dessus, les méthodologies à mettre en œuvre dans le cadre des activités de recherche sont centrées sur trois objectifs spécifiques et basées sur des approches mathématiques, numériques et expérimentales. Le premier objectif spécifique tient compte de l'étude du système de maintenance existant de la mine partenaire et de la compréhension de l'environnement associé aux équipements miniers en opération. Dans cette activité, une étude associée aux maintenances des équipements et de leurs composants est essentielle afin d'établir une méthode d'optimisation efficace. La compréhension du système de maintenance, en relation avec l'étude de la base de données, permet d'atteindre les tâches requises à la réalisation de la recherche.

Entre autres :

- répertorier les outils logiciels disponibles et adapter une démarche méthodologique selon les limites existantes ;
- classer les équipements critiques et analyser leurs documentations techniques, ainsi que leurs historiques ;
- servir aux études de cas, qui englobent l'analyse de la fiabilité par la modélisation des algorithmes de résolution et l'analyse technique des coûts de maintenance.

Le second objectif spécifique est la conception et le développement de l'outil automatisé par l'approche fiabiliste. Cette activité a pour but d'élaborer une interface qui apporte un soutien aux prises de décision concernant les maintenances futures des équipements miniers et de leurs composants, en tenant compte des statistiques générées et en établissant leur durée de vie moyenne. Le développement de l'outil se base sur le recensement de l'historique des interventions que les équipements ont subies au cours de leur vie utile. Compte tenu des caractéristiques des données exploitées, les algorithmes de résolution font appel aux modèles stochastiques, ainsi qu'à divers tests d'adéquation pour l'obtention des résultats afin de prévoir les scénarios et les stratégies les plus adéquats pour la maintenance. Cette solution considère les points suivants :

- exploiter et maximiser efficacement les informations contenues dans la base de données ;
- établir le modèle de survie caractérisant les données de défaillance des équipements grâce à des outils statistiques documentés et liés aux théories de la fiabilité et de la maintenance ;
- afficher des indicateurs de fiabilité et de maintenance pour les données de défaillance des équipements par une interface conviviale (fonction de fiabilité, densité de probabilité, taux de défaillance, durée de vie moyenne, dernière mise à jour des interventions).

Le troisième objectif spécifique examine en détail les modes de défaillance et la fiabilité des sous-systèmes d'équipements miniers sélectionnés, en tenant compte des algorithmes de résolution développés. À la suite des recherches effectuées précédemment, cette activité propose également des alternatives d'optimisation lors des actions de maintenance réalisées pour des composants critiques. À partir des critères économiques, statistiques et temporels, il est possible de rechercher la fréquence de maintenance optimale qui minimise les coûts et qui maximise la disponibilité.

1.4 Originalité de la recherche

L'originalité de cette thèse provient d'un projet unique qui tient compte d'un procédé automatisant la modélisation des interventions sur les équipements miniers par des processus stochastiques et leurs résolutions associées. De plus, cette recherche documente et emploie des méthodes moins conventionnelles telles que le processus de branchement de Poisson et l'approche bayésienne non informative. L'outil mis en place sert de dispositif d'aide à la décision pour les maintenances prévisionnelles qui proviennent de données réelles fournies par le partenaire industriel. Pour la gestion des maintenances, l'implantation d'un procédé basé sur la capacité à approximer le temps de dégradation de composants d'équipement en fonction de modèles fiabilistes est peu commun dans l'industrie minière (Ghodrati et al., 2017). L'avantage de l'outil logiciel réside dans l'intégration globale des méthodes nécessaires pour une analyse rapide des données d'interventions des équipements. D'ailleurs, les algorithmes programmés apportent une gestion simplifiée en minimisant les actions manuelles, de la collecte de données jusqu'à l'obtention des résultats. La stratégie de maintenance prévisionnelle proposée dans cette thèse est applicable à l'évaluation de la fiabilité et l'optimisation des maintenances de tous les équipements miniers ayant des enregistrements de temps de bon fonctionnement.

Dans une approche plus globale de la recherche, cette thèse contribue à l'étude de la fiabilité d'équipements mobiles miniers cruciaux et pertinents, mais peu documentés dans la revue de littérature. Cette sélection comprend des machines telles que la foreuse long trou, la boulonneuse et la boulonneuse à plateforme. À partir d'équipements présents à la mine partenaire, les sous-systèmes défaillants sont décortiqués et une étude approfondie est réalisée en ciblant les pannes récurrentes. Les résultats de cette thèse sont pertinents pour l'évaluation comparative des machines minières grâce à une meilleure connaissance des éléments les plus faibles dans l'observation individuelle des sous-systèmes sur la performance globale de la flotte. Dans ce contexte, l'enquête de la fiabilité sur les divers équipements devient importante pour le département de maintenance par rapport à leurs propres exigences et en vue de futures transactions avec les fournisseurs d'équipements ou de composants. Ainsi, les conclusions tirées à la suite de ces études permettront de mieux prévenir les défaillances de ces équipements en appliquant des stratégies de maintenance appropriées.

Les contributions de cette recherche ont fait l'objet de publications scientifiques évaluées avec comité de lecture et sont accessibles à la fin du document (*voir [publications](#)*).

1.5 Contenu de la thèse

En incluant la présente introduction, le corps de cette thèse se divise en **sept (7) chapitres** :

Le **chapitre introductif** présente la mise en contexte, la problématique liée à la gestion de la maintenance des équipements miniers, les objectifs définis et l'originalité de cette recherche.

Le **deuxième chapitre** traite de la revue de littérature en relation avec la théorie de la recherche. Dans les premières sections, les thèmes suivants sont abordés : les notions de la fiabilité et de la maintenance, l'interprétation des lois de probabilité, la gestion stratégique de la maintenance, la définition du programme de maintenance dans un contexte minier, les types de maintenance, les méthodes pour les approches de pronostics et la spécification des modèles stochastiques par la résolution des données provenant d'entités réparables et non réparables. La dernière partie de ce chapitre synthétise les études réalisées dans le contexte de la fiabilité et de la maintenance des équipements miniers.

Dans le **troisième chapitre**, des explications détaillées sont fournies sur la démarche méthodologique. Les sections englobent les théories et les équations nécessaires aux méthodes pour recueillir et analyser les données de défaillances avec, entre autres, l'intégration des processus stochastiques vus au chapitre 2, l'application des tests de tendance et de dépendance avec leurs hypothèses, la procédure de linéarisation des lois de probabilité et les tests d'ajustements.

Le **quatrième chapitre** traite de l'architecture adoptée pour le développement de l'outil automatisé par le logiciel Excel®, relié au portail ReportsNow®. Ces algorithmes sont par la suite intégrés et validés afin d'établir le modèle probabiliste d'une entité. De plus, un processus de pronostic est proposé (aide à la décision) afin d'anticiper les maintenances prévisionnelles.

Au **cinquième chapitre**, des études sont effectuées sur les flottes d'équipements critiques sélectionnées par l'exposition des modes de défaillance et la synthèse des résultats dans le cadre des analyses avec l'approche non paramétrique et l'approche fiabiliste.

Le **sixième chapitre** a pour objectif d'observer le modèle de maintenance qui optimise le remplacement des composants critiques selon le temps préventif établi et les coûts actuels d'entretien.

La thèse se termine avec le **septième chapitre** qui contient les conclusions des travaux réalisés, ainsi que des recommandations et des perspectives pour les recherches futures.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Sommaire : Ce chapitre fait une introspection de la revue de littérature axée sur le sujet de recherche. La section initiale résume les notions de la sûreté de fonctionnement. La deuxième section interprète les lois de probabilité. La troisième section aborde de façon générale la gestion de la maintenance et est suivie par la description du programme de maintenance adopté à la mine partenaire. Ensuite, les types de maintenance sont présentés, tout en introduisant la notion de pronostic et ses approches distinctes. La section qui suit traite des divers modèles stochastiques et des méthodes applicables pour obtenir les indicateurs de sûreté de fonctionnement. Le chapitre se termine sur les études existantes dans le domaine de la fiabilité et de la maintenance des équipements miniers.

2.1 Sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est la science qui englobe les aptitudes nécessaires au bon maintien de la qualité d'un service dans le temps. Telle qu'elle est vue à la figure 2.1, la sûreté de fonctionnement fait appel à quatre concepts : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité. Selon la définition des auteurs [Hami et Radi \(2011, p. 1\)](#), la sûreté de fonctionnement « consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des systèmes ». Elle joue un rôle important dans l'exécution des étapes menant à l'amélioration de la maintenance. La compréhension de ces concepts est essentielle afin de modéliser l'état d'une entité et, en fonction de ce dernier, de mettre en place des scénarios de maintenance admissibles. Une entité est définie comme « tout élément, composant, sous-système, système, dispositif, équipement, unité fonctionnelle que l'on peut considérer individuellement » ([Villemeur, 1988, p. 726](#)). Dans les conditions données, une entité est conçue pour accomplir une fonction requise et sa performance est quantifiée par le service rendu. La durée de vie d'une entité, qui comporte plusieurs états de fonctionnement, se mesure par le nombre d'heures ou le nombre de cycles durant lesquels elle a opéré. Par ailleurs, dans son cycle d'opération, elle est susceptible d'être en défaillance, c'est-à-dire la « perte de l'aptitude à fonctionner tel que requis » ([ISO, 2016, p. 6](#)).

Le concept de sécurité est la probabilité d'une entité à respecter, pendant sa durée de vie utile, un niveau acceptable de risques d'accident susceptible de causer un événement inacceptable (Hami et Radi, 2011). Dans les faits, la notion de sécurité est très actuelle dans l'exploitation minière, où les environnements de travail sont parmi les plus dangereux en raison de leurs accidents (Groves et al., 2007). Ces événements fortuits ont diverses causes, dont l'effondrement de galeries de mines, les inondations et les accidents dus à des systèmes mécaniques défectueux (Dhillon, 2010). De plus, il ne faut pas négliger le risque potentiel d'incendies créé par les défauts des équipements : le feu est un ennemi pour la sécurité du personnel minier, en particulier quand il se produit dans les zones confinées telles que les mines souterraines. Les concepts généraux de la sûreté de fonctionnement tels que la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité servent à définir les théories et les équations présentes dans ce chapitre.

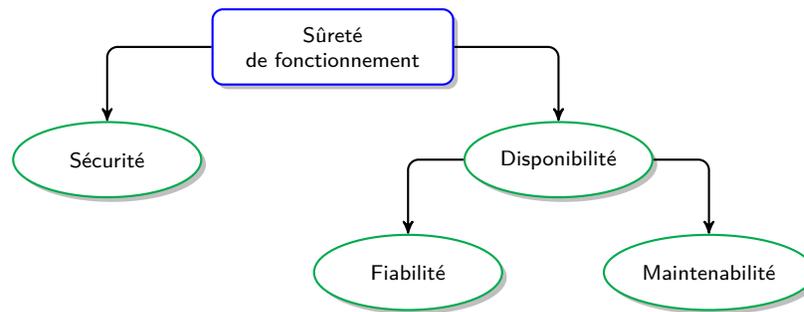


Figure 2.1: Concepts de la sûreté de fonctionnement (adaptée de Hami et Radi, 2011)

2.1.1 Densité de probabilité

Appliquée à une variable aléatoire continue dans le temps T , la densité de probabilité $f(t)$ est la probabilité de défaillance entre t et $t + \Delta t$ (Høyland et Rausand, 2004) :

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbb{P}[t < T \leq t + \Delta t]}{\Delta t} \quad (2.1)$$

La fonction de densité $f(t)$ est représentée par la dérivée de la fonction de répartition $F(t)$ ou par la dérivée négative de la fonction de fiabilité $R(t)$:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2.2)$$

2.1.2 Fonction de fiabilité

La fiabilité représente la probabilité « d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné » (ISO, 2016, p. 15). La fonction de fiabilité $R(t)$ est l'intégrale de la densité de probabilité $f(t)$ (Høyland et Rausand, 2004) :

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x)dx \quad (2.3)$$

2.1.3 Fonction de répartition

La fonction de répartition $F(t)$, nommée parfois fonction de défaillance, est la somme cumulée de la densité de probabilité $f(t)$ représentant la distribution de la durée de vie. Elle est aussi le complément de la fiabilité $R(t)$ (Tobias et Trindade, 2012) :

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx = 1 - R(t) \quad (2.4)$$

2.1.4 Taux de défaillance

Le taux de défaillance $\lambda(t)$, qui est un indicateur de fiabilité continue dans le temps T , décrit la probabilité de défaillance d'une entité restée en bon état entre t et $t + \Delta t$ (Høyland et Rausand, 2004) :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbb{P}[t < T \leq t + \Delta t \mid T > t]}{\Delta t} \quad (2.5)$$

De cette probabilité conditionnelle, le taux de défaillance s'exprime comme suit :

$$\lambda(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.6)$$

Les comportements d'une entité sont habituellement schématisés à l'aide de la courbe en baignoire représentant l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps. Présentée à la figure 2.2, la courbe en baignoire typique s'interprète de la manière suivante (Bufferne, 2008) :

- La courte période de temps située à gauche de la courbe est une région où le taux de défaillance est élevé, mais décroissant. Cette section est définie comme étant la période de mortalité infantile et peut indiquer que l'entité tombe en panne parce qu'elle n'a pas été fabriquée ou installée adéquatement ;
- La partie médiane de la courbe est tracée par un taux de défaillance faible et sans évolution (constant ou quasi constant). Cette section est connue comme étant la période de vie utile de l'entité et la courbe caractéristique est révélatrice de pannes aléatoires ;
- La section située à droite de la courbe correspond à un taux de défaillance croissant. Pendant cette période, les pannes dues au vieillissement deviennent dominantes.

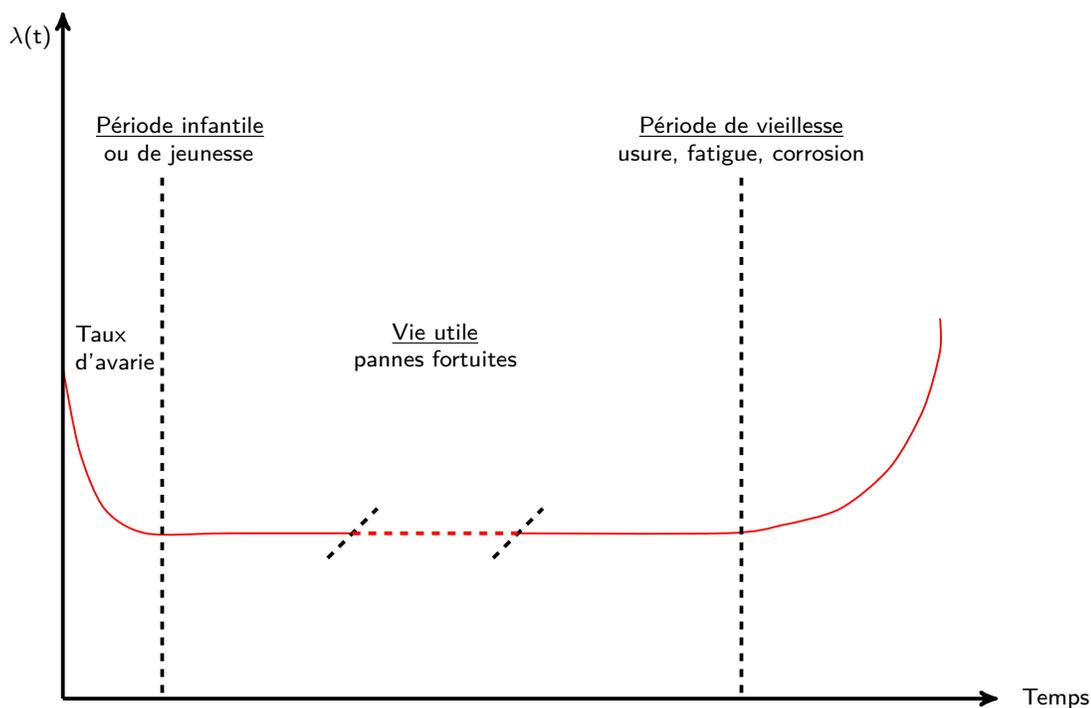


Figure 2.2: Courbe en baignoire typique (adaptée de Bufferne, 2008)

2.1.5 Temps moyen de fonctionnement avant défaillance et temps moyen entre défaillances

L'espérance de la durée de vie est un indicateur de la fiabilité primordial et elle est une mesure importante de la qualité d'une entité (Bon, 1995). Avant de définir plus précisément l'espérance de la durée de vie, il faut différencier les termes suivants : le temps moyen de fonctionnement avant défaillance (MTTF, de l'expression anglaise *Mean Time To Failure*) et le temps moyen entre défaillances (MTBF, de l'expression anglaise *Mean Time Between Failures*). Le terme MTTF est attribué aux entités non réparables, alors que le terme MTBF est alloué aux entités réparables. Ces dénominations sont couramment appliquées en industrie pour obtenir la durée de vie moyenne. Le temps moyen de fonctionnement avant défaillance et le temps moyen entre défaillances sont définis par (Thomas, 2002) :

$$\text{MTTF} = \text{MTBF} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.7)$$

En fonction du nombre de défaillances N , la représentation non paramétrique de la moyenne de temps de bon fonctionnement pendant une période de temps T en opération s'exprime comme suit :

$$\text{MTBF} = \frac{T}{N} \quad (2.8)$$

2.1.6 Temps moyen de réparation

La moyenne des temps de réparation (MTTR, de l'expression anglaise *Mean Time Between To Repair*) est la probabilité de réaliser une réparation dans un temps imparti et dans des conditions données (Klim, 1995) :

$$\text{MTTR} = \int_0^{\infty} t m(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt \quad (2.9)$$

où $m(t)$ est la fonction de densité de réparation et $M(t)$ est la fonction cumulative de réparation ou la fonction de maintenabilité. Par définition, la maintenabilité est « l'aptitude à être maintenu ou rétabli dans un état permettant de fonctionner tel que requis, dans des conditions données d'utilisation et de maintenance » (ISO, 2016, p. 10).

Cette dernière est exprimée selon l'intégrale de la densité de réparation :

$$M(t) = \int_0^t m(x) dx \quad (2.10)$$

Par analogie avec le taux de défaillance $\lambda(t)$, le taux de réparation $\mu(t)$ est (Hami et Radi, 2011) :

$$\mu(t) = \frac{1}{1 - M(t)} \frac{dM(t)}{dt} = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \quad (2.11)$$

En tenant compte du nombre de réparations R , la représentation non paramétrique de la moyenne des temps de réparation pendant une période de temps T en réparation est :

$$\text{MTTR} = \frac{T}{R} \quad (2.12)$$

2.1.7 Disponibilité

La disponibilité est un indicateur qui représente « l'aptitude à être en état de fonctionner tel que requis » dans le temps (ISO, 2016, p. 2). En d'autres termes, elle est définie comme le taux de temps moyen de bon fonctionnement d'une entité par rapport au temps total, qui inclut les temps d'opération et les temps de maintenance. La disponibilité s'améliore, notamment, en augmentant la moyenne des temps de bon fonctionnement par l'optimisation de la fiabilité de l'entité ou en diminuant la moyenne de temps de réparation par la bonification de la maintenabilité de l'entité (Klim, 1995). La disponibilité instantanée $A(t)$ au temps t est donnée par :

$$A(t) = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} + \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \exp \left[- \left(\frac{\text{MTBF} \times \text{MTTR}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \right) t \right] \quad (2.13)$$

En pratique, le temps moyen de bon fonctionnement est considéré très supérieur comparativement au temps moyen de réparation ($\text{MTBF} \gg \text{MTTR}$) et la seconde partie de l'équation (2.13) devient négligeable. Alors, la disponibilité stationnaire $A(\infty)$ est exprimée par :

$$A(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (2.14)$$

Dans l'expression de la durée moyenne des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances consécutives, il faut tenir compte du temps moyen de fonctionnement après réparation (MUT, de l'expression anglaise *Mean Up Time*), qui est la moyenne de temps où l'entité est disponible, et du temps moyen d'indisponibilité (MDT, de l'expression anglaise *Mean Down Time*). La moyenne de temps d'indisponibilité se divise en trois portions : le temps de détection/diagnostic, le temps de réparation et le temps des réglages/tests. D'autre part, avant le diagnostic et la mise en oeuvre de la maintenance, il faut considérer les temps d'attente dus à certaines contraintes, dont le délai pour se rendre au garage (ou autres lieux adéquats), le temps d'attente, l'attribution du personnel, etc. La figure 2.3 résume les indicateurs de maintenance mentionnés ci-dessus.

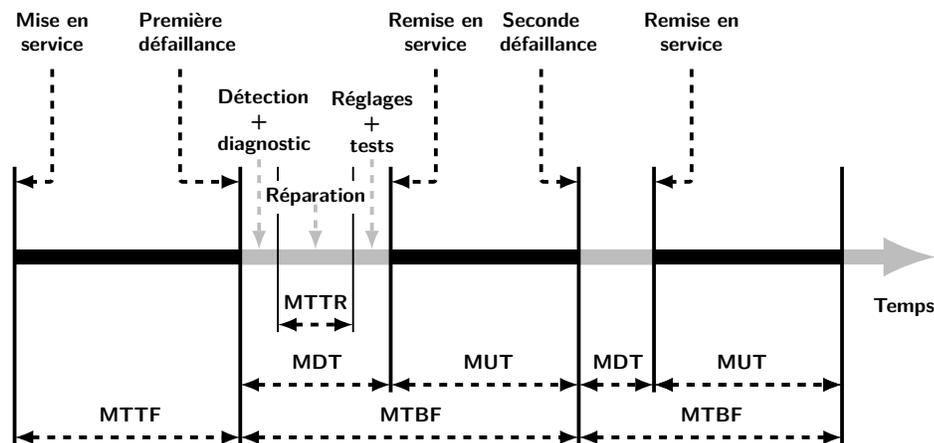


Figure 2.3: Indicateurs de maintenance (tirée de [Shahinez, 2011](#))

2.2 Schéma fonctionnel

Le schéma fonctionnel est la représentation graphique simplifiée d'un procédé ou d'une installation au moyen de cadres rectangulaires contenant les inscriptions correspondantes et liées entre elles par des lignes d'action ([ISO, 2014](#)). La conceptualisation du schéma fonctionnel est transposable à l'analyse de la fiabilité d'un système. La configuration par diagramme de fiabilité est une méthode schématique montrant comment la distribution des entités contribue au bon fonctionnement ou à la défaillance d'un système complexe ([Hami et Radi, 2011](#)). Les principales configurations de la fiabilité avec le principe du schéma fonctionnel se retrouvent ci-dessous.

2.2.1 Système de configuration en série

Dans une configuration en série, toutes les entités doivent fonctionner pour le succès du système. Alors, la défaillance d'une seule entité entraîne la panne de l'ensemble du système. Comme la plupart des sous-systèmes des équipements miniers sont connectés en série (Kumar, 1990), la fiabilité totale dépend de la fiabilité intrinsèque de chacune des entités présentes dans la configuration (p. ex. chargeuse-navette). Si tous les n entités sont considérés indépendants, alors la fiabilité du système en série $R_s(t)$ est le produit de la fiabilité des différents n entités (Hami et Radi, 2011) :

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.15)$$

La figure 2.4 illustre un système de configuration en série.



Figure 2.4: Système de configuration en série (tirée de Pham, 2006)

2.2.2 Système de configuration en parallèle

Dans une configuration en parallèle, le bon fonctionnement d'une entité n'est pas affecté par la défaillance d'une autre : leurs états sont indépendants et une seule entité doit fonctionner pour le succès du système (p. ex. aménagement de pompes ou de broyeurs). Selon les états et la configuration, la fiabilité du système en parallèle $R_p(t)$ s'exprime ainsi (Hami et Radi, 2011) :

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (2.16)$$

La figure 2.5 montre un système de configuration en parallèle.

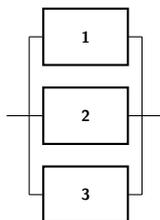


Figure 2.5: Système de configuration en parallèle (tirée de Pham, 2006)

2.2.3 Système de configuration mixte

La configuration mixte est composée d'entités disposées à la fois en parallèle et en série. La fiabilité du système mixte $R_m(t)$ repose respectivement sur une configuration série-parallèle et pour une configuration parallèle-série, définie par (Hami et Radi, 2011) :

$$R_{m_1}(t) = R_{s-p}(t) = 1 - \prod_{j=1}^n \left[1 - \prod_{i=1}^m R_{ij}(t) \right] \quad (2.17)$$

$$R_{m_2}(t) = R_{p-s}(t) = \prod_{j=1}^n \left[1 - \prod_{i=1}^m \{1 - R_{ij}(t)\} \right] \quad (2.18)$$

Un système de configuration mixte est présenté à la figure 2.6.

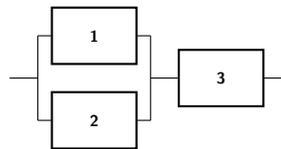


Figure 2.6: Système de configuration mixte (tirée de Pham, 2006)

2.3 Loi de probabilité

La fiabilité englobe le domaine de la probabilité, qui nécessite l'utilisation de méthodes statistiques et mathématiques. Le recours aux distributions de probabilité permet d'associer des données de défaillances provenant d'une entité à une fonction de défaillance probabiliste théorique. Le choix d'une loi de probabilité, discrète ou continue, apporte des réponses complémentaires à l'évaluation du niveau de fiabilité comme le taux de défaillance, la densité de probabilité et la moyenne de temps de bon fonctionnement (Klim, 1995). Cette thèse se concentre sur les distributions les plus employées pour l'analyse de la fiabilité dans le domaine continu, ce qui inclut la loi exponentielle, la loi normale, la loi log-normale et la loi de Weibull.

2.3.1 Loi exponentielle

En règle générale, la loi exponentielle caractérise la durée de vie utile d'une entité et elle est couramment appliquée en fiabilité en raison de sa simplicité analytique (durée de vie d'un phénomène sans mémoire ou sans vieillissement). Les défaillances qui suivent une distribution exponentielle sont caractérisées par un taux de défaillance constant. Ce principe est répandu pour les systèmes électroniques, mais il est également réaliste de l'attribuer pour les systèmes mécaniques (Klim, 1995). Ce modèle est intéressant sur le plan théorique puisqu'il permet d'obtenir des calculs explicites pouvant servir de référence (Bon, 1995). La densité de probabilité $f(t)$ pour une loi exponentielle de paramètre d'intensité λ est :

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad \lambda > 0, t \geq 0 \quad (2.19)$$

Présentée à la figure 2.7, la courbe de la densité de probabilité décroît en fonction du temps.

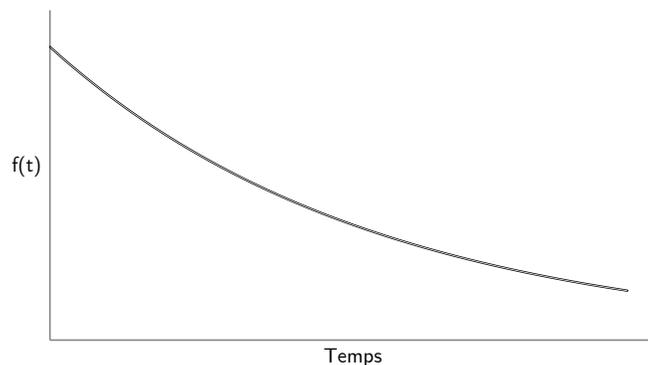


Figure 2.7: Graphique typique de la densité de probabilité d'une loi exponentielle

La fonction de répartition $F(t)$ et la fonction de fiabilité $R(t)$ pour une loi exponentielle sont respectivement :

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (2.20)$$

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (2.21)$$

La moyenne de temps de bon fonctionnement est l'inverse du paramètre d'intensité λ :

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.22)$$

La variance d'une loi exponentielle, qui exprime la moyenne des carrés des écarts par rapport à la moyenne des valeurs d'un échantillon, est donnée par :

$$V = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.23)$$

À partir de l'équation (2.6), il est démontré que le taux de défaillance $\lambda(t)$ d'une loi exponentielle est constant dans le temps :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda \exp(-\lambda t)}{\exp(-\lambda t)} = \lambda \quad (2.24)$$

La figure 2.8 illustre ce propos.

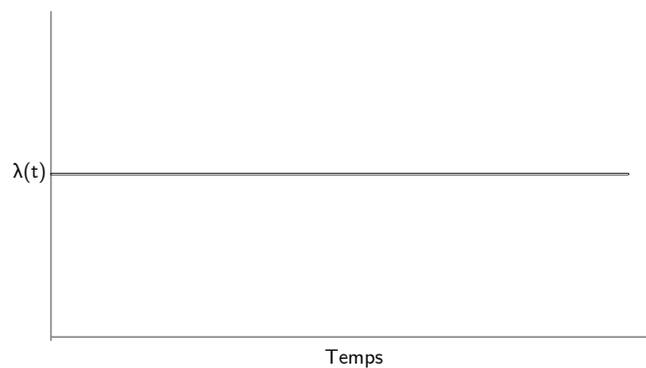


Figure 2.8: Graphique typique du taux de défaillance d'une loi exponentielle

2.3.2 Loi normale

La loi normale, appelée loi de Gauss, est efficace pour modéliser certains types de données dont la variation de la durée de vie est relativement faible. Cette loi est aussi pratique pour représenter les distributions d'une entité en fin de vie, en raison de la valeur du taux de défaillance qui croît dans le temps. Elle comporte deux paramètres et est notée $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$ (S. S. Rao, 2015). L'espérance μ est la valeur centrale des données et l'écart type σ renseigne sur la dispersion des données autour de la valeur centrale. La densité de probabilité $f(t)$ d'une loi normale est :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] = \phi\left\{\frac{t-\mu}{\sigma}\right\} \quad t \geq 0, \sigma > 0, -\infty < \mu < \infty \quad (2.25)$$

où ϕ est la fonction de probabilité pour une distribution normale standard.

La figure 2.9 illustre la densité de probabilité, symétrique et représentée sous forme de cloche.

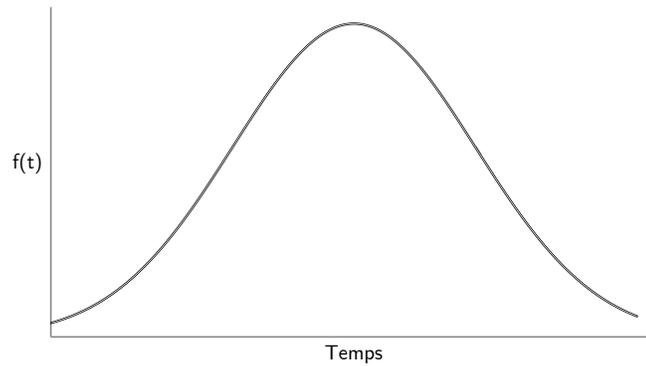


Figure 2.9: Graphique typique de la densité de probabilité d'une loi normale

La fonction de répartition $F(t)$ pour une loi normale est :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] dx \quad (2.26)$$

$$F(t) = \Phi \left\{ \frac{t - \mu}{\sigma} \right\} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right] = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\mu - t}{\sqrt{2}\sigma} \right]$$

où Φ est la fonction de probabilité cumulée pour une distribution normale standard, erf est la notation de la fonction d'erreur et erfc est la notation de la fonction d'erreur complémentaire. Dans la définition de la loi normale, la fonction de fiabilité $R(t)$ s'exprime telle que :

$$R(t) = 1 - \Phi \left\{ \frac{t - \mu}{\sigma} \right\} \quad (2.27)$$

La moyenne de temps de bon fonctionnement est égale à l'espérance et la variance est le carré de l'écart type :

$$\overline{\text{MTBF}} = \mu \quad (2.28)$$

$$V = \sigma^2 \quad (2.29)$$

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ pour une loi gaussienne est :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\phi \left\{ \frac{t - \mu}{\sigma} \right\}}{1 - \Phi \left\{ \frac{t - \mu}{\sigma} \right\}} \quad (2.30)$$

Telle que vue à la 2.10, l'évolution du taux de défaillance d'une distribution normale croît de façon significative dans le temps.

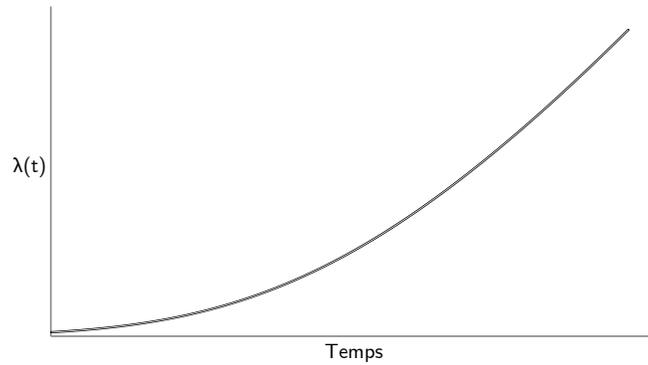


Figure 2.10: Graphique typique du taux de défaillance d'une loi normale

2.3.3 Loi log-normale

La loi log-normale, notée $Log-\mathcal{N}(\mu_{\ln X}, \sigma_{\ln X})$, est étroitement liée à la loi normale. Une variable aléatoire positive X suit une distribution log-normale de paramètres $\mu_{\ln X}$ et $\sigma_{\ln X}$ s'il est considéré que la variable $Y = \ln X$ suit une loi normale d'espérance μ et d'écart type σ (S. S. Rao, 2015). Cette loi peut modéliser la distribution d'une variable aléatoire qui résulte de la multiplication d'un grand nombre de petits effets indépendants entre eux (Delmas, 2000). La loi log-normale caractérise dans l'étude de la fiabilité, entre autres, les phénomènes de fatigue ou d'usure en mécanique (Torrent, 1978) et résultat de la multiplication d'un grand nombre de petits effets indépendants entre eux. La densité de probabilité $f(t)$ d'une distribution log-normale est :

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma_{\ln t}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}}\right)^2\right] \quad t, \sigma_{\ln t} > 0, -\infty < \mu_{\ln t} < \infty \quad (2.31)$$

Les définitions des paramètres $\mu_{\ln X}$ et $\sigma_{\ln X}$, basées sur une échelle logarithme, sont fonction de l'espérance μ et de l'écart type σ de la loi normale (Mood et al., 1974) :

$$\sigma_{\ln t} = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right)} \quad (2.32)$$

$$\mu_{\ln t} = \ln \mu - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right) \quad (2.33)$$

Présentée à la figure 2.11, la courbe représentative typique de la densité de probabilité indique que la distribution des données observées sont asymétriques à droite.

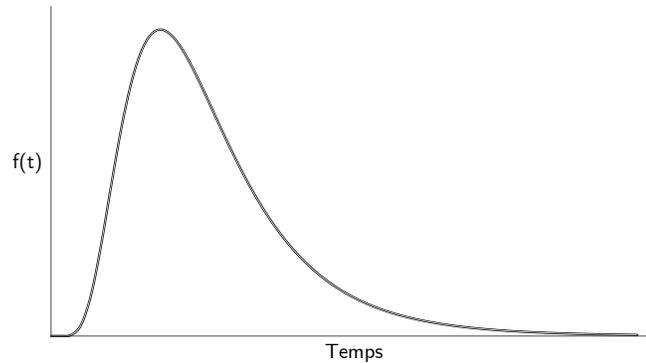


Figure 2.11: Graphique typique de la densité de probabilité d'une loi log-normale

La fonction de répartition $F(t)$ d'une loi log-normale s'énonce comme suit :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma_{\ln t} \sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}} \right)^2 \right] dx \quad (2.34)$$

$$F(t) = \Phi \left\{ \frac{t - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}} \right\} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t - \mu_{\ln t}}{\sqrt{2} \sigma_{\ln t}} \right] = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\mu_{\ln t} - t}{\sqrt{2} \sigma_{\ln t}} \right]$$

La fonction de fiabilité $R(t)$ pour une loi log-normale est :

$$R(t) = 1 - \Phi \left\{ \frac{\ln t - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}} \right\} \quad (2.35)$$

La moyenne de temps de bon fonctionnement se formule ainsi :

$$\text{MTBF} = \exp \left(\mu_{\ln t} + \frac{\sigma_{\ln t}^2}{2} \right) = T_{50} \exp \left(\frac{\sigma_{\ln t}^2}{2} \right) \quad (2.36)$$

où T_{50} est le paramètre médian de la distribution log-normale. La variance de cette loi est :

$$V = T_{50}^2 \exp(\sigma_{\ln t}^2) [\exp(\sigma_{\ln t}^2) - 1] \quad (2.37)$$

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ pour une loi log-normale est :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{t\sigma_{\ln t}} \phi \left\{ \frac{\ln t - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}} \right\}}{1 - \Phi \left\{ \frac{\ln t - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}} \right\}} \quad (2.38)$$

La figure 2.12 montre l'évolution du taux de défaillance, qui augmente rapidement jusqu'à un maximum et diminue graduellement par la suite.

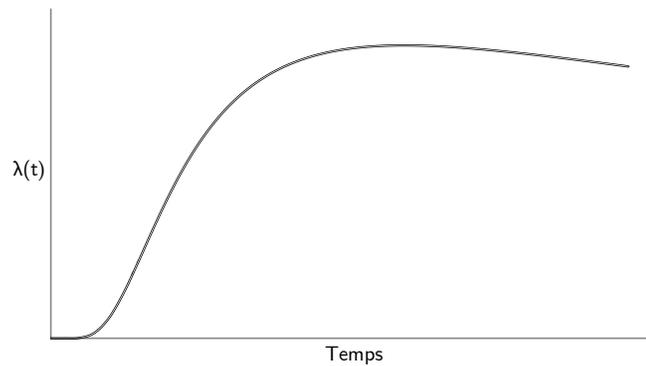


Figure 2.12: Graphique typique du taux de défaillance d'une loi log-normale

2.3.4 Loi de Weibull

Caractérisée par deux ou trois paramètres, la distribution de Weibull est l'une des plus flexibles puisqu'elle peut s'adapter à différentes lois de probabilité avec un faible échantillon (Abernethy, 2004). De plus, la distribution de Weibull a la possibilité de représenter le comportement d'une entité tout au long de son cycle de vie, en modélisant diverses situations d'usure (Bon, 1995). Cette loi est fonction de trois paramètres : le paramètre d'échelle α , le paramètre de forme β et le paramètre de position γ . Usuellement, le paramètre de position γ , qui indique l'éventuel décalage initial de la courbe par rapport à l'origine, n'est pas tenu en compte et sa valeur est mise à zéro pour obtenir la distribution de Weibull à deux paramètres. La densité de probabilité $f(t)$ pour une loi Weibull est :

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right] = \frac{\beta}{\alpha^{\beta}} t^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad \alpha, \beta > 0, t \geq 0 \quad (2.39)$$

Dans les propriétés de la distribution de Weibull, la valeur du paramètre de forme β indique (Naikan, 2008; Tobias et Trindade, 2012) :

$0 < \beta < 1$	décroissance du taux de défaillance (période infantile)
$\beta = 1$ (\sim loi exponentielle)	taux de défaillance constant (période de maturité)
$\beta = 2$ (\sim loi de Rayleigh)	croissance linéaire du taux de défaillance
$2 < \beta < 3$ (\sim loi log-normale)	croissance/décroissance du taux de défaillance
$3 \leq \beta \leq 4$ (\sim loi normale)	croissance rapide du taux de défaillance (période de vieillesse)
$\beta > 10$ (\sim loi d'extremum généralisée de type I)	croissance extrême du taux de défaillance

La densité de probabilité $f(t)$ est observée à la figure 2.13. Cette fonction est modélisée avec diverses valeurs pour le paramètre d'échelle α et le paramètre de forme β .

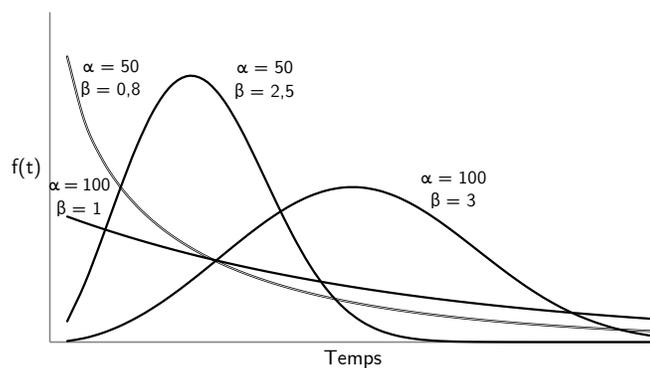


Figure 2.13: Graphique typique de la densité de probabilité d'une loi de Weibull

La fonction de répartition $F(t)$ d'une loi de Weibull est :

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (2.40)$$

La fonction de fiabilité $R(t)$ est quant à elle obtenue par :

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (2.41)$$

Pour la distribution de Weibull, la moyenne de temps de bon fonctionnement est :

$$MTBF = \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (2.42)$$

où Γ est la fonction gamma qui, par définition, est exprimée comme suit (Naikan, 2008) :

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} \exp(-t) dt \quad (2.43)$$

La variance de la loi de Weibull est donnée par :

$$V = \alpha^2 \Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \left[\alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]^2 \quad (2.44)$$

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est le rapport de la densité de probabilité $f(t)$ sur la fiabilité $R(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right]}{\exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right]} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} = \frac{\beta}{t} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \quad (2.45)$$

La figure 2.14 montre l'évolution du taux de défaillance pour une loi Weibull en fonction de la valeur du paramètre de forme β .

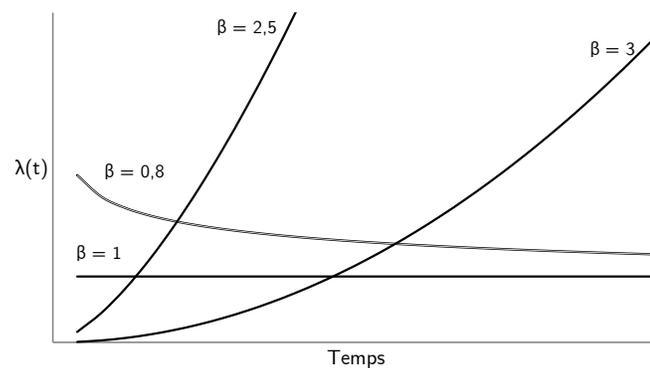


Figure 2.14: Graphique typique du taux de défaillance d'une loi de Weibull

2.4 Gestion de la maintenance

Selon les besoins et les ressources disponibles, une entreprise doit adopter une gestion adéquate des maintenances afin d'assurer l'amélioration continue de ses installations et de ses équipements. C'est à partir des années 1970 que la gestion de la maintenance a commencé à être prise plus au sérieux (Murthy et al., 2002). L'une des premières méthodologies développées a d'ailleurs été l'approche américaine de la maintenance basée sur la fiabilité (RCM, de l'expression anglaise *Reliability Centered Maintenance*). Dans cette approche, la maintenance d'une entité est fonction de la fiabilité et des conséquences de sa défaillance lors de son fonctionnement normal (Moubray, 1991). Ainsi, ce processus vise à établir les niveaux minimaux de sécurité de maintenance en évaluant et testant régulièrement l'entité par l'utilisation de méthodes de maintenance préventive et prédictive (Deepak et Jagathy, 2014). Une autre méthodologie développée est l'approche japonaise de la maintenance productive totale (TPM, de l'expression anglaise *Total Productive Maintenance*). Celle-ci est maintes fois présentée dans le contexte manufacturier et elle est basée sur une démarche proactive (Nakajima, 1989). La maintenance productive totale est plus précisément une stratégie visant à améliorer la productivité par les pratiques de maintenance préventive (Deepak et Jagathy, 2014). Cette méthode est validée par ses effets sur la disponibilité de l'équipement, le taux de production et la qualité de la production. Il est possible de combiner les deux méthodologies puisqu'elles peuvent potentiellement conduire à un meilleur processus de gestion de maintenance. Les auteurs Murthy et al. (2002) commentent la mise en place d'un programme de maintenance par l'application de la gestion stratégique de la maintenance (SMM, de l'expression anglaise *Strategic Maintenance Management*). À la différence des approches RCM et TPM, qui s'appliquent à court/moyen terme et n'ont qu'une centralisation sur l'équipement, l'approche SSM est applicable à moyen/long terme et englobe toute l'entreprise comme un tout. L'approche comporte deux lemmes fondamentaux :

- la maintenance est une partie vitale de l'entreprise pour sa survie et son succès ;

- une maintenance effective doit être basée selon un modèle de l'entreprise qui intègre les autres divisions telles que l'opération et la production.

D'après les mêmes auteurs, trois jalons sont mis en évidence pour mettre en place efficacement la gestion stratégique de la maintenance. Ces jalons ont une forte similitude avec les activités de recherche présentées à l'introduction de cette thèse :

1. Compréhension de la maintenance de l'équipement ;
2. Planification optimale des actions de la maintenance qui comprend :
 - la collecte d'informations pertinentes ;
 - l'analyse des données pour diagnostiquer l'état de l'équipement ;
 - la construction de modèle pour prédire les conséquences des différentes actions de maintenance et d'opération ;
 - la sélection des actions qui optimisent la maintenance.
3. Implantation de ces actions.

2.5 Programme de maintenance

La programmation de la maintenance, en lien avec les actifs miniers, est gérée au sein de l'équipe de maintenance. Ce groupe de personnes, qui se compose d'ingénieurs, de planificateurs, de superviseurs, de contremaîtres ainsi que d'autres intervenants, a pour rôle de garder toutes les installations, les équipements et l'inventaire en bon état afin d'assurer la plus longue durée de vie effective. Dans le but d'atteindre ces objectifs, le département de maintenance doit fournir des services optimaux et développer différentes stratégies avec les autres départements pour accroître l'efficacité opérationnelle. Les stratégies mises en place pour bien optimiser le programme de maintenance s'appuient, entre autres, sur la planification, l'ordonnancement, la création d'un calendrier de maintenance préventive et la gestion de l'inventaire. Les maintenances préventives sont planifiées selon une base horaire, ainsi que par fréquence et par lecture de compteurs d'équipements. D'autres dispositifs peuvent définir les intervalles de maintenance tels que le nombre de mètres forés ou la consommation de carburant. D'une part, les règles de planification des maintenances proviennent de plusieurs références, notamment du manuel du fabricant, du département d'ingénierie, des expériences professionnelles et des historiques d'équipements.

D'autre part, certaines maintenances doivent être prévues conformément à des réglementations du gouvernement ou de compagnies d'assurance. En complément, des outils de suivi sont employés par l'industrie minière, tels que les indicateurs clés de performance (KPI, de l'expression anglaise *Key Performance Indicator*), afin d'évaluer et de quantifier les aspects contributeurs à la performance des maintenances (Lafontaine, 2006).

Afin de bien comprendre la gestion et le traitement des maintenances dans un environnement minier, il est nécessaire d'effectuer un survol du programme de maintenance des équipements mobiles en opération sous terre, par le biais des demandes de travail générées. Le programme de maintenance a été approfondi à travers les diverses rencontres avec le personnel du département de maintenance. Les échanges ont porté notamment sur la composition des activités qui forment la gestion de maintenance par le cycle de vie d'un bon de travail (BT), tout en différenciant les tâches requises selon le type de maintenance. Introduites dans les prochains paragraphes, les étapes du processus de gestion de maintenance pour les équipements miniers mobiles de la mine partenaire sont résumées à la figure 2.15. Dans une vision plus globale, il est bon de mentionner que ce processus de gestion de maintenance est similaire entre les sites miniers.

I) Initiation et priorisation

L'étape initiale du processus d'identification des travaux demandés est la collecte d'informations. La demande de travail doit être revue et approuvée avant que débute la planification et l'ordonnement. Pour s'assurer que toutes les personnes concernées soient au fait des nouvelles demandes de travail relatives à leur département, les planificateurs et les superviseurs se rencontrent quotidiennement pour examiner toutes les demandes soumises dans les dernières 24 h. Grâce à cette réunion, l'approbation des bons de travail permet au personnel impliqué d'être informé des travaux et de réviser les priorités.

II) Planification

À cette étape, le planificateur doit s'assurer que tout le matériel et la main-d'œuvre sont identifiés. Le but est de garantir que le travail soit efficace et réalisé dans un court intervalle de temps, ainsi qu'à un coût minimal. De plus, il doit vérifier que les étapes de réalisation des travaux sont établies et que toutes les informations pertinentes sont transmises avant le début des opérations.

Les processus de planification et d'estimation d'un bon de travail s'exécutent comme suit :

- vérification de la description, elle doit être représentative du travail demandé ;
- vérification des informations ajoutées en annexe du bon de travail ;
- commande de pièces, si nécessaire ;
- inscription de la main-d'œuvre ;
- estimation de la durée du travail demandé par métier.

III) Ordonnancement

L'ordonnancement consiste à assigner une période de temps destinée à l'exécution d'une tâche. Puisque le calendrier de travail est déterminé à ce stade, il est primordial de bien optimiser les ressources et de s'assurer que tous les intervenants impliqués soient informés à l'avance de toute tâche à effectuer et de limiter les contraintes de travail. Plusieurs facteurs peuvent influencer les décisions concernant l'organisation de l'ordonnancement, mais les choix sont généralement basés sur le type d'équipement, la criticité et la priorité. Une fois de plus, pour favoriser une bonne communication entre les départements de la maintenance et de la production, des réunions hebdomadaires sont organisées. Celles-ci permettent de faciliter l'ordonnancement du travail des prochaines semaines, de cibler les équipements prioritaires et de déterminer leur disponibilité pour maximiser les travaux.

IV) Exécution des travaux

Lorsque le travail a été identifié, planifié et ordonnancé, il peut être exécuté par le personnel concerné. Afin d'assurer que la maintenance soit fiable, il est important que les travailleurs fournissent des informations détaillées sur le travail effectué, selon les exigences du département. Cette action est essentielle pour l'amélioration continue de l'équipement et du suivi de son historique.

V) Fermeture

À cette étape, le personnel concerné est tenu de fermer partiellement le bon de travail. Ensuite, le planificateur est responsable de sa fermeture complète en s'assurant préalablement que toute l'information entrée soit en ordre. Après un certain temps, le système fermera automatiquement le bon de travail.

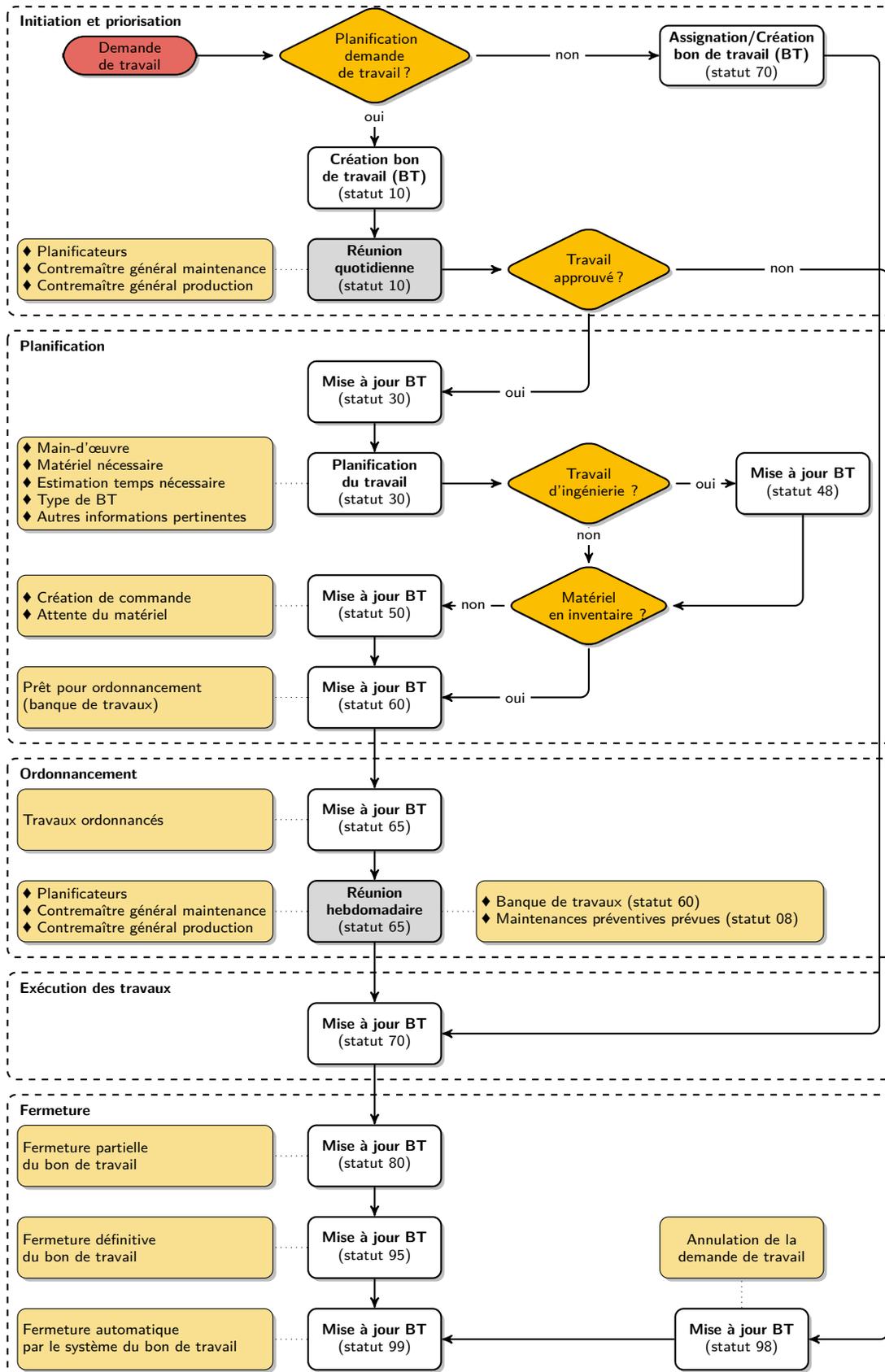


Figure 2.15: Processus de gestion de maintenance pour les équipements miniers mobiles

2.6 Types de maintenance

Les activités de maintenance présentes dans l'entreprise doivent être surveillées, contrôlées et améliorées afin de produire une gestion efficace de la maintenabilité. La maintenance est la « combinaison de toutes les actions techniques et des actions administratives correspondantes, y compris les opérations de surveillance et de contrôle, destinées à maintenir ou à remettre une entité dans un état lui permettant d'accomplir une fonction requise » (Villemeur, 1988, p. 736). Cette définition suppose qu'outre la réparation après une défaillance, la définition de la maintenance comprend également des activités proactives telles que le remplacement préventif, l'inspection et la surveillance d'état. Les activités de maintenance se distinguent en trois grandes catégories : la maintenance corrective, la maintenance préventive et la maintenance prédictive. La figure 2.16 illustre l'organigramme qui englobe les types de maintenance définis dans les prochaines pages.

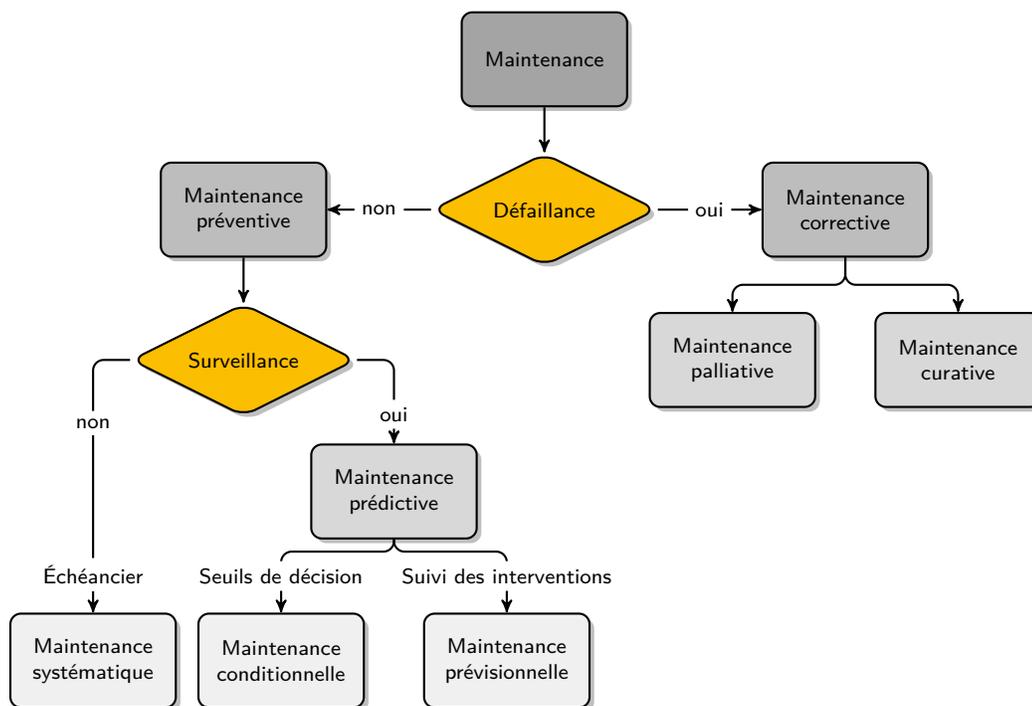


Figure 2.16: Types de maintenance (adaptée de Traoré, 2010)

2.6.1 Maintenance corrective

La maintenance corrective (CM, de l'expression anglaise *Corrective Maintenance*) est une « maintenance effectuée après une détection de panne pour procéder à un établissement » (ISO, 2016, p. 3). Outre l'activité de remplacement, la maintenance corrective considère également les activités suivantes (US Army Material Command, 1975) :

- **Révision** : inspection et réparation de ce qui est nécessaire, en restaurant un équipement selon une norme de maintenance définie ;
- **Reconstruction** : restauration d'un équipement ou d'un composant le plus près possible de l'état d'origine en termes de performance, d'espérance de vie et d'apparence ;
- **Entretien** : action requise en raison des mesures correctives qui ont été prises ;
- **Récupération** : conclusion de la maintenance par l'élimination et le recyclage des composants non réparables.

Ce type d'entretien a la possibilité d'être rentable, surtout lorsque le matériel est fiable et que les temps d'arrêt sont rares. La maintenance corrective peut être employée lorsque les temps d'arrêt de l'équipement ne provoquent pas d'impacts majeurs sur la production ou la sécurité des employés. Toutefois, lorsque les pannes se produisent régulièrement, les impacts peuvent être plus importants en raison d'arrêt prolongé, de manque de main-d'œuvre ou d'indisponibilité de pièces de rechange. Deux types de maintenance corrective sont à distinguer. La première, la maintenance palliative, regroupe les actes de dépannage permettant à un équipement d'accomplir temporairement sa fonction requise. La seconde, la maintenance curative, regroupe les actes qui recherchent les causes de défaillance et les répare de façon permanente afin de prévenir toute nouvelle défaillance en relation avec cette panne (Traoré, 2010).

2.6.2 Maintenance préventive

La maintenance préventive (PM, de l'expression anglaise *Preventive Maintenance*) est une « maintenance effectuée pour limiter la dégradation et réduire la probabilité de défaillance » (ISO, 2016, p. 15). Autrement dit, ce type d'entretien consiste à prévenir les défaillances avant qu'elles ne se produisent et à prendre des mesures pour maintenir l'équipement en bon état de fonctionnement (Heng, 2002). La maintenance préventive comporte, entre autres, les activités suivantes (US Army Material Command, 1975) :

- **Entretien** : action exécutée sur une base régulière pour prévenir les défaillances telles que le nettoyage, la conservation, le changement, l'ajout, la lubrification, etc. ;
- **Inspection** : détermination de l'aptitude au service en comparant les caractéristiques physiques, mécaniques et électriques avec les normes établies ;
- **Essai** : opération de vérification pour déterminer la facilité d'entretien et détecter une dégradation ;
- **Ajustement** : action d'ajustement pour des éléments spécifiques afin d'amener le système au niveau optimal de performance ;
- **Alignement** : action d'alignement pour des éléments spécifiques afin d'amener le système au niveau optimal de performance ;
- **Étalonnage** : détermination de la valeur des caractéristiques d'un composant par comparaison avec une norme ;
- **Installation** : configuration et utilisation d'un équipement dans un environnement opérationnel.

La maintenance préventive se distingue par trois niveaux : la maintenance systématique, la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle. Ces deux dernières sont regroupées sous la maintenance dite prédictive. La maintenance systématique est applicable à des équipements dont la défaillance implique, entre autres, des coûts de réparation élevés, des risques pour la sécurité ou des obligations soumises aux normes réglementaires. Habituellement, le remplacement périodique des composants d'un équipement préconise celui fourni par le fabricant.

2.6.3 Maintenance prédictive

La maintenance prédictive est une « maintenance basée sur une prévision de l'état futur d'une entité établie par estimation ou calcul à partir d'un ensemble défini de données d'historique » (ISO, 2016, p. 15). Basé sur une approche à long terme, ce type d'entretien consiste à anticiper les défaillances futures en s'appuyant sur des mesures, des observations et des échantillonnages de données. Lorsque les défaillances sont identifiées à l'avance et que les actions correctives sont prises dans de bonnes conditions, la maintenance prédictive permet de réduire les arrêts et le démantèlement inutile d'équipements. La maintenance prédictive se divise en deux types : la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle.

Telle qu'expliquée par les auteurs Jardine et al. (2006), la maintenance conditionnelle (CBM, de l'expression anglaise *Condition-Based Maintenance*) s'appuie sur la mesure et l'analyse d'événement prédéterminé révélateur de l'état de fonctionnement de l'équipement tel que les résultats de diagnostic, les mesures d'usure et les données de capteur (analyse d'huile, de vibration, de température, etc.). Le franchissement d'un des seuils prédéfinis déclenche une alerte indiquant qu'une maintenance doit être planifiée sur l'équipement avant que la dégradation entraîne une panne (Ribot, 2009).

La maintenance prévisionnelle est associée à la maintenance prédictive, puisqu'elle est réalisée également à la suite d'une analyse en temps réel des paramètres précurseurs de panne. Le modèle établi en relation avec la maintenance prévisionnelle prédit la durée de vie résiduelle d'une entité relative au risque de défaillance attendu en appliquant, entre autres, des modèles probabilistes et statistiques (D. N. Nguyen, 2015). En d'autres mots, l'approche liée à ce type de maintenance permet de prédire les futures défaillances d'une entité en tenant compte de l'état réel de dégradation et en se basant sur l'estimation de l'espérance de vie de cette dernière. En ayant cette connaissance supplémentaire de l'évolution des défaillances, la maintenance prévisionnelle apporte une meilleure maîtrise des maintenances et une amélioration de la durée de vie des équipements.

2.7 Classification des approches de pronostic

Dans le cadre de la stratégie de la maintenance prédictive, le processus de pronostic est l'élément clé puisqu'il supporte la notion d'anticipation caractérisant l'approche proactive (Muller, 2005). Le pronostic des défaillances est l'estimation ou la prédiction de la durée de vie résiduelle d'une entité, c'est-à-dire la durée au bout de laquelle celle-ci ne pourra plus exercer sa fonction requise avec succès (Traoré, 2010). Diverses approches de pronostic ont été développées, notamment : le pronostic à bases de modèles, le pronostic guidé par les données et le pronostic basé sur l'expérience. Les approches de pronostic et de leurs méthodes respectives sont hiérarchisées sous forme pyramidale (voir figure 2.17). Le choix de l'une de ces méthodes dépend de l'étendue du domaine, de la précision et de la complexité des données, ainsi que des outils disponibles.

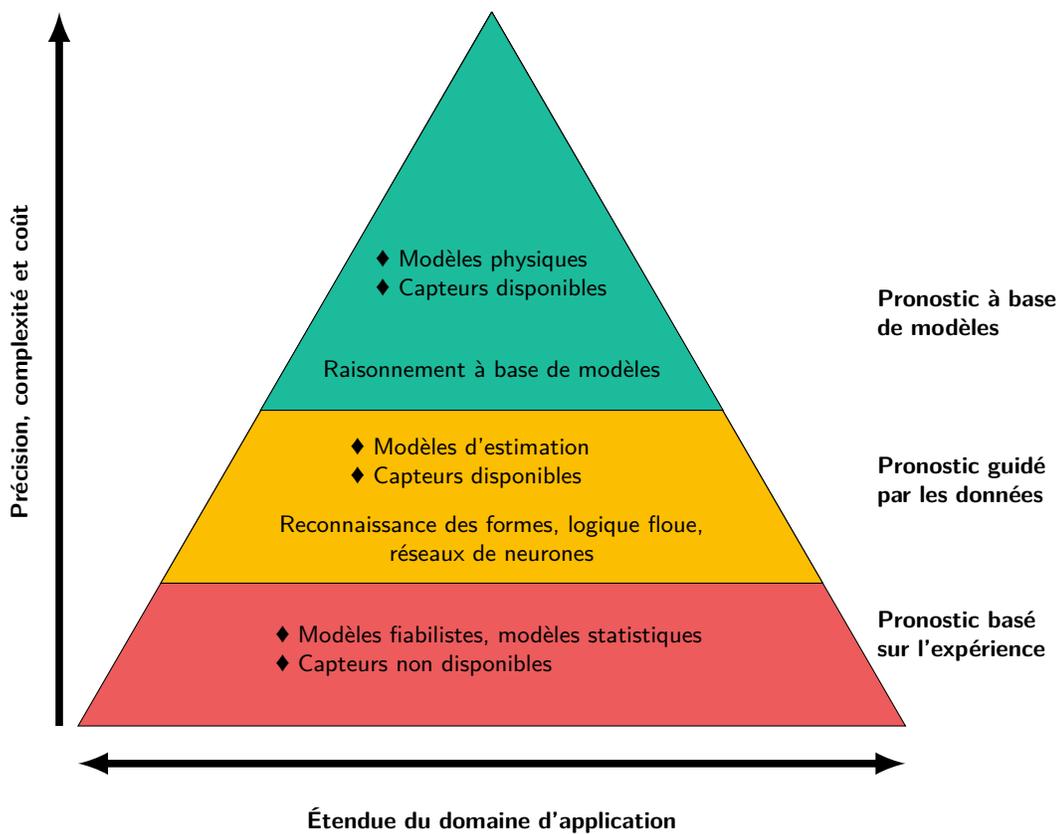


Figure 2.17: Classification des approches de pronostic (adaptée de Ribot, 2009)

2.7.1 Pronostic à base de modèles

L'approche du pronostic basée sur des modèles physiques se situe au plus haut de la pyramide. Cette approche considère la construction de modèles physiques qui permettent de caractériser quantitativement le comportement d'un mode de défaillance par une représentation mathématique et en s'appuyant sur une forte connaissance physique du système (D. N. Nguyen, 2015). Cette modélisation permet non seulement d'observer les réalités physiques à l'aide d'installation de capteurs sur le système, mais également de fournir les causes associées à ces observations (Ribot, 2009). À partir d'un état de détérioration initial et de conditions d'utilisation du système, le pronostic consiste à faire évoluer les modèles physiques jusqu'à l'instant demandé (Muller, 2005). Le principal inconvénient de cette approche est qu'il est ardu de construire un modèle pour un système global en raison de la complication de la modélisation des interactions entre les différentes entités. De plus, la résolution des calculs associés aux systèmes d'équations différentielles de ces modèles peut s'avérer complexe.

2.7.2 Pronostic guidé par les données

Se situant au milieu de la pyramide, le pronostic guidé par les données se fie à l'évolution d'indicateurs de dégradation d'un système issus de données (installation et lecture de capteurs). Les paramètres considérés dans cette approche sont des caractéristiques mesurables qui peuvent être employées comme indicateur de dégradation pour prédire les défaillances et estimer la durée de vie utile. Les estimateurs sont obtenus à partir des observations en temps réel et de l'historique des défaillances en utilisant, entre autres, des techniques d'apprentissage (réseaux de neurones, logique floue) ou en identifiant des paramètres d'estimateurs d'états (Ribot, 2009). Le pronostic guidé par les données s'appuie sur l'hypothèse que les caractéristiques statistiques des données ne changent peu à moins qu'un défaut de fonctionnement ne se produise dans le système (D. N. Nguyen, 2015).

2.7.3 Pronostic basé sur l'expérience

Le pronostic basé sur l'expérience est une alternative réalisable dans la situation où il est trop complexe d'élaborer des modèles physiques et où il est impossible d'installer de dispositif de suivi d'état de dégradation. Placée au bas de la pyramide, cette approche est la plus accessible et ne nécessite que l'historique des pannes pour estimer la probabilité de défaillance à un moment futur (Ribot, 2009).

Un des concepts du pronostic basé sur l'expérience s'appuie sur la modélisation fiabiliste de la détérioration (dite aussi probabiliste) et provient de l'expérience acquise d'une entité. Cette approche consiste à trouver la loi de probabilité correspondant à un instant de défaillance qui s'adapte à l'historique des données d'interventions (Muller, 2005). Diverses lois de probabilité sont employées pour modéliser les données telles que la loi exponentielle, la loi normale, la loi log-normale et la loi de Weibull. Pour un échantillon de temps de bon fonctionnement d'une entité, les informations les plus simples à obtenir pour ce pronostic sont la fonction de fiabilité, la densité de probabilité et le taux de défaillance. Un des indicateurs prévisionnels à la planification de la maintenance de cette approche est notamment obtenu par les informations liées aux indicateurs de fiabilité, telles que le temps moyen avant défaillance (MTTF) ou le temps moyen de bon fonctionnement (MTBF).

2.8 Processus stochastiques

Les techniques d'analyse fiabiliste assimilent les données d'interventions réelles en conjonction avec des modèles mathématiques appropriés pour produire l'estimation de la fiabilité d'une entité (équipement, système, composant). De ce fait, les données d'interventions dans le temps peuvent être représentées par un processus ponctuel, dit processus stochastique (Syamsundar et Naikan, 2009). Ce dernier est un phénomène chronologique, caractérisé par ses différentes réalisations, où intervient le hasard et dont les valeurs instantanées sont des variables aléatoires (Tobias et Trindade, 2012). L'occurrence des instants d'interventions proviennent soit d'une maintenance corrective (non prévue), soit d'une maintenance préventive (prévue) et est associée aux temps de bon fonctionnement (TBF, de l'expression anglaise *Time Between Failures*). L'intervalle de bon fonctionnement se mesure après la dernière maintenance d'une entité jusqu'à une nouvelle maintenance et cette durée se représente en fonction du temps ou du nombre de cycles. La figure 2.18 illustre un ensemble de défaillances d'un équipement compris entre un intervalle de temps T_a et T_b où le paramètre aléatoire x_i représente le temps de la i^e défaillance.

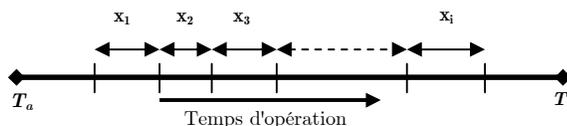


Figure 2.18: Temps entre les défaillances d'un équipement (adaptée de Ahmad et al., 2006)

Un obstacle commun aux études des durées de survie est la présence de données tronquées ou censurées (Huber-Carol, 1994). Lorsque les données sont censurées à droite par le temps, alors le test est arrêté à un temps spécifique (essai de type I). Dans le cas de données censurées à droite par le nombre de défaillances, l'arrêt du test est déterminé par l'occurrence du nombre de défaillances (essai de type II). Il y a troncature pour un échantillon d'une population lorsque, en raison des conditions ou des restrictions de l'essai, il manque un nombre inconnu de valeurs qui appartiennent à la plage non observée (Tobias et Trindade, 2012). Cette situation est vraie pour un essai dont la collecte d'information ne comporte pas les données depuis le début de la mise en fonction de l'entité, mais seulement un intervalle spécifique selon la requête du test. Tel que discuté plus loin, le type d'essai effectué influence le choix des équations à appliquer (Procaccia et al., 2011). Les prochaines parties mettent en lumière les divergences entre l'approche fiabiliste des entités réparables et non réparables.

2.8.1 Entité réparable

Une entité est dite réparable s'il est possible de lui restituer ses qualités primitives lorsqu'elle tombe en panne par la mise en œuvre d'une maintenance. En ce sens, ces actions de maintenance influencent le comportement global de l'entité et affectent son fonctionnement en raison de la performance variable des maintenances, telle que l'erreur humaine, la qualité des pièces de rechange et l'applicabilité de la maintenance préventive (Procaccia et al., 2011). Par conséquent, l'efficacité de la maintenance peut être la même qu'avant, meilleure, ou pire, de sorte que l'intensité de défaillance peut rester constante, diminuer ou augmenter. L'analyse d'une entité réparable ne suppose pas seulement la modélisation de la fiabilité en termes de distributions statistiques, mais également en termes de processus ponctuel de Poisson. Le processus ponctuel est interprété comme la succession du nombre d'événements aléatoires dans le temps où se produit un changement d'état (Girault, 1964). Quatre processus stochastiques sont ciblés pour l'analyse de la fiabilité d'une entité réparable :

- processus de renouvellement (RP, de l'expression anglaise *Renewal Process*);
- processus homogène de Poisson (HPP, de l'expression anglaise *Homogeneous Poisson Process*);
- processus non homogène de Poisson (NHPP, de l'expression anglaise *NonHomogeneous Poisson Process*);
- processus de branchement de Poisson (BPP, de l'expression anglaise *Branching Poisson Process*).

2.8.2 Entité non réparable

Une entité est dite non réparable lorsque celle-ci doit être mise au rebut lors de sa défaillance. Parfois, une entité est dite réparable, mais pour des raisons économiques, il revient moins dispendieux de la remplacer par une nouvelle que de la réparer (Louit et al., 2009). Dans le cas d'une entité non réparable, l'analyse de la fiabilité est caractérisée par un mode de défaillance unique, en fonction d'une probabilité de survie pour un intervalle de temps. D'ailleurs, pour une entité non réparable, le processus de résolution est simplifié : les temps entre défaillances sont considérés comme étant indépendants et identiquement distribués (i.d.d., de l'expression anglaise *Independent and Identically Distributed*). Il est alors possible de poser l'hypothèse que les données suivent un processus de renouvellement (Regattieri et al., 2010). Si les temps entre défaillances sont distribués selon une loi exponentielle ou que ces derniers engendrent une fonction avec un taux de défaillance constant, alors c'est le processus de Poisson homogène qui s'applique.

2.8.3 Processus de renouvellement (RP)

Ce processus suppose qu'une maintenance a restauré les qualités primitives initiales à une entité réparable, de sorte qu'elle est considérée comme neuve et l'hypothèse de résolution « aussi bon que neuf » (de l'expression anglaise *as good as new*) s'impose. De ce fait, la séquence des défaillances de l'entité constitue un procédé aléatoire appelé processus de renouvellement. Il est essentiel de rappeler qu'un processus de renouvellement est un processus d'arrivée dont les intervalles intermédiaires (temps entre défaillances) sont des variables positives, indépendantes et identiquement distribuées. Il s'appelle processus de renouvellement par le fait que le processus probabiliste débute à chaque période de temps avec la séquence de comptage $S_n = X_1 + \dots + X_n = \sum_{i=1}^n X_i$. La théorie du renouvellement concerne le nombre d'occurrences d'événements $N(t)$ dans l'intervalle $[0, t]$ pour lequel $S_n \leq t$ est fonction du nombre maximum n et de la convention $N(t) = 0$ si $X_1 > t$ (Barlow et Proschan, 1965). Ce processus permet l'étude de phénomènes dans lesquels apparaissent des instants de génération, où le processus « oublie son passé » à ces instants (Cocozza-Thivent, 1997). En conséquence, il est possible d'employer les techniques de la statistique classiques pour évaluer, entre autres, la fonction de fiabilité. Les méthodes de résolution sont ainsi équivalentes à celles utilisées pour une entité non réparable.

2.8.4 Processus de Poisson homogène (HPP)

Le processus de Poisson homogène est un cas particulier du processus de renouvellement dans lequel l'intensité de défaillance est constante. Ce modèle est très similaire à la distribution exponentielle, par le fait qu'un processus est homogène de type Poisson, si et seulement si les temps entre défaillances sont des variables aléatoires exponentielles, considérées indépendantes et identiquement distribuées, avec une espérance mathématique équivalente à $1/\lambda$ (Rigdon et Basu, 2000). Dans les conditions données, la probabilité d'observer le nombre de défaillances $N(t)$ au temps t pour un processus de Poisson est égale à (Tobias et Trindade, 2012) :

$$\mathbb{P}[N(t) = n] = \frac{(\lambda t)^n \exp(-\lambda t)}{n!} \quad (2.46)$$

La fonction de fiabilité $R(t)$ s'exprime ainsi :

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (2.47)$$

Respectivement, la fonction de répartition $F(t)$ et la fonction de densité $f(t)$ sont :

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (2.48)$$

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (2.49)$$

Dans le cadre du processus de Poisson homogène, la moyenne de temps de bon fonctionnement (MTBF) est constante et égale à la moyenne de temps avant défaillance (MTTF) pour la distribution exponentielle des temps observés entre les événements :

$$\text{MTBF} = \text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.50)$$

Le processus homogène de Poisson est l'un des plus simples pour la modélisation des entités réparables et non réparables. Certaines études acceptent *de facto* l'hypothèse que l'ensemble des données suivent ce processus. Cependant, cette affirmation doit être prise avec précaution : s'il y a présence d'une intensité de défaillance non constante dans les événements t_1, \dots, t_n , alors un autre modèle tel que celui du processus de Poisson non homogène doit être appliqué pour cette situation.

2.8.5 Processus de Poisson non homogène (NHPP)

Le processus de Poisson non homogène est le plus appliqué dans la modélisation des entités réparables en raison de ses bases théoriques bien développées et de son utilisation fréquente dans la littérature. Ce processus est mis à contribution au moment où la fiabilité n'a pas été améliorée depuis la dernière défaillance et, de ce fait, l'hypothèse de « réparation minimale » est considérée (de l'expression anglaise *as bad as old*). L'action de réparation est seulement suffisante pour rendre l'entité opérationnelle à nouveau et la fonction d'intensité de défaillance reste identique ou s'accroît par rapport à celle d'avant la maintenance, ce qui, au fil du temps, apporte une dégradation à l'entité. En d'autres mots, la réparation de l'entité défectueuse n'entraîne pas de modification significative dans la fiabilité de l'équipement pour les raisons suivantes : défauts et pannes cachés non détectés pendant la dernière maintenance, erreurs humaines et remplacement par des pièces défectueuses (Nakagawa et Yasui, 1987). La figure 2.19 montre une augmentation de la fréquence d'interventions et, conséquemment, un accroissement de l'intensité de défaillance.

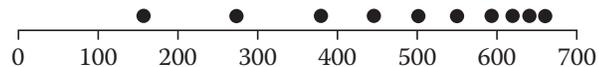


Figure 2.19: Détérioration d'un système en fonction de l'âge (tirée de Tobias et Trindade, 2012)

Pour des raisons pratiques, la loi de puissance définie par l'évolution de l'intensité de défaillance est fréquemment employée lors de la modélisation du processus de Poisson non homogène (Procaccia et al., 2011), même s'il existe d'autres alternatives telles que la loi log-linéaire (Hung-Cuong et al., 2014). La méthode préconisée se base sur le modèle Crow-AMSAA (Crow, 1975, 1990), où le développement a été réalisé par Larry H. Crow et l'armée américaine dans le cadre des recherches du *Army Materiel Systems Analysis Activity* (AMSAA). Les théories statistiques s'appuient sur la représentation stochastique du modèle de Duane (1964). Par la fonction de la loi de puissance, le processus de Poisson non homogène suppose que le nombre de défaillances au temps t suit une distribution de Poisson avec une intensité variable.

La fonction d'intensité de la loi de puissance $\lambda(t)$, aussi appelée le taux d'occurrence de défaillances $m(t)$, est définie comme suit (Crow, 1975) :

$$\lambda(t) = m(t) = \frac{dM(t)}{dt} = \alpha\beta t^{\beta-1} \quad (2.51)$$

où α est le paramètre d'échelle et β est le paramètre de forme. Le paramètre de forme β fournit des informations pertinentes sur la défaillance de l'entité réparable. Lorsque le paramètre de forme $\beta = 1$, cela indique que les données de défaillances suivent un processus stochastique apparenté à celui du processus de Poisson homogène. Pour $\beta > 1$, l'intensité $\lambda(t)$ est alors strictement croissante et les intervalles entre les défaillances diminuent de manière stochastique, ce qui indique une détérioration du système. Pour $\beta < 1$, l'intensité $\lambda(t)$ est alors strictement décroissante et les intervalles entre les défaillances augmentent de manière stochastique, ce qui indique une amélioration du système (Crow, 1990). L'espérance du nombre prévu de défaillances $M(t)$ est donnée par :

$$M(t) = \int_0^t \lambda(x) dx = \alpha t^\beta \quad (2.52)$$

Par la caractérisation du processus de Poisson, la probabilité d'observer n défaillances en fonction du temps t et l'intervalle de temps Δt est (Ross, 2003) :

$$\begin{aligned} \mathbb{P}[N(t + \Delta t) - N(t)] &= \frac{[M(t + \Delta t) - M(t)]^n \exp[-M(t + \Delta t) + M(t)]}{n!} \\ &= \frac{[\alpha(t + \Delta t)^\beta - \alpha t^\beta]^n \exp[-\alpha(t + \Delta t)^\beta + \alpha t^\beta]}{n!} \end{aligned} \quad (2.53)$$

La densité de probabilité en fonction du temps est représentée par (Meskini et al., 2013) :

$$f(t) = \alpha\beta t^{\beta-1} \exp(-\alpha t^\beta) \quad (2.54)$$

De façon générale, la fiabilité se définit comme suit (Stephens, 2012) :

$$R(t) = \exp[-M(t)] = \exp\left[-\int_0^t \lambda(x) dx\right] = \exp(-\alpha t^\beta) \quad (2.55)$$

De plus, la fiabilité s'exprime en fonction du temps t et de l'intervalle de temps Δt dans lequel aucune défaillance n'est survenue (Tobias et Trindade, 2012) :

$$R(t, \Delta t) = \exp \{ [M(t + \Delta t) - M(t)] \} = \exp \left[-\alpha(t + \Delta t)^\beta + \alpha t^\beta \right] \quad (2.56)$$

Lorsque l'intensité de défaillance est décroissante, une autre approche pertinente considère la fiabilité en fonction de la délimitation du temps moyen de bon fonctionnement (Podder et al., 2004) :

$$R(t) = \begin{cases} \exp \left[\frac{-t}{\text{MTBF}} \right] & t \leq \text{MTBF} \\ \frac{\text{MTBF}}{t} \exp [-1] & t > \text{MTBF} \end{cases} \quad (2.57)$$

En employant la fonction de fiabilité définie à l'équation (2.56), la fonction de défaillance devient :

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp \left[-\alpha(t + \Delta t)^\beta + \alpha t^\beta \right] \quad (2.58)$$

La moyenne des temps de bon fonctionnement à l'instant t est défini par (Tobias et Trindade, 2012) :

$$\text{MTBF}(t) = \frac{1}{\lambda(t)} = \frac{1}{\alpha \beta t^{\beta-1}} \quad (2.59)$$

Le paramètre d'échelle α et le paramètre de forme β sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance (voir art. 3.6.1). La fonction de vraisemblance de la loi de puissance est :

$$L(t_i; \alpha, \beta) = \prod_{i=1}^n f(t_i; \alpha, \beta) = \alpha^n \beta^n \exp(-\alpha t^\beta) \prod_{i=1}^n t_i^{\beta-1} \quad (2.60)$$

où n est le nombre de défaillances et t_i est le temps à la i^e défaillance. Le logarithme naturel de la fonction de vraisemblance devient :

$$\Lambda = n \ln \alpha + n \ln \beta - \alpha t^\beta + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln t_i \quad (2.61)$$

Le paramètre d'échelle α et le paramètre de forme β sont obtenus en dérivant l'équation (2.61) par rapport à chacun de ces estimateurs et en les égalisant à zéro :

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \alpha} = \frac{n}{\alpha} - t^\beta = 0 \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \beta} = \frac{n}{\beta} - \alpha t^\beta \ln t + \sum_{i=1}^n \ln t_i = 0 \quad (2.63)$$

L'estimé du paramètre d'échelle α est égal à :

$$\hat{\alpha} = \frac{n}{t^\beta} \quad (2.64)$$

Dans le cas du paramètre de forme β , l'estimation correspond à :

$$\hat{\beta} = \frac{n}{n \ln t - \sum_{i=1}^n \ln t_i} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{t}{t_i} \right)} \quad (2.65)$$

où n est le nombre de défaillances, t_i est le temps à la i^e défaillance, $t = T$ est le temps total du test si le processus est censuré par le temps et $t = T_n$ est le temps observé sur la dernière défaillance si le processus est censuré par le nombre de défaillances. Comme l'estimation du paramètre de forme β est biaisée, il est suggéré d'employer l'estimateur non biaisé du paramètre de forme $\bar{\beta}$ avec le nombre de défaillances \hat{n} (Procaccia et al.,2011 ; Rigdon et Basu,2000) :

$$\bar{\beta} = \frac{\hat{n}}{\sum_{i=1}^{\hat{n}} \ln \left(\frac{t}{t_i} \right)} \quad (2.66)$$

où $\hat{n} = n - 1$ si le processus est censuré par le temps et $\hat{n} = n - 2$ si le processus est censuré par le nombre de défaillances. L'estimateur du paramètre d'échelle non biaisé $\bar{\alpha}$ est :

$$\bar{\alpha} = \frac{n}{t^{\bar{\beta}}} \quad (2.67)$$

À partir des équations (2.59), (2.66) et (2.67), l'estimation de la moyenne de bon fonctionnement instantanée est donnée par :

$$\overline{\text{MTBF}} = \frac{1}{\alpha \bar{\beta} t^{\bar{\beta}-1}} = \frac{1}{\left(\frac{n}{t^{\bar{\beta}}} \right) \bar{\beta} t^{\bar{\beta}-1}} = \frac{t}{n \bar{\beta}} \quad (2.68)$$

2.8.6 Processus de branchement de Poisson (BPP)

Le processus de branchement de Poisson est adopté lorsque les temps entre défaillances sont identiquement distribués, mais ne sont pas indépendants. Tel que mentionné par [Ascher et Feingold \(1984\)](#), ce processus est la représentation d'une défaillance primaire qui enclenche une ou plusieurs défaillances secondaires subséquentes, dites défaillances subsidiaires. De ce fait, il y a dépendance entre les défaillances subsidiaires et la défaillance primaire, et souvent ces données de défaillances sont disposées en grappe lors de la représentation par nuage de points. Le processus de branchement de Poisson est peu documenté dans la littérature : il est souvent mentionné comme étant un jalon dans la méthodologie d'analyse des données de défaillances, mais guère appliqué, puisqu'il est très fréquent que les données soient indépendantes. D'ailleurs, à travers le recensement d'études de cas appliquées au domaine minier, aucune analyse des données ne démontrait explicitement une présence de dépendance, soit une forte corrélation dans l'espace des temps entre défaillances. Pour revenir au sujet, [Lewis \(1964a,b\)](#) est le premier à traiter en détail du branchement de Poisson dans ses articles. Une application pratique plus récente est consultable dans l'article scientifique de [Karyagina et al. \(1998\)](#). En ce qui concerne les livres de référence, les auteurs [Cox et Lewis \(1966\)](#), et [Rigdon et Basu \(2000\)](#) parlent brièvement de ce processus dans leur ouvrage respectif. Les auteurs [Rigdon et Basu](#) apportent comme conclusion partielle que l'estimation des paramètres et les déductions pour le processus de branchement de Poisson ne sont pas toujours évidentes à mettre en application. Les prochaines parties résument et adaptent le processus de résolution du branchement de Poisson et, de surcroît, quelques éclaircissements sont fournis à l'égard de certaines étapes de résolution mises en application.

l) Théorie

Le branchement de Poisson est la superposition des défaillances du processus primaire et des défaillances subsidiaires générées par les événements du processus primaire. Ce processus de Poisson est plus précisément caractérisé par les variables aléatoires Z_1, Z_2, \dots, Z_k , définies comme les temps entre les défaillances primaires (c.-à-d. les temps du k^e événement primaire) et les variables aléatoires $Y_1^{(1)}, Y_2^{(1)} + Y_2^{(2)}, \dots, Y_i^1 + \dots + Y_i^{s+1}$, définies comme les temps entre les défaillances subsidiaires et déclenchés par des défaillances primaires (c.-à-d. les temps du s^e événement subsidiaire). Les notations du branchement de Poisson sont montrées à la figure 2.20.

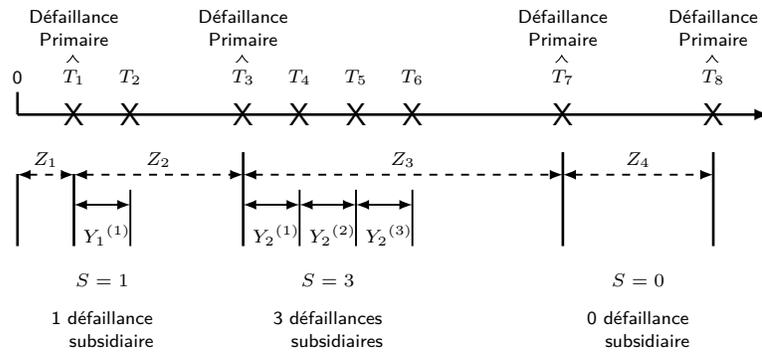


Figure 2.20: Processus de branchement de Poisson (tirée de [Rigdon et Basu, 2000](#))

Si le terme $H(t)$ est le nombre de défaillances secondaires attendu dans le processus fini de renouvellement, alors la contribution du k^e défaillant du processus subsidiaire pour le nombre de défaillances attendu et un intervalle de temps $[0, t]$ est ([Rigdon et Basu, 2000](#)) :

$$\mathbb{E} [N^{(k)}(t)] = \int_0^t H(t-z) f_k(z) dz \quad (2.69)$$

où $f_k(t)$ est la densité de probabilité des événements primaires. Dans l'intervalle de temps $[0, t]$, le nombre de défaillances attendu $\mathbb{E} [N^{(0)}(t)]$ du processus complet est la somme du nombre de défaillances primaires attendu et du nombre de défaillances secondaires attendu provenant du k^e défaillant primaire :

$$\mathbb{E} [N^{(0)}(t)] = \mathbb{E} [N(t)] + \sum_{k=1}^{\infty} \mathbb{E} [N^{(k)}(t)] = M_z(t) + \int_0^t H(t-z) \left[\sum_{k=1}^{\infty} f_k(z) \right] dz \quad (2.70)$$

où $M_z(t)$ est le nombre de défaillances attendu du processus primaire. Par définition, la fonction d'intensité $m_z(t)$ est :

$$m_z(t) = \frac{dM_z(t)}{dt} = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t) \quad (2.71)$$

De ce fait, l'équation (2.70) devient :

$$\mathbb{E} [N^{(0)}(t)] = M_z(t) + \int_0^t H(t-z) m_z(t) dz \quad (2.72)$$

Il est raisonnable de supposer que la séquence de défaillances primaires suit un processus de Poisson homogène. En conséquence, la densité de probabilité est $f_z(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$ et l'espérance du nombre de défaillances du processus primaire devient $M_z(t) = \lambda t$. L'espérance mathématique $M(t)$ du processus complet est ainsi obtenue (Cox et Lewis, 1966) :

$$M(t) = \mathbb{E} \left[N^{(0)}(t) \right] = \lambda t + \lambda \int_0^t H(t-z) dz \quad (2.73)$$

La fonction d'intensité $m(t)$ du processus complet est définie par :

$$m(t) = \frac{dM(t)}{dt} = \lambda [1 + H(t)] \quad (2.74)$$

Si le nombre de défaillances subsidiaires S est connu, le nombre de défaillances attendu $\mathbb{E} [H(t) | S]$ doit tendre vers S puisque toutes les défaillances subsidiaires sont tenues de se produire (Rigdon et Basu, 2000). En appliquant la limite suivante à $H(t)$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} H(t) = \mathbb{E}(S) \quad (2.75)$$

À partir des équations (2.74) et (2.75), la fonction d'intensité $m(t)$ est (Lewis, 1964a) :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} m(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda [1 + H(t)] = \lambda [1 + \mathbb{E}(S)] \quad (2.76)$$

II) Modélisation

Le principe de la modélisation du branchement de Poisson est de représenter le processus complet de la séquence de défaillances, qui englobe le processus d'occurrence des défaillances primaires et le processus d'occurrence des défaillances subsidiaires, dépendant du processus primaire. Afin de modéliser le processus des données subsidiaires et d'estimer les propriétés du premier ordre, certaines lois peuvent être mises à contribution telles que les distributions exponentielle et gamma. Le modèle à adopter se valide par la juxtaposition des fonctions de fiabilité sur une échelle logarithmique, où la fonction empirique de fiabilité $R_{n_0}(i)$ est comparée avec les données théoriques modélisées par la fonction de fiabilité $R_T(t)$ définissant ce processus de Poisson (Lewis, 1964a).

Le logarithme népérien du paramètre $R_{n_0}(i)$ pour le i^e temps entre défaillances est :

$$\ln R_{n_0}(i) = \ln \left(1 - \frac{i}{n_0 + 1} \right) \quad (2.77)$$

où n_0 est le nombre de défaillances. L'espérance $\mathbb{E}(T)$ est définie comme la moyenne des temps entre les défaillances successives dans le processus stationnaire du branchement de Poisson :

$$\mathbb{E}(T) = \frac{1}{\lambda(1+a)} \quad (2.78)$$

où le paramètre $a = \mathbb{E}(S)$ est la moyenne du nombre de défaillances du processus subsidiaire. De ce fait, l'équation générale de la densité de probabilité s'exprime ainsi ([Bartlett, 1955](#)) :

$$f_T(t) = \frac{R_T(t)}{\mathbb{E}(T)} \quad (2.79)$$

Selon la caractérisation du processus de branchement de Poisson, la fonction de fiabilité $R_T(t)$ des temps de bon fonctionnement t_i est donnée par :

$$R_T(t) = \frac{[1 + aR_Y(t)]}{(1+a)} \exp \left[-\lambda t - \lambda a \int_0^t R_Y(u) du \right] \quad (2.80)$$

où $R_Y(t)$ est la fonction de fiabilité du processus subsidiaire, représentée par la loi exponentielle ou la loi gamma. La densité de probabilité $f_T(t)$ du processus de branchement de poisson est quant à elle définie par :

$$f_T(t) = \frac{[\lambda + af_Y(t) + 2\lambda aR_Y(t) + \lambda a^2 R_Y^2(t)]}{(1+a)} \exp \left[-\lambda t - \lambda a \int_0^t R_Y(u) du \right] \quad (2.81)$$

où $f_Y(t)$ est la densité de probabilité du processus subsidiaire. Pour un temps $t \gg \mathbb{E}(Y)$, $R_Y(t) \rightarrow 0$ et $\int_0^t R_Y(u) du \rightarrow \mathbb{E}(Y)$. En substituant $b = \mathbb{E}(Z)/\mathbb{E}(Y) = 1/\{\lambda\mathbb{E}(Y)\}$ et en appliquant le logarithme sur la fonction de fiabilité $R_T(t)$ de l'équation (2.80), la relation est alors ([Karyagina et al., 1998](#)) :

$$\ln R_T(t) \approx -\ln(1+a) - \frac{a}{b} - \lambda t \quad (2.82)$$

Si la pente est existante pour l'échantillon de temps t , le terme λ est l'estimation de la pente de la droite ajustée sur la queue de la distribution $\ln R_{n_0}(i)$. La queue de la distribution est définie à partir du point de troncation, c'est-à-dire à partir où il y a une diminution ou un éloignement de la zone centrale de l'occurrence de défaillances subsidiaires. Ce point de troncation se détermine grâce aux valeurs générées de l'équation (2.77). Le terme a découle de la fonction d'intensité de l'équation (2.76) :

$$a = \frac{\mathbb{E}(Z)}{\mathbb{E}(T)} - 1 \quad (2.83)$$

où $\mathbb{E}(Z) = 1/\lambda$ est la moyenne des temps du processus primaire ajustés sur la queue de la distribution $\ln R_{n_0}(i)$. Si le terme a est petit ($a < 1$), alors la courbe résultante sera très proche du logarithme de la distribution de Poisson homogène (Karyagina et al., 1998). Le terme b de l'équation (2.82) est estimé à partir de l'ordonnée à l'origine de la droite ajustée sur la queue de la distribution $\ln R_{n_0}(i)$. La moyenne des temps $\mathbb{E}(Y)$ de la distribution subsidiaire $\{Y_i\}$ est donnée par :

$$\mathbb{E}(Y) = \frac{\mathbb{E}(Z)}{b} \quad (2.84)$$

Par définition, le taux de défaillance $z_T(t)$ du processus de branchement de poisson est le rapport de la densité de probabilité sur la fonction de fiabilité :

$$z_T(t) = \frac{f_T(t)}{R_T(t)} \quad (2.85)$$

La densité de probabilité $f_Y(t)$ de la loi exponentielle est définie par :

$$f_Y(t) = \beta \exp(-\beta t) \quad (2.86)$$

où $\beta = 1/\mathbb{E}(Y)$ est le paramètre d'intensité. Évaluée par l'intégrale de $f_Y(t)$, la fonction de fiabilité du processus subsidiaire $R_Y(t)$ pour une distribution exponentielle est :

$$R_Y(t) = \exp(-\beta t) \quad (2.87)$$

À partir des équations (2.80) et (2.87), le logarithme de la fonction de fiabilité $R_T(t)$ d'une loi exponentielle s'exprime par :

$$\ln R_T(t) = \ln \left\{ \frac{[1 + a \exp(-\beta t)]}{(1 + a)} \exp \left[-\lambda t - \lambda a \left(\frac{1 - \exp(-\beta t)}{\beta} \right) \right] \right\} \quad (2.88)$$

Si la distribution gamma est choisie pour la représentation de la séquence des données $\{Y_i\}$, alors la densité de probabilité $f_Y(t)$ est (Hogg et Craig, 1978) :

$$f_Y(t) = \frac{\beta^k t^{k-1} \exp(-\beta t)}{\Gamma(k)} \quad (2.89)$$

où Γ est la fonction gamma, $\beta = k/\mathbb{E}(Y)$ est le paramètre d'intensité et k est le paramètre de forme. La fonction de répartition $F_Y(t)$ de cette loi est définie par (Abramowitz et Stegun, 1972) :

$$F_Y(t) = \frac{\gamma(k, \beta t)}{\Gamma(k)} = \frac{1}{\Gamma(k)} \int_0^t [(\beta t)^{(k-1)} \exp(-\beta t)] dt \quad (2.90)$$

où γ est la fonction gamma incomplète. Le paramètre k est un nombre entier strictement positif et la fonction de répartition suit la distribution d'Erlang (Papoulis, 1991) :

$$F_Y(t) = 1 - \exp(-\beta t) \sum_{v=0}^{k-1} \left[\frac{(\beta t)^v}{v!} \right] \quad (2.91)$$

La fiabilité $R_Y(t)$ de la loi gamma est la soustraction de la valeur unitaire par la fonction de répartition :

$$R_Y(t) = 1 - F_Y(t) = \exp(-\beta t) \sum_{v=0}^{k-1} \left[\frac{(\beta t)^v}{v!} \right] \quad (2.92)$$

Par l'intégration des équations (2.80) et (2.92), le modèle adapté au logarithme de la fonction de fiabilité $R_T(t)$ pour une loi gamma est donné par Lewis (1964a) :

$$\ln R_T(t) = \ln \left\{ \frac{\left[1 + a \exp(-\beta t) \sum_{v=0}^{k-1} \left[\frac{(\beta t)^v}{v!} \right] \right]}{(1+a)} E \right\} \quad (2.93)$$

où

$$E = \exp \left[-\lambda t - ab \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{kt}{\mathbb{E}(Y)} \right) \sum_{v=0}^{k-1} \left[\left(\frac{t}{\mathbb{E}(Y)} \right)^v \frac{k^{v-1}(k-v)}{v!} \right] \right\} \right]$$

2.8.7 Processus avec approche bayésienne

L'un des obstacles à l'utilisation de processus stochastiques dans l'étude de la fiabilité est le manque potentiel de données d'entrées suffisantes à la modélisation. Les méthodologies statistiques sont limitées par rapport aux petits échantillons, étant donné que la quantité d'informations intrinsèques contenues dans de tels ensembles est par définition faible (Bendell, 1988). Le nombre minimum d'interventions recommandé pour un échantillon est de cinq (5) ou plus, étant donné qu'un trop faible échantillon apporte une limitation à la résolution (Garmabaki et al. 2015 ; Tobias et Trindade 2012). Une des solutions adoptées pour analyser un échantillon qui comporte très peu de données est la méthodologie appliquant le théorème de Bayes (Garmabaki et al. 2015 ; Louit et al. 2009 ; Percy et al. 1997). L'approche bayésienne reste toutefois discutée dans le cadre de l'analyse de la fiabilité en raison de la problématique à déterminer les distributions antérieures nécessaires à l'analyse (Tobias et Trindade, 2012). Pour obtenir ces faits, il faut avoir préalablement à la disposition des informations sur des aspects de fiabilité basés sur la physique des défaillances ou sur l'expérience antérieure provenant du recensement de défaillances. Il faut ajouter que les calculs nécessaires pour obtenir les paramètres estimés de certains modèles conjugués sont des intégrales complexes qui ne peuvent pas constamment être évaluées analytiquement, donc ils deviennent difficilement applicables à un cadre pratique (Rigdon et Basu, 2000). Cependant, l'emploi du théorème de Bayes est pertinent pour des situations particulières, dont l'analyse de la fiabilité en présence d'échantillon de faible taille, puisqu'il offre un compromis intéressant entre la supposition de paramètres basés sur des expériences ou des estimations, et l'hypothèse que rien n'est connu.

l) Théorie

La méthode dite bayésienne intègre une information *a priori* qui, combinée à la fonction de vraisemblance, fournit une information *a posteriori*. La distribution de probabilité dite « antérieure » ou « *a priori* » (de l'expression anglaise *prior distribution*) est un ensemble de paramètres inconnus et aléatoires décrivant une distribution de survie d'un échantillon et choisis en fonction de l'information connue. La distribution antérieure exprime des connaissances préalables ou des intuitions pour un ensemble de paramètres, et ces inductions conditionnelles sont connues sous le nom d'inférence statistique (Robert, 2007). Basée sur l'information provenant des observations x_1, \dots, x_n , la définition des paramètres par l'ensemble d'estimateurs γ se calcule par la distribution dite « postérieure » ou « *a posteriori* » (de l'expression anglaise *posterior distribution*).

À partir des temps entre défaillances successifs d'une entité représentés par t_1, \dots, t_n et du nombre de défaillances n , la relation de la distribution postérieure $p(\gamma|t)$ est proportionnelle à la distribution antérieure $p(\gamma)$, multipliée par la fonction jointe de densité de probabilité $f(t|\gamma)$ pour l'ensemble d'estimateurs γ (Gelman et al., 2013) :

$$p(\gamma|t) \propto p(\gamma)f(t|\gamma) \quad (2.94)$$

La densité de probabilité $f(t|\gamma)$ exprime la probabilité conditionnelle des données observées par rapport aux paramètres de modélisation. La fonction de vraisemblance $L(t_i|\gamma)$ de la distribution conditionnelle $p(t_i|\gamma)$ qui permet de définir l'ensemble d'estimateurs γ maximisant l'obtention de la probabilité pour l'échantillon étudié est :

$$L(t_1, \dots, t_n|\gamma) = \prod_{i=1}^n p(t_i|\gamma) \quad (2.95)$$

La fonction jointe $f(t|\gamma)$ qui tient compte de la multiplication de la distribution antérieure $p(\gamma)$ et de la fonction de vraisemblance $L(t_i|\gamma)$ de la densité de probabilité est exprimée par (Littlewood et Verrall, 1974) :

$$f(t|\gamma) = \int \dots \int \prod_{i=1}^n L(t_i|\gamma)p(\gamma)d\gamma = \prod_{i=1}^n \int f(t_i|\gamma)p(\gamma)d\gamma \quad (2.96)$$

En employant le théorème de l'inférence de Bayes, l'équation de la distribution postérieure $p(\gamma|t)$ est alors définie par (Robert, 2007) :

$$p(\gamma|t) = \frac{f(t|\gamma)p(\gamma)}{\int_0^{\infty} f(t|\gamma)p(\gamma)d\gamma} \quad (2.97)$$

Il est commun d'adopter la famille de la loi gamma pour une distribution conjuguée antérieure dans le domaine continu. Le choix de la distribution gamma est justifié par sa flexibilité avec deux paramètres strictement positifs (paramètre de forme a et paramètre d'intensité b) et un domaine d'application adéquat $(0, \infty)$. La distribution de gamma s'avère utile lorsque la fiabilité est mesurée en termes de MTBF (Kececioglu 1993 ; Tobias et Trindade 2012). Un autre avantage est la simplicité à générer les effets de la distribution antérieure par l'ajustement des valeurs assignées aux paramètres de la loi gamma.

La densité de probabilité de la distribution gamma antérieure est :

$$p(\lambda) = \frac{b^a \lambda^{a-1} \exp(-b\lambda)}{\Gamma(a)} \quad \lambda, a, b > 0 \quad (2.98)$$

$$\propto \lambda^{a-1} \exp(-b\lambda)$$

L'espérance mathématique de la distribution antérieure est définie par :

$$\mathbb{E}(\lambda) = \frac{a}{b} \quad (2.99)$$

Puisque le nombre de défaillances fait lacune dans un très faible échantillon, il faut supposer la fonction de probabilité qui décrit le mieux les données observées dans ce faible échantillon. L'hypothèse la plus triviale est de considérer des interventions caractérisées par un taux de défaillance constant. D'ailleurs, pour une entité réparable, il est assumé que le processus de Poisson homogène est un modèle raisonnable (Rigdon et Basu, 2000). Ainsi, les temps entre défaillances pour une entité étudiée peuvent être modélisés adéquatement par la distribution exponentielle et le paramètre λ . La fonction de vraisemblance définie par la distribution conditionnelle de type exponentiel est :

$$f(t|\lambda) = \prod_{i=1}^n \lambda \exp(-\lambda t_i) = \lambda^n \exp\left(-\lambda \sum_{i=1}^n t_i\right) = \lambda^n \exp(-\lambda t_n) \quad (2.100)$$

La densité de probabilité de la distribution postérieure $p(\lambda|t)$ est égale à l'équation (2.94) :

$$p(\lambda|t) = \left[\frac{b^a \lambda^{a-1} \exp(-b\lambda)}{\Gamma(a)} \right] [\lambda^n \exp(-\lambda t_n)]$$

$$\propto [\lambda^{a-1} \exp(-b\lambda)] [\lambda^n \exp(-\lambda t_n)] \quad (2.101)$$

$$\propto \lambda^{a+n-1} \exp(-[b + t_n] \lambda)$$

L'équation (2.101) dévoile que la densité de probabilité pour la distribution postérieure suit une distribution gamma avec les paramètres suivants :

$$p(\lambda|t) \sim \text{Gamma}(\lambda; a + n, b + t_n)$$

$$p(\lambda|t) = \frac{(b')^{a'} \lambda^{a'-1} \exp(-b'\lambda)}{\Gamma(a')} = \frac{\left(b + \sum_{i=1}^n t_i\right)^{a+n} \lambda^{a+n-1} \exp\left(-\left[b + \sum_{i=1}^n t_i\right] \lambda\right)}{\Gamma(a+n)} \quad (2.102)$$

L'estimation initiale du paramètre $\hat{\lambda}$ de la distribution antérieure est $\mathbb{E}(\lambda) = a/b$. Si un test enregistre n défaillances en fonction de la somme $t_n = \sum_{i=1}^n t_i$ des temps de bon fonctionnement, alors pour la distribution postérieure, qui est également une distribution gamma, l'espérance mathématique $\mathbb{E}(\lambda|t)$ égale à (Rigdon et Basu, 2000) :

$$\mathbb{E}(\lambda|t) = \frac{a'}{b'} = \frac{a + n}{b + t_n} \quad (2.103)$$

L'estimation de la MTBF ou de la MTTF est l'inverse de $\mathbb{E}(\lambda|t)$:

$$\text{MTBF} = \text{MTTF} = \frac{b'}{a'} = \frac{b + t_n}{a + n} \quad (2.104)$$

II) Modélisation

Une des façons de convertir les « connaissances » afin d'estimer les paramètres de la distribution gamma est l'utilisation des données réelles provenant de tests antérieurs effectués sur l'entité. Par le biais des informations de base contenues dans l'échantillon, il est valable de poser comme hypothèse que le paramètre a est égal au nombre total de défaillances et que le paramètre b est égal à la somme des temps de bon fonctionnement (Naikan, 2008). Cependant, s'il y a peu d'informations à propos des paramètres d'échantillon de la distribution antérieure, alors il est cohérent d'appliquer, à l'aide de l'approche bayésienne, des variables antérieures non informatives et de laisser les données de l'échantillon contrôler la configuration de la distribution postérieure (Tobias et Trindade, 2012). De manière générale, l'intégrale de la distribution antérieure non informative $\int p(\gamma)d\gamma$ est considérée impropre, puisque l'intégrale de la densité de probabilité n'est pas définie dans un domaine compris entre 0 et ∞ , ce qui n'empêche pas pour autant l'intégrale de la distribution postérieure d'être propre, puisque la densité de probabilité antérieure est combinée avec la fonction de vraisemblance afin de définir un modèle conjoint de probabilité appropriée (Gelman et al., 2013). Une approche régulièrement adoptée pour définir la distribution *a priori* non informative est celle introduite par Jeffreys (1939), où la distribution antérieure non informative est considérée pour un espace de paramètres.

Le principe de Jeffreys conduit à définir la densité antérieure non informative qui est proportionnelle à la racine carrée du déterminant de la matrice d'information de Fisher (Lehmann et Casella, 2006) :

$$p(\lambda) \propto \sqrt{|I(\lambda)|} \quad (2.105)$$

où l'information de Fisher est caractérisée comme le moment d'ordre deux de la dérivée du logarithme de la fonction de vraisemblance $f(t, \lambda)$ par rapport aux paramètres de la fonction objectif. De ce fait, l'information de Fisher est (Gelman et al., 2013) :

$$I(\lambda) = -\mathbb{E} \left[\frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} \ln f(t, \lambda) | \lambda \right] \quad (2.106)$$

Dans le cadre de cette recherche, il est considéré que la densité antérieure adopte la distribution conditionnelle de type exponentiel. Le logarithme de la fonction de vraisemblance est défini par l'équation 2.100 :

$$\ln f(t|\lambda) = \ln [\lambda^n \exp(-\lambda t_n)] = n \ln \lambda - \lambda t_n \quad (2.107)$$

Le maximum de vraisemblance est vérifié par le système d'équations qui tient compte de la dérivée de la fonction par rapport à l'estimateur λ . En appliquant la dérivée seconde, l'information de Fisher est alors proportionnelle à (Ghosh et Majumdar, 2011) :

$$\frac{\partial^2 \ln f(t|\lambda)}{\partial \lambda^2} = -\frac{n}{\lambda^2} \Rightarrow I(\lambda) = -\mathbb{E} \left[\frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} \ln f(t, \lambda) | \lambda \right] \propto \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.108)$$

À partir de l'équation 2.105, la distribution antérieure non informative de Jeffreys est (Berger, 1985) :

$$p(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda} \quad (2.109)$$

La densité de probabilité de la distribution postérieure est l'association de la fonction de vraisemblance et la densité de probabilité de la distribution antérieure :

$$\begin{aligned} p(\lambda|t) &\propto \lambda^{-1} [\lambda^n \exp(-\lambda t_n)] \\ &\propto \lambda^{n-1} \exp(-\lambda t_n) \end{aligned} \quad (2.110)$$

Avec la fonction de vraisemblance conditionnelle de type exponentiel pour les n défaillances et la distribution antérieure non informative $p(\lambda)$, la distribution postérieure $p(\lambda|t)$, propre et associée à la distribution gamma, dépend des paramètres postérieurs $a' = n$ et $b' = \sum_{i=1}^n t_i$:

$$p(\lambda|t) \sim \text{Gamma}(\lambda; 0 + n, 0 + t_n)$$

$$p(\lambda|t) = \frac{(b')^{a'} \lambda^{a'-1} \exp(-b'\lambda)}{\Gamma(a')} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n t_i\right)^n \lambda^{n-1} \exp\left(-\left[\sum_{i=1}^n t_i\right] \lambda\right)}{\Gamma(n)} \quad (2.111)$$

L'estimation de la MTBF ou de la MTTF est alors :

$$\text{MTBF} = \text{MTTF} = \frac{b'}{a'} = \frac{t_n}{n} \quad (2.112)$$

En employant l'approche bayésienne, l'estimation de la fiabilité pour une distribution antérieure non informative est donnée par (Bhattacharya, 1967) :

$$\hat{R}(t) = \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{t_n}\right)^{n-1}} \quad (2.113)$$

2.9 Études de la fiabilité et de la maintenance des équipements miniers

La présente section propose une revue de littérature orientée vers des articles scientifiques publiés où le thème de la sûreté de fonctionnement est abordé dans un contexte minier. Une liste conséquente, sans être exhaustive, des études publiées en lien avec la fiabilité et la maintenance des équipements miniers depuis 1989 est présentée au tableau 2.1. Ce tableau indique en ordre chronologique les auteurs qui y ont contribué, le type de processus de résolution mis en application et l'unité étudiée. La majorité des recherches de cette liste utilisent de façon systématique les processus stochastiques mentionnés à la section 2.8. Tout dépendamment si les séries de données de défaillances sont considérées indépendantes et identiquement distribuées, la méthode de résolution préconisée est soit le processus de renouvellement (RP), soit le processus de Poisson non homogène (NHPP), soit les deux. Ainsi, il est remarqué que la majorité des recherches appliquent le processus de renouvellement.

Tableau 2.1: Liste des études de la fiabilité et de la maintenance des équipements miniers

Auteur (année)	Processus		Modèle [†]	Équipement étudié
	RP	NHPP		
Kumar et al. (1989)	•		E, LN, W	chargeuse-navette
Kumar (1990)	•		E, LN, W	chargeuse-navette
Kumar et Klefsjö (1992)		•	LP	chargeuse-navette
Kumar et Vagenas (1993)	•		E, LN, W	chargeuse-navette
Paraszczak et Perreault (1994)	•		E, LN, W	chargeuse-navette
Majumdar (1995)		•	LL	pelle mécanique hydraulique
Vagenas et al. (1997)	•		E, LN, W	chargeuse-navette
Nuziale et Vagenas (2000)	•		E, W	chargeuse-navette
Pulcini (2001)		•	LP, LL	chargeuse-navette, camion
K. Rao et Prasad (2001)		•	LP	chargeuse-navette
Samanta et al. (2001)	•	•	E, LN, W, LP	pelle mécanique hydraulique
Roy et al. (2001)	•		E, LN, W	pelle mécanique hydraulique
Townson et al. (2002)	•		W	pelle à benne traînante
Hall et Daneshmend (2003a)	•		LN, W	chargeuse-navette, camion
Hall et Daneshmend (2003b)	•		LN, W	pelle mécanique hydraulique
Vagenas et al. (2003)	•		E, W	système d'excavation
Lhorente et al. (2004)	•		W	camion
Samanta et al. (2004)	•		Markov	chargeuse-navette
Barabady (2005)	•	•	E, LN, W, LP	usine de concassage
Barabady et Kumar (2007)	•		W	usine de concassage
Barabady et Kumar (2008)	•	•	E, N, LN, W, LP	usine de concassage
Elevli et al. (2008)	•		E, LN, W	pelle mécanique hydraulique
Louit et al. (2009)		•	LN	tractopelle
Vayenas et Wu (2009)	•		E, LN, W	chargeuse-navette
Uzgoren et al. (2010)	•		E, N, LN, W	pelle à benne traînante
Wijaya et al. (2012)	•		W	purgeuse
Gustafson et al. (2015)	•		W	chargeuse-navette
Allahkarami et al. (2016)	•		W	camion
Gölbaşı et Demirel (2016)	•	•	E, LN, W, LP	pelle à benne traînante
Lazarević et al. (2018)	•		E, N, LN, W, G	excavatrice à godets
Balaraju et al. (2018)		•	LP	chargeuse-navette
Hoseinie et al. (2018)	•		E, LN, W, G	foreuse jumbo
Balaraju et al. (2019)	•		E, W	chargeuse-navette
Rahimdel et al. (2019)	•		E, LN, W, G	foreuse rotative

[†] E : loi exponentielle (RP), N : loi normale (RP), LN : loi log-normale (RP), W : loi de Weibull (RP), G : loi gamma (RP), LP : loi de puissance (NHPP), LL : log-linéaire (NHPP).

En continuité avec les recherches citées, un sommaire est réalisé sur les études les plus récurrentes d'équipements mobiles dans les mines à ciel ouvert et les mines souterraines. Cette sélection spécifique de machines mobiles s'impose puisqu'il est plus complexe de prédire les défaillances lors de l'analyse des pannes d'un équipement dit mobile qu'un équipement dit fixe. Outre la fiabilité de l'ensemble des sous-systèmes, le bon fonctionnement d'un équipement mobile dépend aussi de l'environnement qui l'entoure et des compétences de l'opérateur. Par ailleurs, la mobilité de ces machines peut être un inconvénient puisque celles-ci peuvent tomber en panne dans des endroits inopportuns et rendant la maintenance plus difficile. Avant d'entrer en profondeur dans les articles des équipements miniers, un survol des études de conception et de développement d'outil logiciel est pertinent. Par la suite, les trois classes d'équipements abordés sont les chargeuses-navettes, les pelles mécaniques hydrauliques et les pelles à benne traînante. Ce chapitre se termine sur une synthèse de ces recherches et une présentation des avenues intéressantes à investiguer.

2.9.1 Études de conception et développement d'outil logiciel

Pour l'application des diverses méthodes statistiques et des processus de résolution simulant la fiabilité, les chercheurs mettent, entre autres, à profit les langages et les logiciels suivants : programmation Basic, Microsoft Excel®, STATGRAPHICS®, ReliaSoft® Weibull⁺⁺. Lors de l'utilisation de logiciels spécialisés, chaque étape du processus de résolution, ainsi que les hypothèses associées, doivent se résoudre à partir de différents tests et s'exécuter de manière indépendante. En termes de conception et de développement d'outil logiciel, les papiers recensés des auteurs [Nuziale et Vagenas \(2000\)](#) ; [Vagenas et al. \(2003\)](#) sont les seuls, à notre connaissance, qui traitent spécifiquement de la création de programme par l'approche fiabiliste dans un environnement minier souterrain. À l'intérieur de ces articles, la conception et la réalisation d'un prototypage logiciel ont été mises de l'avant afin d'obtenir un outil de fiabilité dans l'analyse de la performance des maintenances. Le logiciel faisait appel aux logiciels Microsoft Access® pour gérer la base de données, de Microsoft Excel® pour l'évaluation de l'indépendantes des données et de Expert-Fit® pour l'exécution du test d'ajustement. Cet outil apportait deux types d'analyse : la première, qui recensait le nombre d'interventions par sous-système et la deuxième, qui utilisait la méthode probabiliste afin d'accorder une loi de probabilité aux données de défaillances et évaluer la fiabilité. L'obtention des résultats des tests de tendance et de dépendance a été réalisée avec des méthodes graphiques (validation manuelle) et l'architecture du logiciel permettait seulement l'acquisition de la fiabilité pour les situations où les données admettaient un processus de renouvellement.

2.9.2 Études de la chargeuse-navette

La première partie se concentre sur les études de la chargeuse-navette (LHD, de l'expression anglaise *Load, Haul, Dump machine*), qui s'avère être le type de recherche le plus documenté dans la littérature, jusqu'à présent. La chargeuse-navette est une machine conçue pour l'excavation et le transport du remblai minier dans les environnements difficiles tels que l'exploitation minière souterraine (voir fig. 2.21). Elle est extrêmement robuste, très maniable et exceptionnellement productive (Tatiya, 2005). À travers les premières études de la chargeuse-navette (Kumar et al., 1989), les chercheurs ont effectué une analyse de la fiabilité d'une flotte composée de 19 chargeuses-navettes sur une période de 1 an. Préalablement, ils ont vérifié la tendance et la dépendance des données. La tendance et l'évolution des défaillances furent évaluées avec le graphique du temps total sur le test. À titre d'exemple, l'évaluation de la tendance par le graphique du temps total sur le test (voir art. 3.4.1) d'un moteur d'une chargeuse-navette présentait une courbe concave vers le bas, soit une dégradation du système. En conséquence, l'application d'une politique de maintenance préventive serait efficace et économique dans ce cas. Si les temps entre défaillances d'une chargeuse-navette admettent une évolution de la tendance, alors le processus de Poisson non homogène est appliqué. Avec l'exécution du test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov, les résultats ont démontré que la distribution de Weibull offrait la meilleure association parmi les temps entre défaillances et les valeurs théoriques.



Figure 2.21: Chargeuse-navette typique (tirée de [Caterpillar Inc., 2011](#))

Dans la thèse de doctorat de Kumar (1990), l'un des précurseurs de l'analyse de la fiabilité d'équipements miniers mobiles, le but était de développer des outils pour estimer la fiabilité et trouver des méthodes afin de réduire les défaillances. L'auteur est arrivé à la conclusion suivante : la majorité des temps de bon fonctionnement des équipements étaient sans tendance et sans corrélation.

Alors, ces données de défaillances sont considérées comme étant indépendantes et identiquement distribuées et suivent un processus de renouvellement. L'auteur a mis en application la méthode de Kolmogorov-Smirnov pour le test d'ajustement et a utilisé la méthode du maximum de vraisemblance pour estimer les paramètres des distributions statistiques. La distribution de Weibull à deux paramètres a offert le meilleur ajustement pour les temps de bon fonctionnement et la distribution log-normale a procuré le meilleur ajustement pour les temps de réparation.

Un autre article de [Kumar et Klefsjö \(1992\)](#) a observé le processus de Poisson non homogène avec le modèle de la loi de puissance dans l'étude du système hydraulique des chargeuses-navettes, dont les données d'avaries ont été recensées sur deux années d'opération. Les auteurs ont employé les équations mises en place par [Crow \(1975\)](#) pour calculer les paramètres d'échelle α et de forme β . Dans l'étude, la recherche de l'intervalle optimal de la maintenance préventive est estimée par la méthode graphique et la méthode analytique et les deux méthodologies ont donné des résultats similaires (450 h et 446 h).

D'après les recherches de [Nuziale et Vagenas \(2000\)](#); [Vagenas et al. \(1997\)](#); [Vayenas et Wu \(2009\)](#), les temps entre défaillances des chargeuses-navettes, recueillis sur une année d'opération, étaient indépendants et identiquement distribués. De plus, la distribution de Weibull offrait la meilleure association de probabilité avec les valeurs des temps de bon fonctionnement. Selon les études respectives de [Vagenas et al. \(1997\)](#), [Nuziale et Vagenas \(2000\)](#), les trois sous-systèmes dont les fiabilités ont été les plus faibles, après 100 h d'opération, sont ceux de l'hydraulique (11,7 % et 11,1 %), de la transmission (13,5 % et 16,1 %) et de la structure (16,6 % et 16,6 %).

L'étude de [Samanta et al. \(2004\)](#) a utilisé le modèle de Markov pour étudier la fiabilité de la chargeuse-navette. Selon leurs résultats, les trois sous-systèmes dont l'occurrence de défaillances était la plus élevée et affectaient le niveau de fiabilité, après 100 h d'opération, sont ceux de l'hydraulique (32,4 %), de la transmission (50 %) et des freins (58,1 %).

L'article de [Gustafson et al. \(2015\)](#) a démontré la différence de fiabilité entre une chargeuse-navette manuelle et une chargeuse-navette semi-automatique, et ce, en considérant des données de défaillances recueillies sur 3 ans et 9 mois. En employant la distribution de Weibull comme loi de probabilité, les auteurs ont conclu que le système de transmission et le moteur avaient la plus faible fiabilité dans le cas d'une chargeuse-navette semi-automatique. Cependant, dans les deux types de chargeuses-navettes, ce sont les systèmes hydraulique et électrique qui ont provoqué le plus fréquemment des arrêts pour l'exécution d'une maintenance corrective.

2.9.3 Études de la pelle mécanique hydraulique

La deuxième partie traite des études de la pelle mécanique hydraulique. Cette dernière est employée comme engin d'extraction de matières dans les mines (voir fig. 2.22). Les recherches de [Elevli et al. \(2008\)](#); [Hall et Daneshmend \(2003b\)](#) ont étudié le système complet de la pelle mécanique hydraulique. Dans les deux études, les auteurs ont montré que les données de défaillances suivaient un processus de renouvellement en effectuant un test de tendance et un test de corrélation. Dans le cas de [Hall et Daneshmend \(2003b\)](#), la loi de Weibull a offert la meilleure flexibilité lors de l'association probabiliste avec les temps de bon fonctionnement et la loi log-normale a donné la meilleure association probabiliste avec les temps de réparation. Ensuite, pour un échantillon étalé sur une année d'opération dans l'étude de [Elevli et al. \(2008\)](#), c'est la loi log-normale qui accordait le meilleur ajustement par l'association d'une distribution avec les temps de réparation.



Figure 2.22: Pelle mécanique hydraulique typique (tirée de [Caterpillar Inc., 2015](#))

Dans les publications de [Roy et al. \(2001\)](#); [Samanta et al. \(2001\)](#), les chercheurs ont étudié les défaillances des sous-systèmes pour deux pelles mécaniques hydrauliques, respectivement étendues sur deux ans et un an d'opération. À travers leur recherche, il a été remarqué que pour la majorité des sous-systèmes, les défaillances suivaient un processus de renouvellement. Dans l'étude de [Samanta et al. \(2001\)](#), seulement deux sous-systèmes ont été modélisés par le processus de Poisson non homogène (moteur et autres systèmes). Les auteurs ont constaté que le système hydraulique, le moteur et la transmission étaient les sous-systèmes les plus susceptibles de défaillir. Pour la pelle n° 1, les répartitions sur le total des défaillances de ces trois sous-systèmes étaient respectivement de 32 %, 28 % et 15 %. Dans le cas de la pelle n° 2, les résultats étaient respectivement de 34 %, 20 % et 16 % et pour la pelle n° 3, les résultats étaient respectivement de 32 %, 18 % et 14 %.

À partir du paramètre de forme β de la distribution de Weibull, il est possible d'être informé de l'état de dégradation du système et de l'évolution du taux de défaillance. Dans l'étude de [Samanta et al. \(2001\)](#) et la pelle n^o 1, le taux de défaillance était constant pour le système hydraulique et la pelle (période de durée de vie utile), mais croissant pour le godet et la transmission (accentuation des défaillances). Pour la pelle n^o 2, le taux de défaillance était constant pour le moteur, la pelle et les autres composants, mais croissant pour le système de chenilles. Dans la situation de la pelle n^o 3, le taux de défaillance était croissant pour le système de chenilles et le godet, mais décroissant pour les autres sous-systèmes.

Dans l'article de [Roy et al. \(2001\)](#), le système électrique et le godet étaient les sections les plus critiques pour l'ensemble des pelles mécaniques hydrauliques. Selon l'avis des chercheurs, pour un niveau de fiabilité de 90 %, l'intervalle d'entretien estimé pour chaque sous-système est trop court pour une mise en œuvre pratique. Par conséquent, les auteurs conclurent que l'intervalle d'entretien associé à un niveau de fiabilité de 75 % est acceptable dans un premier essai et après observation, il est possible d'ajuster le niveau de la fiabilité pour une valeur plus élevée, en fonction des bénéfices obtenus en termes de coût, de sécurité et d'efficacité opérationnelle. Le sous-système qui avait le temps de fonctionnement le moins élevé pour une fiabilité de 75 % a été le godet (18,9 h). Inversement, pour une fiabilité de 75 %, le système d'air a été le plus performant (154,2 h).

2.9.4 Études de la pelle à benne traînante

La troisième partie présente les études de la pelle à benne traînante. La pelle à benne traînante est un engin d'excavation principalement employé pour les mines à ciel ouvert (*voir* fig. 2.23). Sa fonction primaire est de racler le terrain (sable, gravier, terre) grâce à un godet, suspendu à une flèche de grue et traîné sur le sol par un câble en mouvement. Les auteurs [Uzgoren et al. \(2010\)](#) ont étudié la fiabilité de deux pelles à benne traînante avec des données de défaillances réparties sur cinq ans. En appliquant les méthodes de résolution, les auteurs ont démontré que les défaillances des équipements suivaient un processus de renouvellement. La distribution de Weibull a offert le meilleur ajustement des données de défaillances pour l'estimation de la fiabilité des pelles. Selon leurs résultats, après 10 heures d'opération, la fiabilité pour chacune des pelles respectives D_1 et D_2 était de 88 % et de 85 %. Après 140 heures d'opération, la fiabilité pour chacune des pelles était respectivement de 23 % et de 16 %. L'intervalle de temps entre les maintenances pour une fiabilité de 75 % fut respectivement de 23,75 h et de 19,06 h.



Figure 2.23: Pelle à benne traînante typique (tirée de [Caterpillar Inc., 2014](#))

Les auteurs [Gölbaşı et Demirel \(2016\)](#) ont analysé la fiabilité de deux pelles à benne traînante et ils ont décortiqué les équipements en sous-systèmes. Les chercheurs ont constaté que les temps entre défaillances des pelles, dispersés sur une année d'opération, suivaient un processus de renouvellement. Pour les deux pelles, le système de câblage qui joint le godet à la structure principale était la section qui avait le taux de défaillance le plus élevé dans le temps. Le godet a été la seconde section en importance qui a subi le plus de défaillance. La flèche a été la section qui a eu le moins d'avarie représentée par un faible taux de défaillance.

2.9.5 Synthèse des études

Les parties précédentes ont présenté le portrait de la revue de littérature sur la fiabilité, la maintenance et les facteurs d'efficacité des équipements miniers dits mobiles. Parmi ces articles scientifiques, il a été observé que les méthodes pour la collecte et l'analyse des données de défaillances sont similaires entre les études (temps entre défaillances, temps technique de réparation, test de tendance, test de dépendance, test d'ajustement) et sont basées sur les démarches mises en évidence par [Ascher et Feingold \(1984\)](#). De plus, dans la majorité des études, les données des pannes ont été recueillies sur une période comprise entre un an et deux ans.

Les tests de tendance et de dépendance permettent de vérifier si les données de défaillances sont entièrement aléatoires ou non. Il faut distinguer les méthodes graphiques et les méthodes numériques (voir sect. 3.4 et sect. 3.5). Dans la première méthode, les hypothèses de résolution doivent être validées de façon manuelle par l'observation des courbes et des séries de points sur leur graphique respectif. Pour les méthodes numériques, les résultats offrent une meilleure précision et, contrairement à la méthode graphique, il est possible de les valider de façon automatisée. Dans les études consultées où la tendance des données de défaillances a été vérifiée de façon numérique, cette validation s'est fait généralement avec un seul test (Allahkarami et al. 2016 ; Barabady et Kumar 2008 ; Eleveli et al. 2008 ; Majumdar 1995) et parfois avec deux tests (Gölbasi et Demirel 2016 ; Louit et al. 2009 ; Pulcini 2001). Puisque certaines tendances ont une plus grande sensibilité par rapport au nombre d'événements observé, il est préférable d'appliquer plusieurs tests pour valider la même hypothèse de résolution (Procaccia et al., 2011). Un test d'ajustement (test de Cramér-von Mises) est ainsi mis en application afin d'apporter une validation supplémentaire lorsque deux tests de tendance (test de Laplace et test MIL-HDBK-189) fournissent une validation d'hypothèse de résolution opposée (voir art. 3.7.3).

Dans les articles consultés, le test d'ajustement entre les lois de probabilité et les données observées a été effectué, soit avec le test du khi carré (χ^2), soit avec le test de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Ce dernier est largement plus employé (Allahkarami et al. 2016 ; Barabady et Kumar 2008 ; Eleveli et al. 2008 ; Kumar 1990 ; Kumar et Vagenas 1993 ; Paraszczak et Perreault 1994 ; Roy et al. 2001 ; Samanta et al. 2001 ; Uzgoren et al. 2010 ; Vagenas et al. 1997 ; Vayenas et Wu 2009) que celui du khi carré (Vagenas et al. 1997 ; Vayenas et Wu 2009). Le test non paramétrique de Kolmogorov-Smirnov est un test moins restrictif et il est considéré plus puissant que le test du khi carré (Kececioglu, 1993).

Le calcul de la fiabilité par un schéma fonctionnel de configuration en série (relation logique existant entre les états des systèmes) est le plus présent dans les études d'équipements miniers mobiles telles que la chargeuse-navette (Gustafson et al. 2015 ; Nuziale et Vagenas 2000 ; Samanta et al. 2004), la pelle hydraulique (Roy et al. 2001) et la pelle à benne traînante (Townson et al. 2002). Dans l'article de Vagenas et al. (1997), le schéma fonctionnel de fiabilité de certains sous-systèmes de la chargeuse-navette est représenté selon une configuration en parallèle (transmission et structure).

Au regard des recherches effectuées sur les équipements mobiles miniers, il est indéniable que les études de la chargeuse-navette ont apporté une grande part de contribution. Pourtant, il existe divers équipements miniers considérés critiques et essentiels pour les opérations d'extraction du minerai, que ce soit lors des activités de forage ou de stabilisation de galeries souterraines. Pour cette raison, il est pertinent dans le contexte de cette thèse d'analyser des équipements miniers mobiles dont les études scientifiques sont quasi inexistantes en dépit de leur importance.

Il faut mentionner que même si la distribution de Weibull s'adapte généralement bien aux données de défaillances, il est pertinent d'employer d'autres lois de probabilité. En plus de la distribution de Weibull, les distributions théoriques les plus fréquemment appliquées dans le domaine continue, telles que la loi normale, la loi log-normale et la loi exponentielle, sont adoptées dans cette thèse afin de maximiser le modèle d'adaptation des données permettant d'entrevoir le comportement de défaillance des équipements.

La présente recherche met à profit le processus de branchement de Poisson lorsque nécessaire. Dans une série de réparations d'une entité, il y a parfois des défaillances intermittentes qui provoquent une série de tentatives de réparation infructueuses avant que la défaillance primaire soit détectée et que la maintenance soit efficace. Les réparations infructueuses effectuées pour une même défaillance ne sont pas négligeables et il faut en tenir compte dans la modélisation de la fiabilité. Avec le modèle introduit par [Lewis \(1964a\)](#), il est possible d'adapter le processus de résolution du branchement de Poisson avec des temps entre défaillances d'une entité réparable.

CHAPITRE 3

DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

Sommaire : Ce chapitre aborde la démarche méthodologique établie pour le processus général de résolution dans l'analyse de la fiabilité et de la maintenance par l'approche fiabiliste. Les sections intègrent les tests et les équations nécessaires afin de traiter les données de défaillances. L'élaboration du processus général de résolution comporte, entre autres, les processus stochastiques, les hypothèses statistiques, la procédure de linéarisation des lois de probabilité et les tests d'ajustement.

3.1 Méthodologie

Comme vu à la figure 3.1, il est pertinent de se questionner sur la méthodologie à adopter pour l'élaboration de la stratégie de maintenance prévisionnelle. Le choix de techniques efficaces dépend des contraintes qui limitent l'applicabilité des outils, telles que la connaissance des données disponibles, les dispositifs de surveillance disponibles, la complexité des systèmes et l'exigence de la mise en œuvre, qui inclut la précision et les temps de calcul. En examinant les approches de pronostic en vue de l'élaboration d'une stratégie de maintenance prédictive (voir sect. 2.7), il va de soi que les méthodes à base de modèles et guidées par les données ne sont guère applicables dans la situation de la mine partenaire en raison de la grande variété d'équipements employés. Ce constat est confirmé par le nombre élevé d'équipements pour l'installation systématique de capteurs où les coûts d'installation et d'exploitation seraient non négligeables. De plus, la mobilité des machines dans un espace souterrain réduit l'applicabilité de techniques telles que la surveillance continue d'états d'opération et de dégradation : la connectivité à un serveur de recueillement de données peut être problématique lors du rafraîchissement et de l'envoi de l'information enregistrée par les capteurs et les bus de données d'un équipement minier. Également, la complexité des systèmes des diverses machines peut représenter un obstacle pour l'élaboration des modèles physiques. À l'état actuel, le pronostic basé sur l'expérience avec approche fiabiliste (suivi des interventions) est l'option qui est la mieux adaptée dans le cadre de cette recherche, puisqu'elle offre une étendue d'application et une adaptation conséquentes à la quantité d'équipements présents et aux limites existantes.

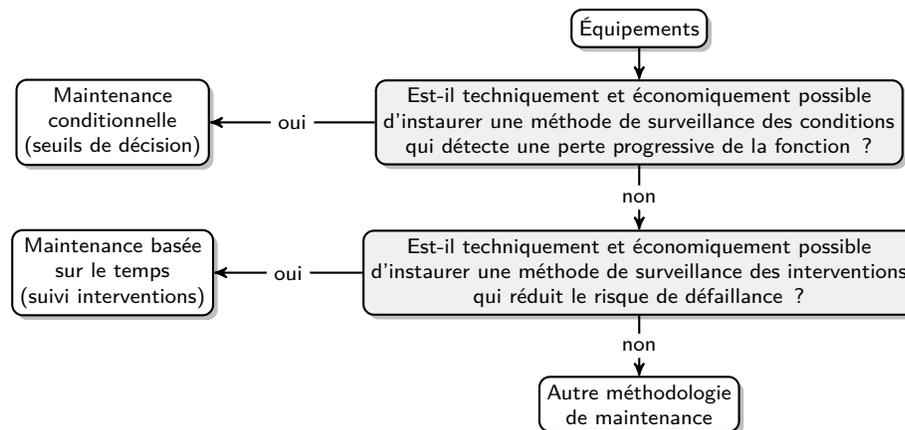


Figure 3.1: Logique de méthodologie de maintenance (adaptée de [Jardine et Tsang, 2013](#))

3.2 Source et traitement des données

Il a été discuté au chapitre 2 que l'utilisation des temps d'occurrence des interventions provenant de maintenances réelles est nécessaire afin de les associer aux modèles mathématiques des processus stochastiques. La modélisation de la fiabilité doit plus précisément être basée sur les données recueillies auprès de la mine en fonction des caractéristiques de défaillance des machines au fil du temps. Les durées entre les interventions, représentées par les temps de bon fonctionnement, sont associées aux valeurs des compteurs installés sur les équipements. De ce fait, il est primordial d'avoir une base de données fiable et à jour pour obtenir des résultats représentatifs des maintenances observées sur les équipements. Pour la gestion de maintenance assistée par ordinateur, Agnico Eagle emploie Oracle® JD Edwards (JDE), une suite avancée de progiciels de gestion intégrés ([Jacot et al., 2008](#)). Le département de maintenance de l'entreprise bénéficie du serveur de la base de données JDE afin de gérer les équipements, les bons de travail, les maintenances correctives et préventives, le personnel, l'inventaire, les commandes générées, etc. Ces informations sont accessibles à travers des tables de données consultables sur l'application tierce ReportsNow®. Cette application est une plateforme pour les clients de JDE qui permet d'accéder et de créer plus facilement des requêtes, des rapports opérationnels et des analyses en temps réel. À la suite de l'obtention des informations voulues par le rapport généré, les données des tables sont intégrées vers Microsoft Excel® afin d'y être traitées (onglet complémentaire inclus dans ReportsNow®). Le processus de traitement de données avec l'application ReportsNow® est discuté plus en détail dans le développement de l'outil automatisé (*voir* sect. 4.2).

3.3 Processus de résolution avec approche fiabiliste

La méthodologie dite fiabiliste emploie des méthodes statistiques pour adapter les distributions théoriques de probabilités aux données de défaillances réelles (Nuziale et Vagenas, 2000). La distribution de probabilité qui définit le modèle de fiabilité permet de prédire le comportement de défaillance d'une entité et les nouvelles données sont comparées à ce modèle pour identifier les éventuelles défaillances. Afin d'éviter de fausses prémisses avant toute analyse, les hypothèses des modèles proposés pour étudier la fiabilité doivent être validées à l'aide d'outils propres à leur usage. Si dans l'approche pratique le contexte théorique n'est pas suffisamment mis de l'avant, il est probable que cela fasse obstacle à l'analyse de défaillances et au choix du modèle à adopter (Vagenas et al., 1997). La figure 3.2 montre le processus de résolution général adapté de Ascher et Feingold (1984) pour l'analyse de la fiabilité et de la maintenance. En complément au diagramme de la référence, les tests et les modèles applicables ont été insérés afin de démontrer en détail la méthodologie appliquée et d'orienter les chercheurs vers les avenues possibles. Tel que traité au chapitre 4, le développement de l'outil automatisé se base sur cette méthodologie afin d'appliquer les algorithmes de l'approche fiabiliste.

L'étape initiale consiste à vérifier si l'hypothèse d'indépendance des données de défaillances est respectée. Si la validation de cette hypothèse n'est pas confirmée, alors les techniques de statistique classique ne pourront pas s'appliquer et il faudra utiliser la procédure du processus de Poisson non homogène (Ascher et Feingold, 1984). Les données indépendantes impliquent qu'elles ne comportent pas de tendance : chaque défaillance est indépendante de la défaillance précédente ou de la suivante. Les données identiquement distribuées indiquent que celles-ci proviennent de la même distribution de probabilité. Si le processus est libre de toute évolution de tendance, l'application du test de dépendance permet de préciser si les données suivent un processus de renouvellement ou un processus de branchement de Poisson. L'utilisation du coefficient de corrélation est un des outils numériques disponibles pour évaluer la dépendance (Cox et Lewis, 1966). Lorsqu'il y a réparation, il est possible d'émettre comme hypothèse que l'entité est restaurée comme à l'état original. C'est l'hypothèse « aussi bon que neuf » qui s'applique et la séquence de défaillances constitue un processus aléatoire appelé processus de renouvellement. Dans le cas contraire, il faut considérer une évolution de l'intensité de défaillance au fil du temps et la distribution de probabilité caractérisant la durée de vie tient compte de ce changement. Alors, l'hypothèse de « réparation minimale » est mise à contribution.

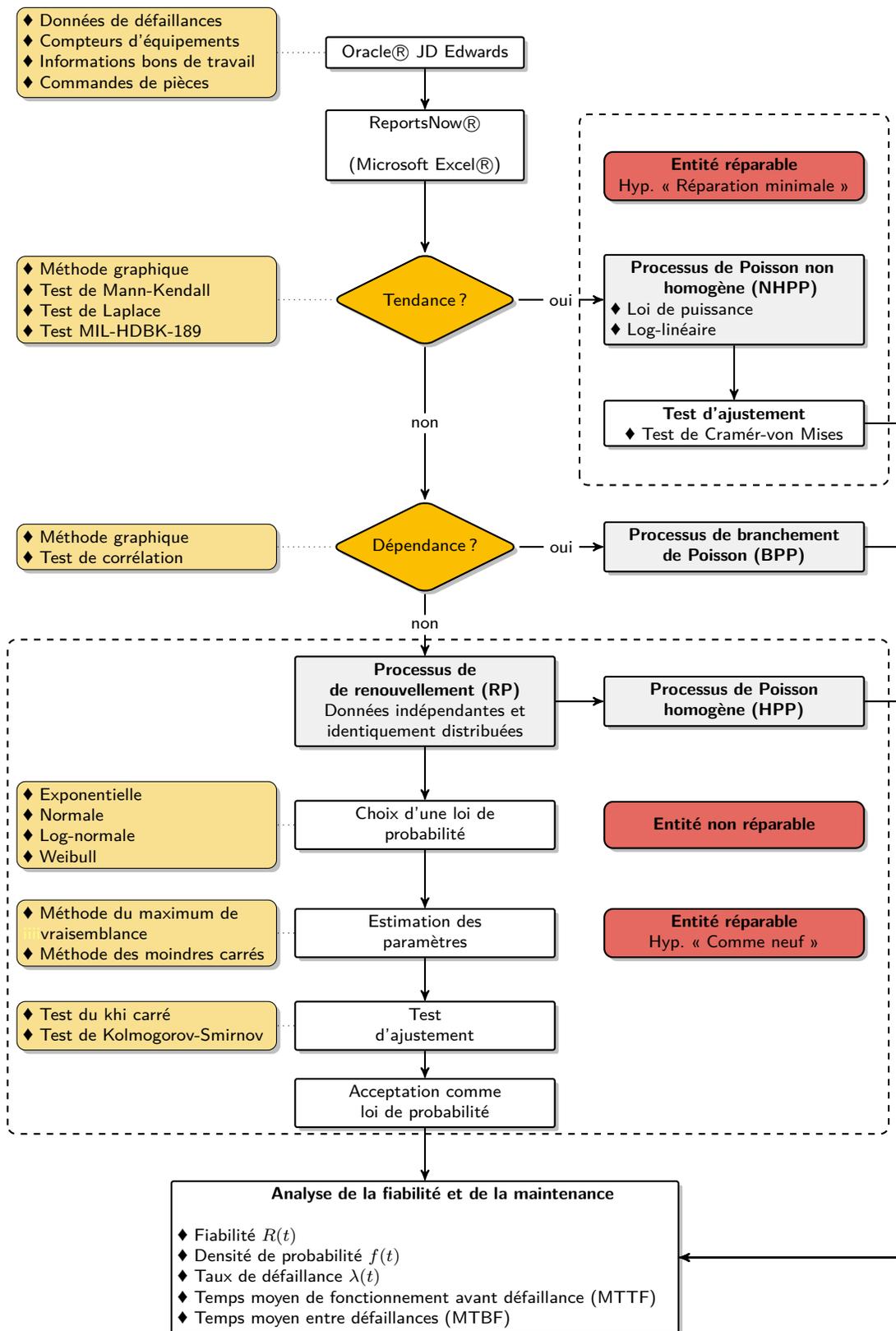


Figure 3.2: Processus de résolution (adaptée de Ascher et Feingold, 1984)

3.4 Test de tendance

Divers tests équivalents vérifient l'évolution de la tendance entre les données tels que la méthode graphique du temps total sur le test, le test de l'arrangement inverse (test de Mann-Kendall), le test de Laplace et le test MIL-HDBK-189. Dans la définition du test, il est dit paramétrique s'il vérifie des hypothèses et des conditions par rapport à une variable aléatoire, où cette dernière est fonction des paramètres d'une loi de probabilité précise. Dans le cas inverse, le test non paramétrique ne se base pas sur des distributions statistiques. Les prochaines parties introduisent les méthodes les plus employées, tout en distinguant les méthodes graphiques et les méthodes numériques.

3.4.1 Méthode graphique

Pour réaliser le test de tendance avec une méthode graphique, deux procédés sont présentés parmi plusieurs possibilités. Dans le premier procédé, c'est le tracé de l'évolution du processus de comptage en fonction du temps, quantifié par la succession de défaillances (numéro séquentiel). Le processus de comptage est caractérisé par l'intensité de défaillance λ , appelée également le taux d'occurrence de défaillances (ROCOF, de l'expression anglaise *Rate of Occurrence of Failures*). L'intensité de défaillance (taux absolu), employée pour les entités réparables, ne doit pas être confondue avec le taux de défaillance (taux relatif), qui est la probabilité conditionnelle qu'une entité tombe en panne dans un intervalle de temps. Elle est définie par la limite quand Δt tend vers zéro et par le nombre de défaillances N (Procaccia et al., 2011) :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbb{E}[N(t + \Delta t) - N(t)]}{\Delta t} \quad (3.1)$$

La figure 3.3 montre les possibilités de tendance pouvant être obtenues par cette méthode graphique. En (a) et (b), il y a présence de tendance et il existe une évolution de l'intensité de défaillances par la relation entre les données. Une courbe convexe vers le bas indique que l'intensité de défaillance croît et une courbe concave vers le bas indique que celle-ci décroît. En (c), la droite est linéaire et stationnaire, et a pour signification qu'il n'y aucune présence de tendance. En (d), il est possible de remarquer deux périodes successives qui diffèrent l'une de l'autre. Cela peut être une conséquence due à un changement de politique de maintenance ou à des conditions d'opération spécifiques (Louit et al., 2009). En (e), la tendance est non monotone et elle subit une variation non constante.

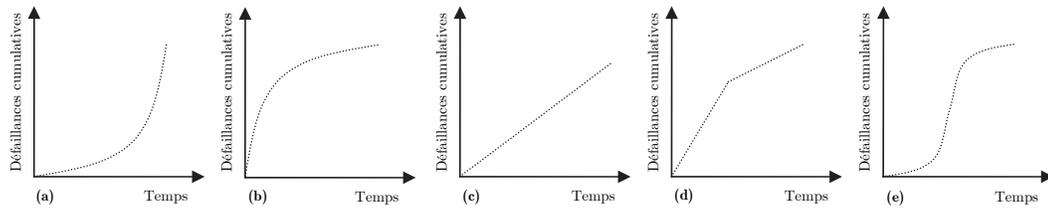


Figure 3.3: Graphiques des défaillances cumulatives en fonction du temps : (a) tendance croissante, (b) tendance décroissante, (c) sans tendance, (d) deux différentes périodes, (e) tendance non monotone (tirée de Louit et al., 2009)

Le deuxième procédé est fonction du temps total sur le test (TTT, de l'expression anglaise *Total Time on Test*). Le tracé du TTT est défini par le cumulatif u_i en fonction du ratio i/n . La statistique exprimée par u_i est donnée par (Rigdon et Basu, 2000) :

$$u_i = \frac{T_i}{T_n} \quad (3.2)$$

où T_i est la somme cumulative sur le temps de la i^e défaillance et T_n est le temps de la dernière défaillance. La somme cumulative sur le temps est définie par (Bergman et Klefsjö, 1984) :

$$T_i = \sum_{j=1}^i [(n-j+1)(x_j - x_{j-1})] \quad (3.3)$$

où $x_j - x_{j-1}$ est le temps de bon fonctionnement. La figure 3.4 indique les possibilités de tendance qui peuvent être reproduites par le graphique du TTT. Si le tracé du temps total sur le test est une courbe concave vers le bas (a) ou convexe vers le bas (b), alors la loi de puissance peut être considérée comme le modèle approprié. Dans la situation où il n'existe aucun tracé reconnaissable et où la courbe est tantôt concave vers le bas, tantôt convexe vers le bas (c), alors la modélisation par la loi de puissance ne convient pas (Louit et al., 2009).

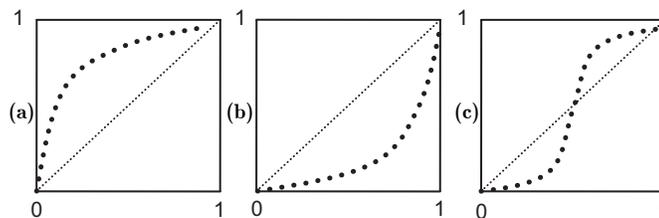


Figure 3.4: Graphiques TTT : (a) tendance croissante, (b) tendance décroissante, (c) tendance non monotone (tirée de Louit et al., 2009)

3.4.2 Test de Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall, aussi appelé le test de l'arrangement inverse (RAT, de l'expression anglaise *Reverse Arrangement Test*), est un test non paramétrique qui sert à déterminer si la tendance est identifiable dans une série temporelle (Gilbert, 1987). Le test de Mann-Kendall calcule le nombre d'arrangements inverses R entre les données de défaillances successives x_1, \dots, x_n . Un arrangement inverse est compté toutes les fois que $x_i < x_j$ pour $i < j$. Le nombre d'arrangements inverses R des données observées est défini par (Kendall, 1938) :

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \dagger(x_i < x_j) \quad (3.4)$$

où n est le nombre de défaillances et $\dagger(x_i < x_j)$ est l'indicateur comptabilisant le nombre d'arrangements inverses présents dans l'échantillon. Si la condition $x_i < x_j$ est vraie, alors l'indicateur prend la valeur de 1. Dans le cas où la condition $x_i < x_j$ est fausse, l'indicateur prend la valeur de -1. L'expression statistique du test de l'arrangement inverse Z_p est calculée par l'équation suivante (Mann, 1945) :

$$Z_p = \frac{R + \frac{1}{2} - \bar{R}}{\sqrt{\text{Var}(R)}} = \frac{R + \frac{1}{2} - \frac{n(n-1)}{4}}{\sqrt{\frac{(2n+5)(n-1)n}{72}}} \quad (3.5)$$

où \bar{R} est le nombre attendu d'arrangements inverses. La valeur Z_p est comparée à la valeur critique de la loi normale centrée réduite en fonction du seuil de signification α (voir annexe I). Pour le test statistique, l'hypothèse nulle H_0 admet un processus de renouvellement pour les temps entre les défaillances à l'opposition de l'hypothèse alternative H_1 qui admet un processus de Poisson non homogène pour les temps entre les défaillances. Au seuil de signification α , fixé classiquement à 5 %, il faut rejeter l'hypothèse nulle H_0 lorsque (Stephens, 2012) :

$$\text{rejet de } H_0 \text{ si } \begin{cases} Z_p > Z_{\alpha/2} \\ Z_p < Z_{-\alpha/2} \end{cases} \quad (3.6)$$

3.4.3 Test de Laplace

Le test paramétrique de Laplace compare la valeur moyenne des données observées dans un intervalle avec le point central de l'intervalle. Si la valeur moyenne des temps de défaillances s'éloigne du point central, alors il y a présence de tendance dans les interventions. La statistique du test de Laplace est définie avec le nombre de défaillances \hat{n} et le temps d'occurrence t_i de la i^e défaillance (Tobias et Trindade, 2012) :

$$Z_L = \frac{\sum_{i=1}^{\hat{n}} t_i - \frac{1}{2}\hat{n}t}{t\sqrt{\hat{n}/12}} \sim \mathcal{N}(0,1) \quad (3.7)$$

où $\hat{n} = n$ si le processus est censuré par le temps et $\hat{n} = n - 1$ si le processus est censuré par le nombre de défaillances. Similairement, $t = T$ est le temps total du test si le processus est censuré par le temps et $t = T_n$ est le temps observé sur la dernière défaillance si le processus est censuré par le nombre de défaillances. De plus, le test de Laplace se calcule pour un intervalle de temps d'observation $[T_a, T_b]$ (Kvaløy et Lindqvist, 1998) :

$$Z_{L[T_a, T_b]} = \frac{\sum_{i=1}^{\hat{n}} t_i - \frac{1}{2}\hat{n}(T_b + T_a)}{(T_b - T_a)\sqrt{\hat{n}/12}} \sim \mathcal{N}(0,1) \quad (3.8)$$

La statistique du test est approximativement distribuée selon une loi normale centrée réduite (voir annexe I). Si le résultat Z_L égal 0, alors il n'y a aucune tendance. Si le résultat est supérieur à 0, cela signifie une tendance croissante (dégradation de l'entité). Le contraire correspond à une tendance décroissante (amélioration de l'entité). Le test de Laplace valide le processus stochastique associé aux données observées par l'hypothèse nulle H_0 qui admet un processus de Poisson homogène (processus de renouvellement) contre l'hypothèse alternative H_1 qui admet un processus de Poisson non homogène. Pour le test d'adéquation bilatéral, il faut rejeter l'hypothèse nulle H_0 au seuil de signification α lorsque (Stephens, 2012) :

$$\text{rejet de } H_0 \text{ si } \begin{cases} Z_L > Z_{\alpha/2} \\ Z_L < Z_{-\alpha/2} \end{cases} \quad (3.9)$$

3.4.4 Test MIL-HDBK-189

Le test de tendance du *Military Handbook* 189 est une procédure de vérification pour l'évolution de l'intensité de défaillance mise au point par le gouvernement fédéral américain ([Département de la Défense des États-Unis, 1981](#)). La statistique du test est définie par le nombre de défaillances \hat{n} et le temps d'occurrence t_i de la i^e défaillance. Elle est distribuée selon une loi du χ^2 à $2\hat{n}$ degrés de liberté (*voir annexe II*) :

$$MH = 2 \sum_{i=1}^{\hat{n}} \ln \frac{t}{t_i} \sim \chi^2(2\hat{n}) \quad (3.10)$$

où $\hat{n} = n$ si le processus est censuré par le temps et $\hat{n} = n - 1$ si le processus est censuré par le nombre de défaillances. De plus, $t = T$ est le temps total du test si le processus est censuré par le temps et $t = T_n$ est le temps observé sur la dernière défaillance si le processus est censuré par le nombre de défaillances. La statistique du test pour un intervalle de temps $[T_a, T_b]$ s'exprime selon la forme suivante ([Stephens, 2012](#)) :

$$MH = 2 \sum_{i=1}^{\hat{n}} \ln \left(\frac{T_b - T_a}{t_i - T_a} \right) \sim \chi^2(2\hat{n}) \quad (3.11)$$

Le test MIL-HDBK-189 valide la tendance avec les mêmes hypothèses que le test de Laplace, soit l'hypothèse nulle H_0 qui admet un processus de Poisson homogène (processus de renouvellement) et l'hypothèse alternative H_1 qui admet un processus de Poisson non homogène. Pour le test bilatéral, il faut rejeter l'hypothèse H_0 au seuil de signification α lorsque ([Procaccia et al., 2011](#)) :

$$\text{rejet de } H_0 \text{ si } \begin{cases} MH < \chi_{1-\alpha, 2\hat{n}}^2 \\ MH > \chi_{\alpha, 2\hat{n}}^2 \end{cases} \quad (3.12)$$

3.5 Test de dépendance

Le test de corrélation détermine s'il y a une dépendance entre les données observées et vérifie l'intensité de la liaison qui existe entre elles. Ce test est utile pour rechercher des valeurs inhabituelles de temps entre défaillances dans un ensemble de données. Ces anomalies peuvent être liées à une collecte de données insuffisante, à des accidents ou à d'autres situations non représentatives du processus de défaillance (Louit et al., 2009). Les parties suivantes présentent respectivement la méthode graphique et la méthode numérique applicable pour le test de dépendance.

3.5.1 Méthode graphique

Le graphique de corrélation est le traçage des i^e données de temps de bon fonctionnement en fonction des $(i - 1)^e$ données de temps de bon fonctionnement pour $i = 1, \dots, n$ où n est le nombre de défaillances. Il est important que les points tracés soient dans le même ordre qu'ils ont été collectés (Vagenas et al., 1997). Les données sont dites indépendantes si le nuage de points formé par le tracé est distribué aléatoirement sur le graphique. Dans le cas contraire, elles seront fortement corrélées si les points forment une ligne droite ou forment plus de deux grappes de données distinctes. Cette constatation est observée à la figure 3.5 par la surbrillance des anomalies.

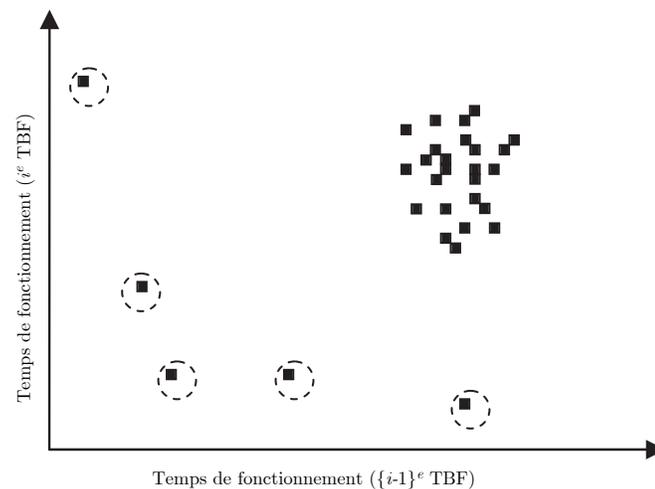


Figure 3.5: Graphique des durées de vie successives (tirée de Louit et al., 2009)

3.5.2 Corrélation de Pearson

L'utilisation de la corrélation sérielle, aussi appelée autocorrélation, est suggérée comme méthode numérique dans le cadre du test de dépendance des données de défaillances (Ascher et Feingold, 1984). De manière générale, la dépendance entre les données présentes dans l'ensemble X , formé par la variable quantitative X_i et par la variable quantitative décalée dans le temps X_{i+k} , se mesure avec le coefficient de corrélation de Pearson r_k (Cox et Lewis, 1966) :

$$r_k = \frac{\text{Cov}(X_i, X_{i+k})}{\text{Var}(X)} = \frac{\text{Cov}(X_i, X_{i+k})}{\sigma(X_i)\sigma(X_{i+k})} \quad (3.13)$$

où k est le décalage temporel, $\text{Var}(X)$ est la variance de l'ensemble X , $\text{Cov}(X, X_{i+k})$, $\sigma(X_i)$ et $\sigma(X_{i+k})$ sont respectivement la covariance et les écarts types des variables quantitatives X_i et X_{i+k} . S'il existe des séries de n défaillances avec des variables quantitatives X_i et X_{i+k} écrites sous la forme x_i et y_i , alors la relation de la dépendance se détermine par le coefficient de corrélation linéaire avec un décalage temporel de $k = 1$ (Vaurio, 1999) :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n-k+1} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{(n-k)s^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.14)$$

où x_i est la $(i-1)^e$ donnée de temps de bon fonctionnement et y_i est la i^e donnée de temps de bon fonctionnement. Après le calcul de l'estimation du coefficient de corrélation linéaire r , il faut déterminer si le coefficient est significativement différent de zéro. Le critère de rejet du test est basé sur l'hypothèse nulle H_0 qui admet une absence de corrélation ($r = 0$) contre l'hypothèse alternative H_1 qui rejette l'absence de corrélation ($r \neq 0$). Le test du coefficient de corrélation consiste à calculer la grandeur t_0 en fonction du nombre de défaillances n , du seuil de signification α et du degré de liberté ν , fixé classiquement à 2. Ensuite, elle est comparée à la valeur de la loi de Student (voir annexe III). Le test de dépendance bilatéral revêt la forme suivante (Lyonnet, 2000) :

$$\text{rejet de } H_0 \text{ si } t_0 = \frac{|r| \sqrt{n-\nu}}{\sqrt{1-r^2}} > t \sim S(n-\nu, 1-\alpha/2) \quad (3.15)$$

3.6 Choix d'une loi de probabilité et estimation des paramètres

Lorsque le processus de renouvellement est accepté comme procédé caractérisant les défaillances, il faut alors se tourner vers la sélection d'une loi de probabilité qui représente ces données. Une variété de méthodes existent pour l'estimation des paramètres des lois de survie en fonction des données observées : la méthode graphique (papier fonctionnel), la méthode du maximum de vraisemblance, la méthode des moindres carrés, etc. Les deux méthodes numériques les plus couramment appliquées sont ciblées ci-dessous.

3.6.1 Méthode du maximum de vraisemblance

À partir d'un échantillon de données x_1, \dots, x_n et de sa densité de probabilité $f(x, \theta)$, la méthode du maximum de vraisemblance (MLE, de l'expression anglaise *Maximum Likelihood Estimation*) consiste à trouver l'ensemble d'estimateurs θ qui maximise la probabilité d'obtention de l'échantillon étudié. La fonction de vraisemblance est donnée par :

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta) \quad (3.16)$$

La maximalisation s'accomplit en appliquant la dérivée de la fonction $\Lambda = \ln L$ par rapport à l'ensemble d'estimateurs θ , en posant l'équation égale à zéro et résolvant l'ensemble d'estimateurs simultanément. En résumé, le maximum de vraisemblance pour l'ensemble d'estimateurs θ est vérifié par le système d'équations généré pour chaque estimateur ([Johnson et al., 2011](#)) :

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \theta} = \frac{\partial (\ln L)}{\partial \theta} = 0 \quad (3.17)$$

l) Estimation pour une loi de Weibull

Aux fins de démonstration, la méthode du maximum de vraisemblance pour les estimateurs de la fonction Weibull est prise en compte. La fonction de vraisemblance de cette loi est définie par l'équation suivante ([Balakrishnan et Kateri, 2008](#)) :

$$L(x_i; \alpha, \beta) = \prod_{i=1}^n \frac{\beta}{\alpha^\beta} x_i^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{x_i}{\alpha}\right)^\beta \right] = \left(\frac{\beta}{\alpha^\beta}\right)^n \exp \left[-\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\alpha}\right)^\beta \right] \prod_{i=1}^n x_i^{\beta-1} \quad (3.18)$$

La maximalisation des estimateurs α et β de la fonction Weibull est :

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \alpha} = -\frac{n\beta}{\alpha} + \frac{\beta}{\alpha^{\beta+1}} \sum_{i=1}^n x_i^\beta = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \beta} = \frac{n}{\beta} - n \ln \alpha + \sum_{i=1}^n \ln x_i + \frac{\ln \alpha}{\alpha^\beta} \sum_{i=1}^n x_i^\beta - \frac{1}{\alpha^\beta} \sum_{i=1}^n x_i^\beta \ln x_i = 0 \quad (3.20)$$

L'équation (3.19) de l'expression du maximum de vraisemblance donne l'estimateur $\hat{\alpha}$:

$$\hat{\alpha} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^\beta \right]^{1/\beta} \quad (3.21)$$

À partir des équations (3.20) et (3.21), l'estimateur $\hat{\beta}$ se simplifie tel que :

$$\hat{\beta} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i^\beta \ln x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^\beta} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \right]^{-1} \quad (3.22)$$

La même analogie de maximalisation est applicable aux autres distributions de probabilité.

II) Estimation pour une loi exponentielle

La fonction de vraisemblance de la loi exponentielle est donnée par (Rigdon et Basu, 2000) :

$$L(x_i; \lambda) = \prod_{i=1}^n \lambda \exp(-\lambda x_i) \quad (3.23)$$

Après résolution, l'estimateur $\hat{\lambda}$ de la loi exponentielle est :

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (3.24)$$

III) Estimation pour une loi normale

La fonction de vraisemblance de la loi normale est définie par l'équation ci-dessous :

$$L(x_i; \mu, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3.25)$$

Après résolution, les estimateurs $\hat{\mu}$ et $\hat{\sigma}$ de la loi normale sont (Johnson et al., 2011) :

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.26)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu})^2} \quad (3.27)$$

IV) Estimation pour une loi log-normale

La fonction de vraisemblance de la loi log-normale est déterminée par :

$$L(x_i; \mu, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma x_i \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x_i - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3.28)$$

Après résolution, les estimateurs $\hat{\mu}$ et $\hat{\sigma}$ de la loi log-normale sont (Parkin et al., 1988) :

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad (3.29)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \hat{\mu})^2} \quad (3.30)$$

3.6.2 Méthode des moindres carrés

Le principe de la méthode des moindres carrés (LSM, de l'expression anglaise *Least Squares Method*) est de minimiser la somme des carrés des écarts appliqués aux valeurs médianes. Dans l'ingénierie de la fiabilité, la relation qui unit l'ensemble de temps entre défaillances n'est pas nécessairement linéaire. Le fait de transformer le modèle en équation linéaire facilite l'utilisation de la méthode des moindres carrés. La méthode de linéarisation diffère d'une distribution de probabilité à l'autre : il est nécessaire d'analyser chaque distribution et de découvrir la méthode de linéarisation adéquate. Après la transformation des variables, les modèles paramétriques peuvent être convertis et manipulés sous la forme linéaire. La valeur prédite est associée à chaque donnée de défaillances par l'équation $\hat{y}_i = \hat{a}x_i + \hat{b}$ et l'erreur est exprimée par la différence entre la valeur prédite \hat{y}_i et la valeur observée y_i . Ainsi, l'obtention de la droite d'ajustement avec la régression linéaire permet d'estimer les paramètres du modèle.

La méthode consiste à trouver la pente a et l'ordonnée à l'origine b de telle sorte que la somme des carrés des erreurs soit minimale (Stephens, 2012) :

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\hat{a}x_i + \hat{b})]^2 = \min(a, b) \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{a}x_i - \hat{b}]^2 \quad (3.31)$$

où \hat{a} et \hat{b} sont respectivement les estimateurs de a et de b . En fonction des dérivées partielles de la pente \hat{a} et de l'ordonnée à l'origine \hat{b} , le système d'équations S doit satisfaire les conditions suivantes :

$$\frac{\partial S}{\partial \hat{a}} = -2 \sum_{i=1}^n (x_i y_i) + 2\hat{a} \sum_{i=1}^n x_i^2 + 2\hat{b} \sum_{i=1}^n x_i = 0 \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \hat{b}} = -2 \sum_{i=1}^n y_i + 2\hat{a} \sum_{i=1}^n x_i + 2n\hat{b} = 0 \quad (3.33)$$

En isolant la pente \hat{a} de l'équation (3.32) et l'ordonnée à l'origine \hat{b} de l'équation (3.33), ces variables peuvent s'exprimer respectivement comme suit :

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^2} - \frac{\hat{b} \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} = 0 \quad (3.34)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - \frac{\hat{a} \sum_{i=1}^n x_i}{n} = 0 \quad (3.35)$$

En substituant l'équation (3.35) dans l'équation (3.34) :

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i) - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3.36)$$

Afin de confirmer si le choix de la distribution est adéquat, il faut employer un outil complémentaire : le test d'ajustement. Le test d'ajustement sert à valider ou à rejeter une loi de probabilité potentielle et ce sujet est abordé un peu plus loin (voir sect. 3.7).

3.6.3 Estimation des lois de probabilité

Dans un ensemble comprenant n défaillances ordonnées, les données peuvent être considérées individuellement comme une variable aléatoire, où chaque temps t correspond à un niveau empirique de défaillance $\hat{F}(t)$. La méthode d'approximation est une conversion d'indice i dans une plage comprise entre 0 à 1, représentant l'échelle de probabilité pour $\hat{F}(t)$ (Stephens, 2012). Pour estimer les lois de probabilité avec la fonction de répartition $F(i)$ de la i^e défaillance, diverses approximations empiriques sont possibles. Cette thèse préconise l'équation des rangs médians, dite de Benard et Bos-Levenbach (1953), qui définit l'approximation suivante :

$$\hat{F}(t) \approx F(i) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad (3.37)$$

Les prochaines parties abordent les estimations des données recueillies en fonction d'une loi de probabilité préétablie. Pour ce faire, il faut transformer les lois de probabilité sous formes linéaires avec la méthode des moindres carrés (Tobias et Trindade, 2012).

1) Estimation pour une loi exponentielle

Telle que vue à l'équation (2.20), la fonction de répartition $F(t)$ pour une loi exponentielle est :

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (3.38)$$

Il est remarqué que la fonction de l'équation (3.38) n'est pas une relation linéaire de forme $y = ax + b$. La linéarisation est obtenue en appliquant le logarithme népérien. Après simplification :

$$-\ln [1 - F(t)] = \lambda t \quad (3.39)$$

Sous la forme linéaire, les variables x et y peuvent être converties à partir de l'équation (3.39) :

$$\begin{cases} y = -\ln [1 - F(t)] \\ x = t \end{cases} \quad (3.40)$$

La pente a est l'approximation de λ et l'ordonnée à l'origine b est située à 0.

II) Estimation pour une loi normale

Définie à l'équation (2.26), la fonction de répartition $F(t)$ pour une loi normale est :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (3.41)$$

Par la relation qui existe entre la distribution normale (μ, σ) et la distribution normale centrée réduite $z = \mathcal{N}(0, 1)$, la fonction de répartition $F(t)$ est modifiée par la distribution normale standard $\Phi(z)$:

$$F(z) = \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left[-\left(\frac{x^2}{2}\right)\right] dx \quad (3.42)$$

Cette distribution est convertie en modifiant la variable z :

$$z = \left\{ \frac{t - \mu}{\sigma} \right\} \quad (3.43)$$

En combinant les équations (3.42) et (3.43), il est trouvé :

$$\begin{cases} \Phi\left\{\frac{t - \mu}{\sigma}\right\} = F(t) \\ \Phi^{-1}\Phi\left\{\frac{t - \mu}{\sigma}\right\} = \Phi^{-1}\{F(t)\} \\ \frac{t - \mu}{\sigma} = \Phi^{-1}\{F(t)\} \end{cases} \quad (3.44)$$

Sous la forme linéaire $y = ax + b$, la résolution (3.44) devient :

$$t = \sigma\Phi^{-1}\{F(t)\} + \mu \quad (3.45)$$

Les variables x et y sont déterminées à partir de l'équation (3.45) :

$$\begin{cases} y = t \\ x = \Phi^{-1}\{F(t)\} \end{cases} \quad (3.46)$$

La pente a est représentée par l'écart type σ et l'ordonnée à l'origine b exprime l'espérance μ .

III) Estimation pour une loi log-normale

La fonction de répartition $F(t)$ d'une loi log-normale a été présentée à l'équation (2.34) :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma_{\ln t} \sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}} \right)^2 \right] dx \quad (3.47)$$

Comme pour la loi normale, la variable z de la distribution cumulée standard d'une loi log-normale $\Phi(z)$ en fonction du logarithme est :

$$z = \left\{ \frac{\ln t - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}} \right\} \quad (3.48)$$

Après la combinaison des équations (3.47) et (3.48), l'équation résultante est déterminée par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \left\{ \frac{\ln t - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}} \right\} = F(t) \\ \Phi^{-1} \Phi \left\{ \frac{\ln t - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}} \right\} = \Phi^{-1} \{F(t)\} \\ \frac{\ln t - \mu_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}} = \Phi^{-1} \{F(t)\} \end{array} \right. \quad (3.49)$$

La résolution de l'équation (3.49) sous la forme linéaire devient :

$$\ln t = \sigma_{\ln t} \Phi^{-1} \{F(t)\} + \mu_{\ln t} \quad (3.50)$$

Les variables x et y sont converties à partir de l'équation (3.50) :

$$\left\{ \begin{array}{l} y = \ln t \\ x = \Phi^{-1} \{F(t)\} \end{array} \right. \quad (3.51)$$

La pente a est représentée par l'écart type $\sigma_{\ln t}$ et l'ordonnée à l'origine b est donnée par l'espérance $\mu_{\ln t}$.

IV) Estimation pour une loi de Weibull

Montrée à l'équation (2.40), la fonction de répartition $F(t)$ pour une loi de Weibull est :

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (3.52)$$

Pour obtenir une équation linéaire de type $y = ax + b$ avec la méthode des moindres carrés, une rectification linéaire est effectuée pour la distribution de Weibull de la manière suivante :

$$\begin{cases} \ln [1 - F(t)] = - \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \\ \ln \{ - \ln [1 - F(t)] \} = \ln \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \end{cases} \quad (3.53)$$

Sous la forme linéaire, la résolution (3.53) devient :

$$\ln \{ - \ln [1 - F(t)] \} = \beta \ln t - \beta \ln \alpha \quad (3.54)$$

Les variables x et y sont converties à partir de l'équation (3.54) :

$$\begin{cases} y = \ln \{ - \ln [1 - F(t)] \} \\ x = \ln t \end{cases} \quad (3.55)$$

La pente a est représentée par β et l'ordonnée à l'origine b égale à $-\beta \ln \alpha$.

3.7 Test d'ajustement

Le calcul des paramètres du modèle ne garantit pas que la distribution de probabilité appropriée ait été sélectionnée. Pour veiller à ce que le meilleur modèle de probabilité soit choisi, les paramètres sont estimés pour chaque modèle candidat et une comparaison est effectuée pour déterminer quel modèle de probabilité se traduit par le meilleur ajustement. En d'autres mots, il est nécessaire de déterminer dans quelle mesure les données théoriques correspondent aux données observées. Afin de valider cette information, deux tests d'ajustement sont régulièrement mis en application pour le processus de renouvellement : le test du khi carré (χ^2) et le test de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Quant au test de Cramér-von Mises (C_M^2), il permet de valider le modèle d'un processus de Poisson non homogène.

3.7.1 Test du khi carré

La méthode est basée sur la définition de classes et sur la différence entre le nombre de valeurs contenues dans chaque classe empirique et théorique (Pérès et Noyes, 2003) :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - F_i)^2}{F_i} \quad (3.56)$$

où f_i est la valeur empirique et F_i est la valeur théorique. Si la somme des écarts est plus grande que la valeur critique de la table khi carré ($\chi^2 > \chi^2_{\alpha, \nu}$), alors l'hypothèse nulle H_0 qui admet la distribution de probabilité est rejetée pour le seuil de signification α et du degré de liberté ν (voir annexe II). Le degré de liberté est :

$$\nu = k - 1 - \rho \quad (3.57)$$

où k est le nombre d'intervalles et ρ est le nombre de paramètres estimé pour la loi de probabilité. Le nombre d'intervalles k , en fonction des valeurs observées de l'échantillon N , se calcule à l'aide de la règle de Sturges (1926) :

$$k = 1 + (10/3) \log N \quad (3.58)$$

3.7.2 Test de Kolmogorov-Smirnov

Le test non paramétrique de Kolmogorov-Smirnov s'effectue en calculant la différence maximale entre la valeur de la fonction empirique F_n et la valeur de la fonction théorique F_i (Pérès et Noyes, 2003). Cette mesure est obtenue par l'équation de D_n , fonction des valeurs maximales de la limite supérieure D_n^+ et de la limite inférieure D_n^- :

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} (D_n^+, D_n^-) = \max_{1 \leq i \leq n} (|F_n - F_i|, |F_i - F_{n-1}|) < D_{N, \alpha} \quad (3.59)$$

La valeur du test est ensuite comparée à la valeur critique de la table K-S en fonction du seuil de signification α choisi et de l'échantillon N (voir annexe IV). Si la valeur D_n est inférieure à la valeur critique, alors la distribution de probabilité est acceptée (Tobias et Trindade, 2012). Le choix de la loi de probabilité correspond à la plus faible valeur de D_n calculée pour chaque distribution acceptée.

3.7.3 Test de Cramér-von Mises

Dans un échantillon observé, il est possible que les tests de Laplace et du MIL-HDBK-189 rejettent l'hypothèse nulle H_0 . Cependant, les données peuvent toujours être exemptes de tendance. Afin de vérifier que les données suivent un processus de Poisson non homogène avec l'intensité de défaillance définie à l'équation (2.51), le test d'ajustement de Cramér-von Mises est suggéré (Crow, 1975, 1990). Ce test mesure l'écart quadratique moyen entre la fonction empirique et la distribution spécifiée. Il permet de valider l'hypothèse nulle H_0 qui accepte un processus de Poisson non homogène contre l'hypothèse alternative H_1 qui rejette l'hypothèse nulle. La statistique de Cramér-von Mises s'exprime sous la forme suivante (Crow, 1990) :

$$C_M^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{i=1}^M \left[Z_i^{\bar{\beta}} - \frac{(2i-1)}{2M} \right]^2 \quad (3.60)$$

où $\bar{\beta}$ est le paramètre de forme non biaisé tel que définie à l'équation (2.66). Les termes sont $M = n$ et $Z_i = t_i/T$ si le processus est censuré par le temps, et $M = n - 1$ et $Z_i = t_i/T_n$ si le processus est censuré par le nombre de défaillances. Si la valeur de C_M^2 est supérieure à la valeur critique (voir annexe V), alors l'hypothèse nulle H_0 est rejetée au seuil de signification α choisi :

$$\text{rejet de } H_0 \text{ si } C_M^2 > C_{M,\alpha}^2 \quad (3.61)$$

CHAPITRE 4

CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL AUTOMATISÉ

Sommaire : Ce chapitre discute de la mise en fonction de l'interface de l'outil automatisé avec l'approche fiabiliste, à travers l'application ReportsNow® et le logiciel Excel®. En premier lieu, les critères de conception sont ciblés et le développement d'adaptation des algorithmes est expliqué par les étapes d'acquisition de données, de nettoyage de données et de résolution. En second lieu, une validation des algorithmes intégrés pour le développement de l'outil est faite à l'aide de la comparaison d'études de cas présents dans la littérature. Ces algorithmes sont par la suite implantés dans Excel® pour établir le modèle fiabiliste d'une entité. Pour terminer, par le biais de l'aide à la décision, un processus de pronostic est proposé afin d'anticiper les maintenances prévisionnelles.

4.1 Conception de l'outil automatisé

Dans sa finalité, la conception de l'outil est de permettre une analyse compréhensible des interventions et d'identifier rapidement des problématiques afin d'émettre des solutions améliorant le processus de maintenance. L'objectif principal est de prévoir le processus de dégradation avec l'approche fiabiliste et d'évaluer le type de maintenance le plus approprié en fonction du meilleur temps de remplacement. Dans la conception, les ensembles de séquences d'instructions pour les dispositifs d'analyse statistique sont programmés par le logiciel Excel®, intégré comme complément à ReportsNow®. Les critères suivants sont privilégiés pour l'architecture de l'interface :

- réaliser des simulations en temps réel avec une interface conviviale ;

- s'adapter selon un nombre aléatoire d'interventions ;

- décrire graphiquement le nombre d'interventions effectuées sur l'équipement, l'évolution de la fiabilité, l'évolution de la densité de probabilité et l'évolution du taux de défaillance dans l'intervalle de temps choisi ;

- prédire le temps moyen jusqu'à défaillance et/ou le temps moyen entre défaillances.

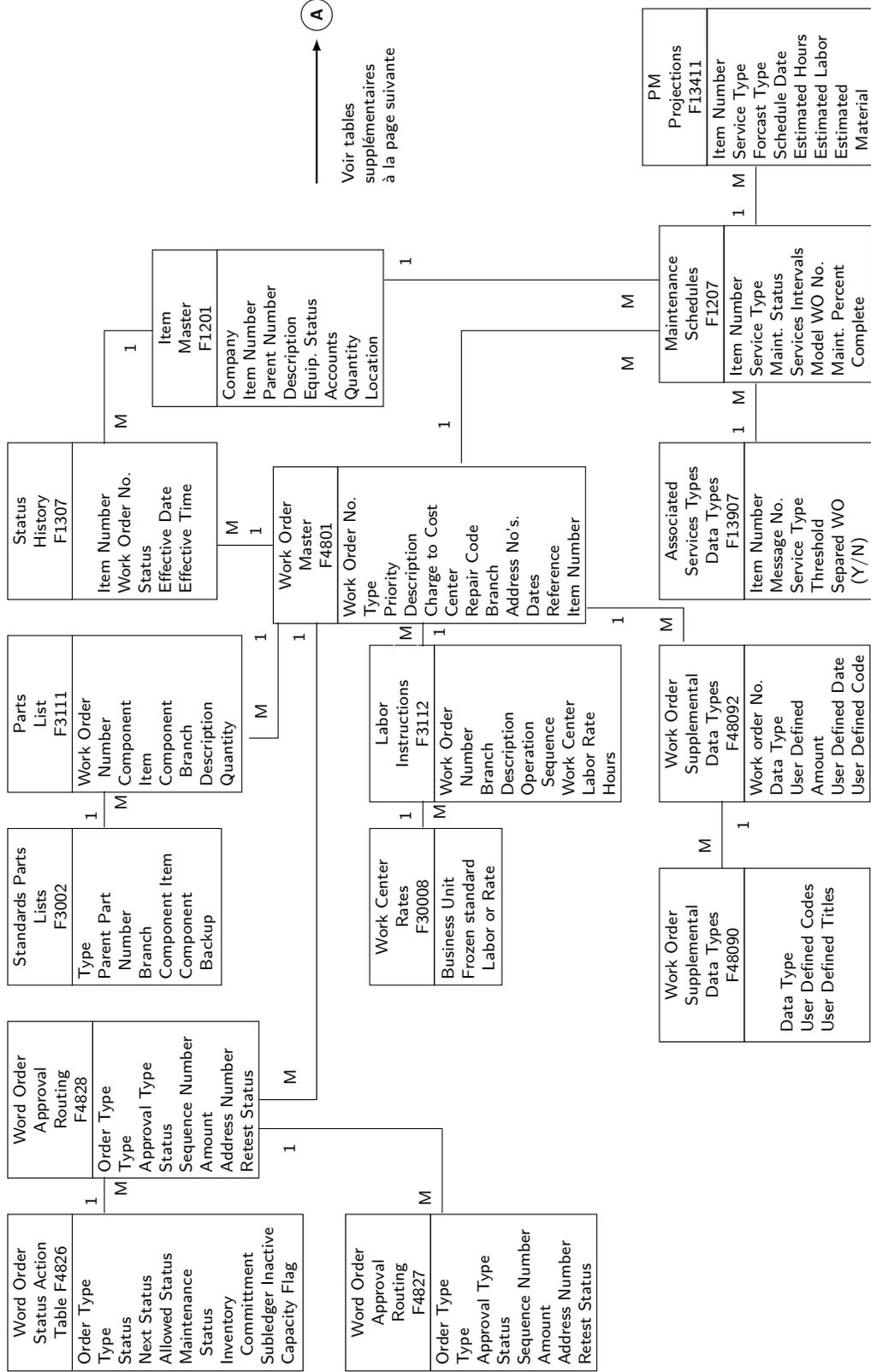
4.2 Développement de l'outil automatisé

Dans le cadre du développement, il ne faut pas perdre de vue le fait que l'outil doit être avant tout une interface accessible qui doit servir d'assistance à la prise de décision par le personnel du secteur minier lors des maintenances des équipements et le remplacement de leurs composants. Ensuite, l'étape primordiale est la définition de la source de données à laquelle les informations doivent être puisées. Pour cette recherche, les données des maintenances sont gérées et compilées par le serveur de base de données JDE, qui peut administrer un grand volume et une variété d'informations. Le serveur JDE employé par l'entreprise minière est intégré à l'application externe ReportsNow® (voir sect. 3.2). Après divers essais d'exportation de données vers des logiciels tiers, le meilleur candidat destiné au développement de l'outil est Microsoft Excel®. Plusieurs raisons expliquent ce choix. En premier et non le moindre, le logiciel Excel® est intégré directement à l'application ReportsNow®. À partir d'un rapport ReportsNow® préétabli, les données peuvent être exportées automatiquement vers Excel® pour la phase de traitement. Ce fait permet de diminuer considérablement le nombre de processus intermédiaire entre l'acquisition et l'analyse des données. De plus, comme le logiciel est disponible sur la majorité des postes de travail, cela évite l'achat supplémentaire d'un logiciel de gestion de données. Ledit logiciel a plusieurs fonctions à portée de la main pour l'utilisateur afin d'effectuer des calculs de statistiques, de probabilités et de fiabilité, ainsi que d'autres outils d'analyse de données. Pour des opérations plus complexes, l'implémentation de macros codés avec le langage VBA (de l'expression anglaise *Visual Basic for Applications*) par un onglet complémentaire de développement présent dans Excel®, permet de programmer des requêtes personnalisées. Alors, il est réalisable d'intégrer les modèles et les équations de résolution découlant des processus stochastiques. En résumé, l'environnement de ReportsNow® et son extension Excel® forment le moteur d'analyse et ils prennent en charge l'interface d'accueil, les modèles de résolution, ainsi que les indicateurs de fiabilité et de maintenance. Enfin, outre le système de gestion de maintenance JDE employé couramment dans les sites miniers, la démarche méthodologique globale à l'égard de la conception de l'outil de suivi des maintenances peut se généraliser par tout autre serveur de données disposant des informations essentielles telles que les références temporelles des interventions.

Le développement de l'outil est fonction de trois activités. La première activité est l'acquisition de données dont l'objectif est d'assurer la cohérence de l'information extraite lors de la collecte. Ces données proviennent de différentes tables exécutées par les pratiques d'enregistrement établies dans le système JDE. L'activité suivante tient compte de l'application des méthodes de nettoyage et de validation des données, garantissant ainsi que ces dernières sont exactes et adaptées aux analyses postérieures. La dernière activité traite de la résolution des données d'interventions définie précédemment dans le cadre théorique des processus stochastiques, tout en s'assurant qu'elle réponde aux besoins finaux des utilisateurs et que les résultats soient facilement interprétables à l'aide d'une représentation accessible.

4.2.1 Acquisition de données

Avant de discuter de la programmation de l'outil, il est pertinent d'approfondir la définition et l'acquisition des données. La représentation des données d'interventions par un modèle stochastique nécessite la collecte d'événements des maintenances correctives et préventives. Ces informations peuvent être obtenues à partir de multiples sources. Certaines de ces sources sont des faits historiques, sous la forme de bon de travail, où les données provenant des activités de maintenance sont précédemment enregistrées dans les tables codifiées du système de gestion JDE. Les tables de données principales intégrées dans le serveur JDE pour la gestion de la maintenance sont présentées en anglais, pour des raisons pratiques, à la figure 4.1. La requête des informations pour l'acquisition de données par l'outil développé fait appel aux tables suivantes : registre principal des bons de travail [*Work Order Master*] - F4801 (numéro de bon de travail, type, code réparation, etc.), liste de pièce [*Part List*] - F3111 (numéro de bon de travail, description, quantité, coût, etc.), registre principal des équipements [*Item Master*] - F1201 (compagnie, numéro d'équipement, numéro de parent, numéro de compte, quantité, etc.), registre des coûts d'analyse d'équipement [*Equipment Analysis Costs*] - F1383 (groupe d'équipement, numéro de compte, numéro d'immobilisation, type de livre, classification des coûts, quantité cumulée, etc.), grand livre comptable [*Account Ledger*] - F0911 (numéro de série, compte, quantité, date, etc.) et estimation de compteurs [*Meter Estimates*] - F1306 (numéro d'équipement, valeur compteur odomètre, valeur compteur de percussion, valeur compteur électrique, valeur distance de forage, etc.).



→ A
 Voir tables supplémentaires à la page suivante

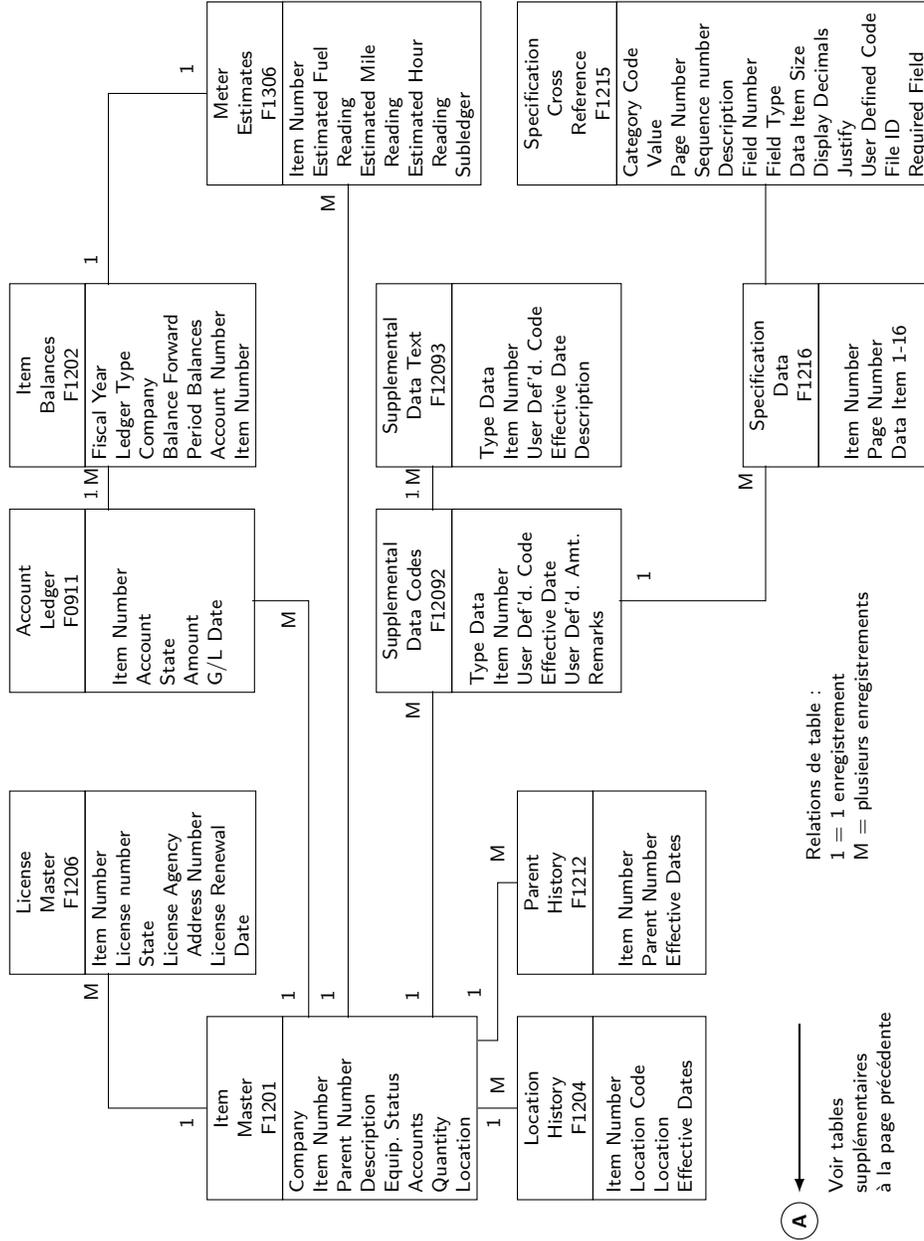


Figure 4.1: Tables de la gestion de la maintenance intégrées dans JDE (fournie par AEM)

En fonction des variables d'exécution, de la programmation de règles d'événements et des outils de calculs, il est possible d'exécuter et d'afficher les renseignements nécessaires avec l'application ReportsNow®. Les champs de données requis pour la modélisation et l'obtention des résultats finaux sont fournis au tableau 4.1. Tel que mentionné précédemment, le processus par lequel les données de maintenance sont enregistrées dans l'industrie minière est un système complexe qui nécessite une définition adéquate du travail demandé et l'intervention de diverses personnes tout au long du cycle de vie d'un bon de travail. Il y a notamment le système de codage, servant à établir la distinction entre les événements imprévus et les événements planifiés, qui s'avère bien présent, ainsi que les champs pour compiler le temps d'exécution de la maintenance. Cependant, un des problèmes rencontrés est l'absence de certaines informations pertinentes concernant la codification des bons de travail. Lors de l'observation de la base de données, le temps des travaux de maintenance inscrit se trouve dans le champ « temps arrêt estimé » et/ou dans le champs « heures réelles ». Parfois, ce temps n'est pas attribué et, conséquemment, il n'y a tout simplement aucune information sur la durée de la maintenance. Autre fait important, le temps d'exécution de la maintenance peut être attribué à un ensemble de plusieurs tâches, ce qui complexifie l'attribution d'un temps spécifique de maintenance pour un composant en particulier. Ces constats rendent la collecte de la durée de la maintenance plus compliquée et moins précise. Également, des codes complémentaires sont présents pour classer les événements liés aux maintenances tels que le type d'entité (code composant, voir annexe VI) et le type d'action (code action, voir annexe VII). Néanmoins, même si un système de codification pour les bris existe dans la fiche du bon de travail, ce ne sont pas tous les employés qui l'appliquent systématiquement aux travaux associés lors des maintenances. D'ailleurs, plusieurs intervenants peuvent classer le bon de travail et l'interprétation peut être différente d'un intermédiaire à un autre, ainsi qu'à l'ambiguïté possible de la défaillance. Pour ces raisons, les champs des temps d'exécution estimés/réels de la maintenance et les codes composant/action ne sont pas pris en considération dans la collecte de données puisque les problématiques citées spécifiques peuvent en diminuer la qualité.

Tableau 4.1: Champs nécessaires à la collecte de données

Champs	Nécessité	Fonction
Code composant (système)	requis	information entrée manuellement par l'utilisateur
Description composant	optionnelle	information descriptive du composant
N° division	requis	numéro spécifique à chaque division de l'entreprise (mine ou bureau administratif)
N° unité	requis	numéro spécifique à chaque équipement, information entrée manuellement par l'utilisateur
N° immobilisation	requis	numéro spécifique associé au N° unité, champs requis pour le compteur mensuel
N° de série	requis	extension du N° immobilisation, champs requis pour le compteur journalier
N° de parent	requis	numéro de parent auquel appartient l'unité (composé des premières lettres du N° unité)
N° BT	requis	numéro de bon de travail associé à l'intervention
Type BT	requis	code associé au type de bon de travail (maintenance corrective ou maintenance préventive)
Priorité BT	requis	code associé à la priorité du bon de travail (immédiat, bris de calendrier, date requise, équipement en arrêt ou travaux en arrêt)
Date de début	requis	date de début de la requête, information entrée manuellement par l'utilisateur
Date de fin	requis	date de fin de la requête, information entrée manuellement par l'utilisateur
Date de réalisation	requis	date associée à la réalisation de l'intervention
Compteur mensuel	requis	valeur compteur cumulée à la fin du mois précédent, associée au N° unité
Compteur journalier	requis	valeur compteur cumulée depuis le début du mois jusqu'à la date de réalisation, associée au N° unité
Compteur	requis	somme des valeurs du compteur mensuel et du compteur journalier
Groupe équipement	requis	champs requis pour le compteur mensuel
Classement coût	requis	champs requis pour le compteur mensuel
Type de livre comptable	requis	champs requis pour le compteur mensuel et le compteur journalier
N° compte	requis	champs requis pour le compteur journalier
Type de document	requis	champs requis pour le compteur journalier
Code achat	requis	code associé au composant (réparable ou non réparable)
Montant transaction	optionnelle	coût total de la maintenance
Temps d'exécution estimé	optionnelle	temps estimé de la maintenance
Temps d'exécution réel	optionnelle	temps réel de la maintenance
Code composant	optionnelle	code associé au type de composant
Code action	optionnelle	code associé au type d'action exécutée

Il est à rappeler que le développement proposé dans le cadre de cette recherche est d'automatiser les processus de résolution, en tenant compte des limites existantes. Il faut imaginer les processus de résolution comme une boîte noire où les entrées (interventions, données des compteurs, commandes effectuées) permettent l'obtention des sorties (indicateurs de fiabilité et de maintenance) à l'aide d'un minimum d'opération. De ce fait, les entrées doivent être valides pour obtenir des valeurs de sorties fiables. Les données initiales doivent être accessibles, statistiquement robustes pour la taille de l'échantillon, et de qualité suffisante pour construire et satisfaire les hypothèses de résolution requises par les modèles (Hodkiewicz et Montgomery, 2014). Les échantillons de petite taille peuvent provenir d'une faible population d'interventions disponibles dans le temps d'observation ciblé. La méthodologie générale considère le nombre minimum suffisant à cinq interventions. En d'autres termes, s'il y a moins de cinq données d'interventions comprises dans l'échantillon étudié, ce dernier est considéré comme un ensemble très faible en information et la résolution par l'approche bayésienne est suggérée. Par ailleurs, il est important de considérer qu'il existe des situations où il n'est pas possible d'obtenir des données d'interventions pour le temps d'observation demandé. C'est le cas lorsque l'équipement est neuf ou lorsque ce dernier n'a pas opéré pendant un temps suffisant. Cette situation est également valable quand un composant n'a pas régulièrement de défectuosité. Autre point plus spécifique au serveur actuel de la mine partenaire, en raison des limites au niveau du volume de données que peut contenir le serveur ReportsNow®, ce dernier ne permet pas d'acquérir les valeurs de certains types de compteurs d'équipement avant une année spécifique. En conséquence, la date initiale de la requête doit se situer minimalement au début de l'année 2014.

4.2.2 Nettoyage de données

Les données obtenues par l'extraction des enregistrements contiennent parfois des éléments inexacts ou incomplets qui doivent être rectifiés avant d'être incorporés dans un modèle (Jardine et al., 2006). Cette rectification nécessite une phase de nettoyage approfondi des données par un processus d'inspection, afin d'obtenir un échantillon avec le moins d'anomalies possibles. Elles peuvent provenir, entre autres, de doublon de bons de travail ou de quantité de commande inadéquate (nulle ou négative). La génération de doublon de plusieurs bons de travail pour un seul événement résulte, dans certains contextes, d'une confusion provenant d'une activité de maintenance effectuée sur plusieurs quarts de travail et avec différentes équipes. Les quantités négatives ou nulles des bons de travail résultent d'un retour d'article dû à une annulation de la commande, d'un crédit ou d'une erreur lors de la commande (p. ex. choix de la mauvaise pièce).

La réalisation d'un nettoyage à base de règles par un langage de programmation a pour but de limiter des opérations manuelles telles que l'inspection et la classification. Ce nettoyage s'appuie sur l'exercice d'élimination des doublons utilisant des règles de quantité de données (Prasad et al., 2011). Le traitement de données nécessite l'utilisation de plusieurs itérations qui se distingue en deux étapes : la première qui examine l'ensemble de l'échantillon de données et la deuxième qui effectue un processus de rectification. L'algorithme doit être en mesure de gérer les interventions en comparant les commandes ayant le même numéro de bon de travail associé au composant recherché et de calculer la différence entre les quantités. À la fin de l'exercice des commandes entrées/sorties, il est primordial que la liste des interventions représente seulement des quantités positives en éliminant les interventions non représentatives. La figure 4.2 illustre une situation où les interventions doivent être ajustées correctement.

Informations entrées par l'utilisateur

Gestion des interventions entrées/sorties

Valeur compteur à la date d'intervention

Valeur compteur à la date de fin

Code composant (système)	N° unité	Date de début	Date de fin
151231	BO2102	2014-02-01	2017-12-31

Code Description Composant	N° unité	N° Type Doc. BT	Priorité BT	Qté Date Trmsac.	Compteur date de fin	Compteur date de fin	Code achat			
151231	MACHOIRE	BO2102	936296	1	2	1.00	2014-02-13	1899	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	964008	1	2	-1.00	2014-03-13	1924	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	964008	1	2	1.00	2014-03-13	1924	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	970498	1	2	1.00	2014-04-11	1978	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	970498	1	2	1.00	2014-04-14	1978	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1004093	1	2	1.00	2014-06-12	2136	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	890722	6	4	1.00	2014-08-03	2204	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1182393	1	2	2.00	2015-05-09	2763	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1160543	6	4	1.00	2015-05-22	2779	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1160543	6	4	1.00	2015-05-22	2779	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1160543	6	4	-2.00	2015-05-23	2779	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1160543	6	4	-2.00	2015-05-26	2779	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1161827	1	4	-1.00	2015-11-10	3086	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1298828	1	2	2.00	2015-11-23	3122	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1298829	1	2	-1.00	2015-11-26	3127	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1413047	1	2	1.00	2016-05-28	3492	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1435062	1	1	1.00	2016-07-03	3688	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1884746	1	2	2.00	2017-02-28	4046	4503	REP
151231	MACHOIRE	BO2102	1881061	1	1	1.00	2017-07-27	4330	4503	REP

Figure 4.2: Interface de la gestion des interventions entrées/sorties

4.2.3 Résolution

La modélisation des algorithmes de résolution pour l'analyse de la fiabilité est fonction des processus stochastiques présentés aux chapitres précédents et indiqués au logigramme de la figure 4.3. Les modèles associés sont programmés avec le langage VBA et sont exécutés à partir de boutons de commande présents dans l'interface d'accueil du rapport personnalisé ReportsNow®. Une série d'instructions relatives à l'approche fiabiliste sont regroupées au sein d'algorithmes dans le but d'exécuter automatiquement les différentes phases du processus général de résolution, où chaque étape importante est construite et disponible dans un onglet spécifique de Excel®. Afin de résoudre les modèles basés sur les processus stochastiques et de fournir des estimations fiables, il faut que les algorithmes de traitement de données collectent les interventions de maintenance disponibles dans l'historique de l'équipement (voir art. 4.2.1). Les interventions se composent d'événements de défaillances et contiennent en parallèle des événements préventifs. Les intervalles temporels entre ces interventions représentent les temps de bon fonctionnement nécessaires à l'approche fiabiliste et cela exige que ces événements associés aux interventions soient enregistrés en temps réels. Pour la définition du temps de bon fonctionnement, l'emploi de la valeur du compteur est plus précis que la valeur associée au temps calendaire. Ce constat s'explique par le fait que les équipements mobiles miniers ne sont pas utilisés de manière continue et durant les périodes où ils sont non opérationnels (en maintenance ou arrêt prolongé), les compteurs n'enregistrent pas l'évolution temporelle. Dès lors, la première phase de résolution consiste à classer et associer les valeurs de compteurs de l'équipement. Cette opération tient compte des données d'interventions enregistrées dans le système en fonction de l'intervalle de temps calendaire de la requête. À la mine partenaire, le temps d'opération d'un équipement est mesuré, entre autres, par la lecture de compteurs installés sur ce dernier. Divers types de compteurs sont disponibles selon la classe d'équipement : compteur d'heures du moteur (odomètre), compteur d'heures électrique, compteur d'heures de percussion, etc. D'autres mesures de comptage existent telles que l'enregistrement du nombre de tonnes hissé, du nombre de cycles et de la distance de forage. À la suite de la phase de nettoyage des données (voir art. 4.2.2), l'outil affiche un diagramme des interventions dans le but de donner une vue d'ensemble de tous des évènements de maintenance effectués selon les équipements et l'intervalle de temps ciblés.

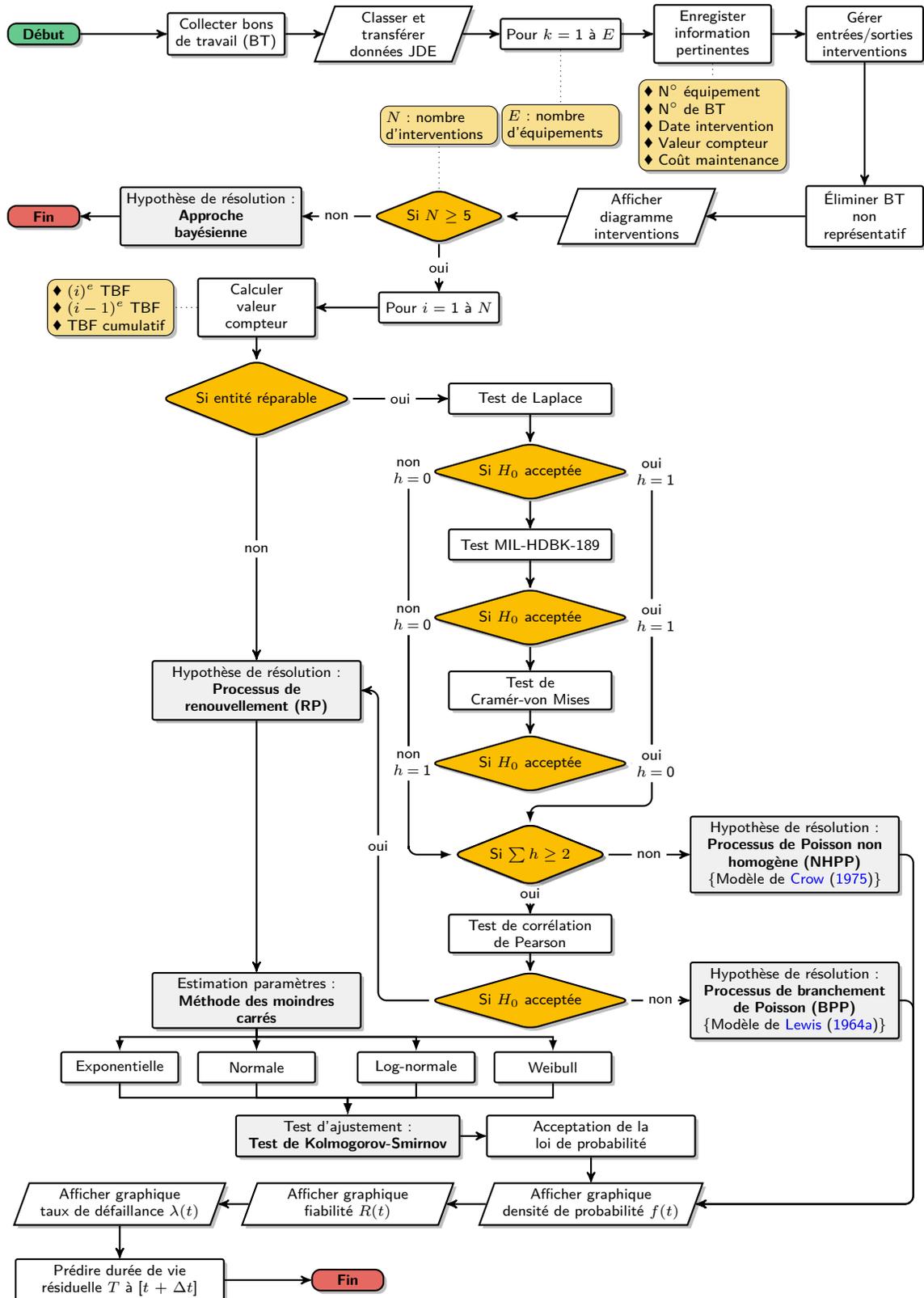


Figure 4.3: Logigramme de l'outil automatisé

Une fois que l'enregistrement et le classement des temps de bon fonctionnement sont effectués pour chacun des équipements miniers ciblés, la phase suivante vérifie la tendance des données de l'échantillon en fonction de l'intervalle de temps. Avant l'application des tests de tendance, il faut vérifier si l'entité est réparable ou non. Ces tests ne sont pas indispensables à appliquer si le processus de l'entité est conforme à un processus de renouvellement (p. ex. entité non réparable). La méthode qui valide l'évolution de l'intensité de défaillance peut être effectuée graphiquement ou par le biais de tests comportant des hypothèses d'adéquation (méthodes numériques), qui sont généralement conçues pour cibler la présence ou l'absence de tendances particulières. Contrairement aux méthodes numériques, la faiblesse des techniques graphiques est la subjectivité dans l'interprétation des résultats. D'ailleurs, un test de tendance unique n'est pas totalement capable de détecter tous les écarts par rapport au point central des données d'interventions et il est suggéré d'utiliser une combinaison de tests statistiques pour déterminer la présence et la nature de toute tendance (Procaccia et al., 2011). Dans le cadre de la conception de l'outil, la validation du processus est fonction d'un groupe de tests qui couvrent la détection de divers types de tendances : croissante, décroissante, monotone et non monotone. Pour des raisons pratiques, les hypothèses d'adéquations de la tendance sont confirmées avec trois méthodes implantées : le test de Laplace, le test MIL-HDBK-189 et le test de Cramér-von Mises. Comme vu à la figure 4.4, la méthode graphique est ajoutée de manière complémentaire, afin de visualiser l'évolution de l'intensité de défaillance, et de ce fait, la tendance générale des données enregistrées. Lors de certaines situations, il est possible que l'hypothèse nulle qui admet un processus de Poisson homogène soit rejetée par le test de Laplace ou celui du MIL-HDBK-189. Tel que montré à la figure 4.5, l'application du troisième test, celui de Cramér-von Mises, permet de trancher sur cette problématique lorsqu'elle a lieu. Si la situation l'exige, cet onglet calcule les paramètres de la loi de puissance (modèle Crow-AMSAA) incorporés au processus de Poisson non homogène.

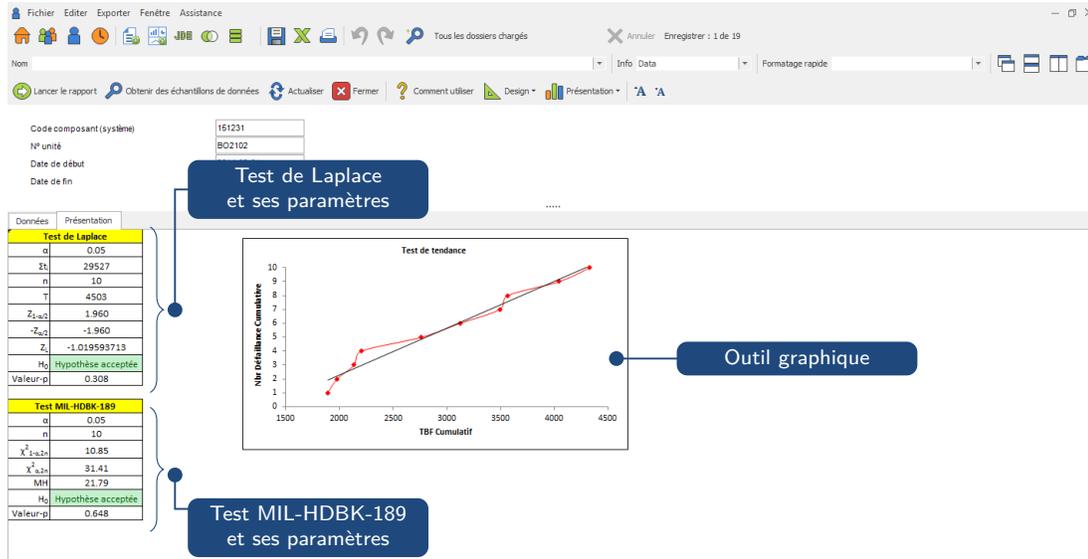


Figure 4.4: Interface des tests de Laplace et du MIL-HDBK-189

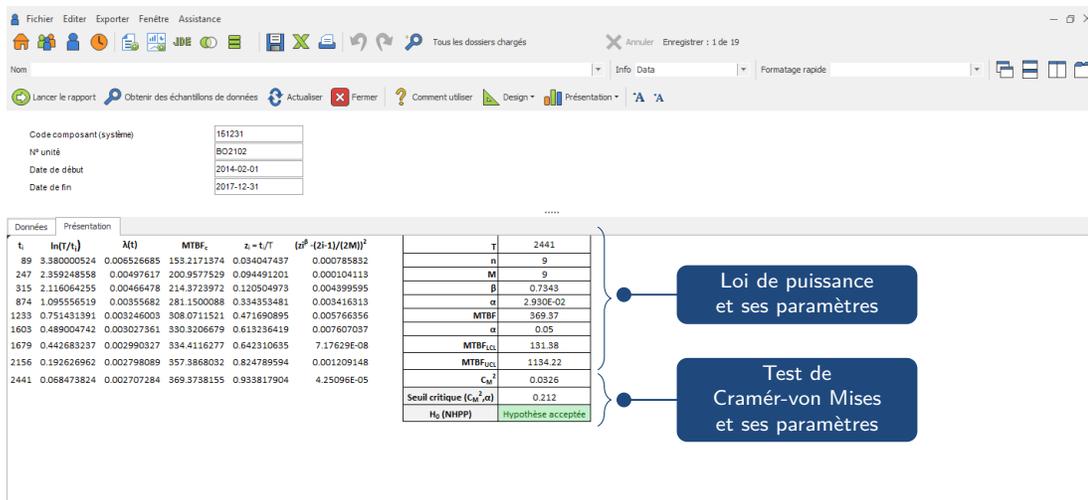


Figure 4.5: Interface du test de Cramér-von Mises

Suite à la vérification de l'intensité de défaillance par le test de tendance, la phase de résolution suivante est la vérification de l'existence de corrélation entre les données de l'échantillon. Dans l'algorithme de résolution, la présence de dépendance est confirmée avec le test de corrélation de Pearson où un écart temporel $k = 1$ est intégré. Lorsqu'il y a présence d'interventions corrélées, alors les équations du processus de branchement de Poisson sont appliquées. Comme pour le test de tendance, l'addition de la méthode graphique est proposée afin de donner une représentation visuelle du lien de dépendance entre les interventions. La figure 4.6 illustre ce propos.

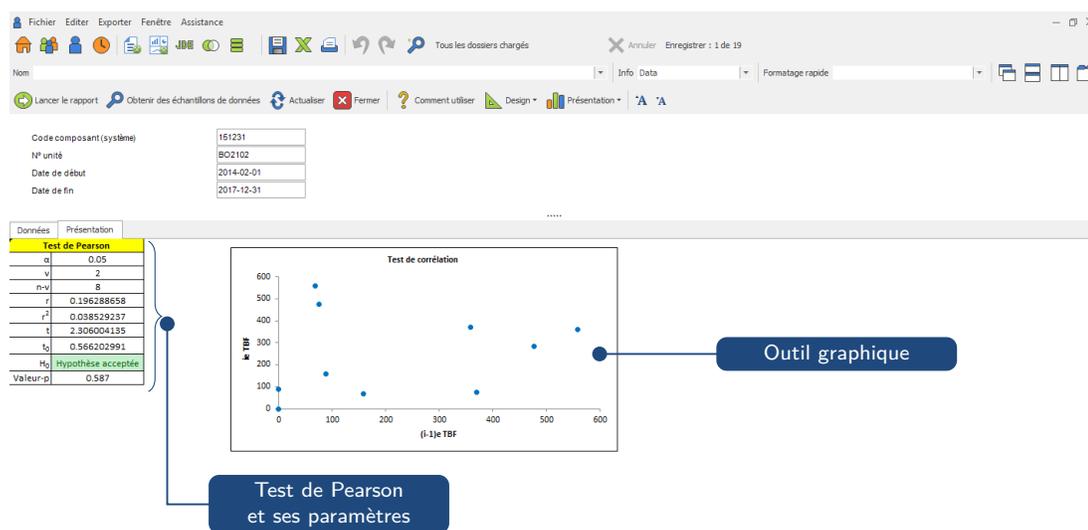


Figure 4.6: Interface du test de corrélation de Pearson

Si l'échantillon sélectionné suit un processus de renouvellement, alors les paramètres statistiques de plusieurs lois de probabilité sont estimés avec la méthode des moindres carrés. Dans le cadre de cette étude, quatre distributions de probabilité sont mises à profit : la loi exponentielle, la loi normale, la loi log-normale et la loi de Weibull. Ce parti pris a été adopté afin d'augmenter le choix possible des distributions pouvant s'ajuster à l'échantillon. En raison d'une meilleure flexibilité, la méthode de Kolmogorov-Smirnov est celle qui est privilégiée pour exécuter le test d'ajustement. Chacune de ces méthodes est vue respectivement aux figures 4.7 et 4.8.

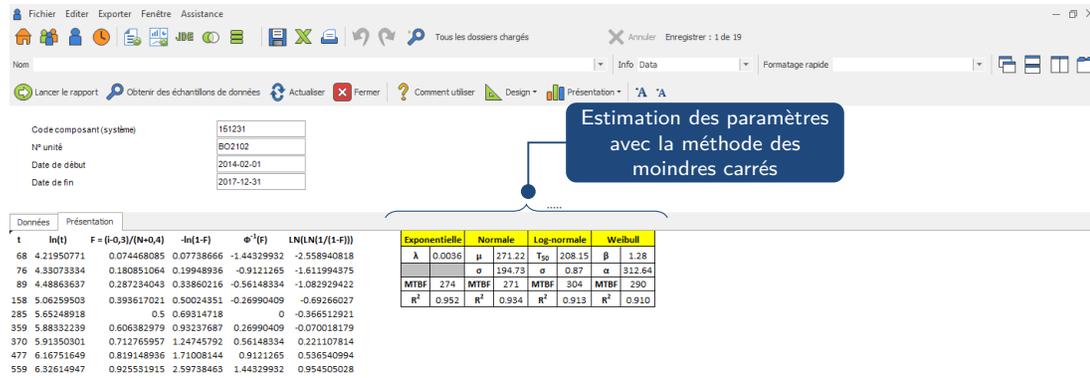


Figure 4.7: Interface de l'estimation des paramètres des lois de probabilité

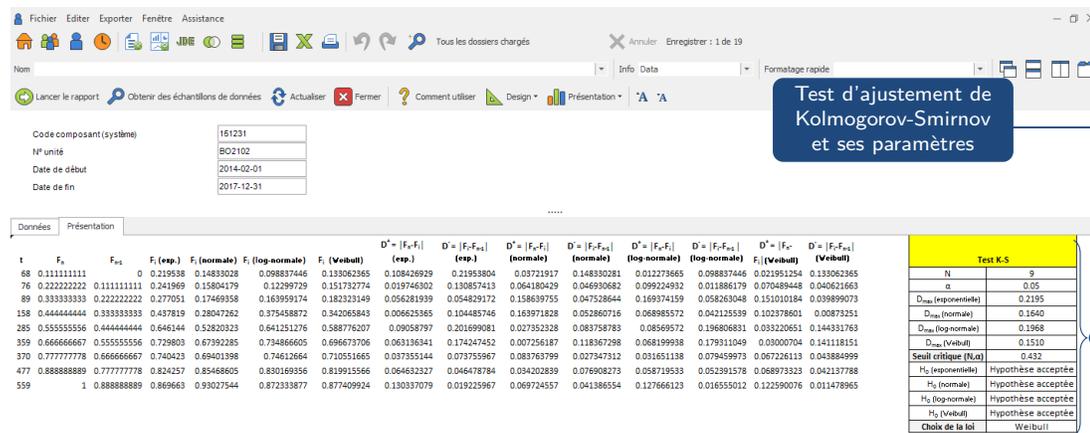


Figure 4.8: Interface du test de Kolmogorov-Smirnov

L'interface d'accueil de l'outil numérique intégrée à ReportsNow® fonctionne de la manière suivante : l'utilisateur doit entrer un numéro de composant (système), suivi du numéro d'équipement, ainsi que de l'intervalle de temps de la requête. L'utilisateur dispose d'un tableau de bord avec un résumé des interventions effectuées par l'attribution des bons de travail et des résultats selon le modèle d'adaptation (voir fig. 4.9). Le principe de l'approche du pronostic basée sur l'expérience est établi sur l'exploitation de l'historique des données d'interventions. À partir des caractéristiques du modèle stochastique qui s'adapte le mieux à ces données, le pronostic se réalise à l'instant présent de la requête en utilisant l'évolution de la fonction de fiabilité ou du temps moyen de fonctionnement (indicateur d'un remplacement probable). Une vue récapitulative des résultats sur l'écran principal permet d'attirer l'attention de l'utilisateur sur les interventions, d'explorer en détail la nature des indicateurs, de prendre des décisions éclairées et d'agir plus rapidement afin d'éviter des défaillances ou des maintenances inutiles. En résumé, l'interface de l'outil automatisé comporte des graphiques en fonction de l'intervalle de temps de l'échantillon tels que la représentation non paramétrique de l'évolution des interventions, la densité de probabilité $f(t)$, la fiabilité $R(t)$ et le taux de défaillance $\lambda(t)$. L'utilisateur a la possibilité de lancer une requête par numéro de composant pour toutes les classes d'actifs miniers mobiles présentes dans le système et de l'exécuter avec plusieurs équipements de la même famille afin de faire des comparaisons au sein d'une même flotte.

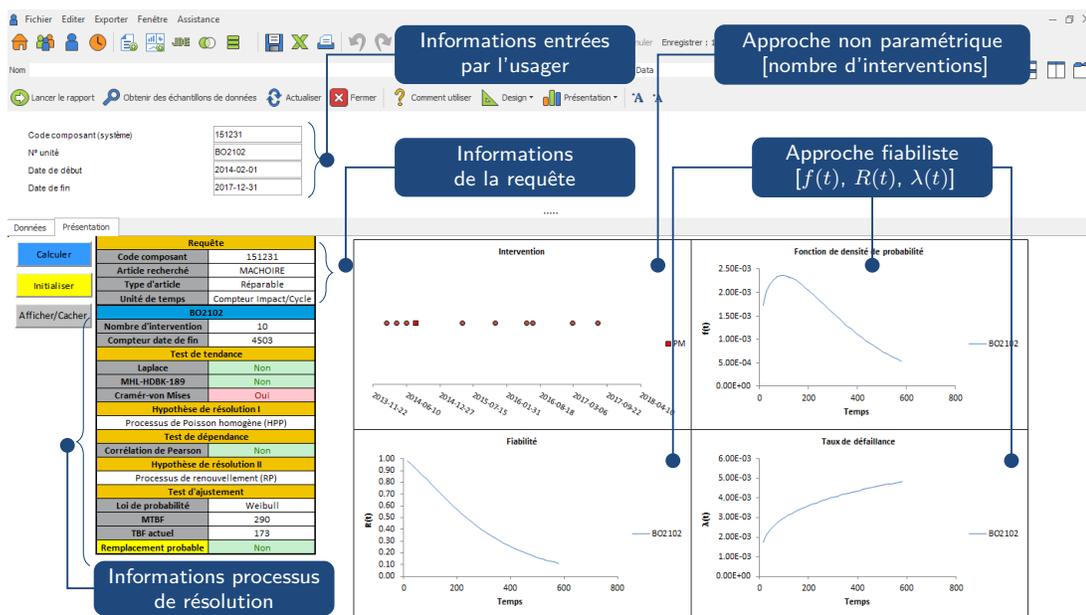


Figure 4.9: Interface d'accueil avec les résultats des analyses

4.3 Hypothèses et limitations de l'outil automatisé

Les hypothèses et les limitations des phases de collecte, de nettoyage et de résolution de données par l'outil automatisé sont formulées de la manière suivante :

- L'information obtenue se réfère à la codification et aux champs associés aux tables de la gestion de la maintenance intégrées dans la base de données du logiciel Oracle® JD Edwards (JDE);
- Puisque le pronostic se base sur l'historique d'interventions, une entité doit avoir opéré pendant un temps conséquent afin que la collecte des données des maintenances soit suffisante à la résolution;
- La référence temporelle des interventions des équipements est associée à la valeur de compteur qui est la plus représentative du mode opératoire (odomètre, heure de percussion, heure électrique ou distance de forage);
- Les valeurs des compteurs mentionnés ci-dessus doivent être accessibles. Si le système n'est pas en mesure de collecter ces informations, une situation qui peut être due à un non-enregistrement par le compteur installé sur l'équipement, il faut considérer un autre intervalle d'observation ou attendre que la problématique soit réglée;
- À la fin de l'exercice du nettoyage de données, il est essentiel que la liste des interventions représente seulement des quantités positives et représentatives (élimination de retour ou de crédit d'article);
- L'approche bayésienne est considérée pour des échantillons comprenant moins de 5 interventions;
- Le processus de recueillement des données est de type I : l'essai se termine après un temps prédéterminé où le nombre d'interventions observées est aléatoire (*voir* sect. 2.8);
- La recherche ne tient pas compte des temps techniques de réparation (*voir* art. 4.2.1).

4.4 Validation du code Visual Basic

Le développement et la robustesse des équations intégrées dans les algorithmes sont validés par des études de cas consultées dans la littérature scientifique. Étant donné que les algorithmes essentiels à la réalisation des processus de résolution de l'outil fiabiliste ne peuvent être approuvés à partir d'une démarche globale provenant d'un seul article scientifique ou ouvrage de référence, ceux-ci doivent être validés individuellement. Le but des prochains paragraphes est de présenter les valeurs obtenues par les références (articles et ouvrages) et de les comparer aux résultats de la recherche actuelle par les calculs des algorithmes implantés dans le code Visual Basic dérivant de l'interface du logiciel Excel®.

4.4.1 Validation 1 : test de Laplace

L'exactitude du test de tendance de Laplace codé dans Visual Basic est confirmée par l'application provenant de Tobias et Trindade (2012). La démarche tient compte de l'analyse de l'évolution de l'intensité de défaillance de trois systèmes réparables. En fonction des critères qui définissent le seuil critique, la tendance des données est validée par le test de Laplace en comparant la valeur moyenne des données observées Z_L avec le point central de l'intervalle (voir art. 3.4.3). Le test de Laplace vérifie la validité de l'hypothèse nulle H_0 qui admet un processus de Poisson homogène. Tels que vus au tableau 4.2, les résultats du test et les décisions obtenues par le code Visual Basic développé dans le cadre de la recherche actuelle concordent parfaitement avec ceux donnés par la référence.

Tableau 4.2: Validation du test de Laplace

[Tobias et Trindade]	Test de Laplace (Z_L)	Seuil critique ($\alpha = 0, 10$)	Décision Rejet de H_0 si $Z_L > Z_{\alpha/2}$ $Z_L < Z_{-\alpha/2}$
&			
[Recherche actuelle]			
Systeme 1	1,66	$-1,645 < Z_L < 1,645$	rejetée
Systeme 2	1,13	$-1,645 < Z_L < 1,645$	non rejetée
Systeme 3	1,10	$-1,645 < Z_L < 1,645$	non rejetée

4.4.2 Validation 2 : test MIL-HDBK-189 et test de Cramér-von Mises

Dans l'article de [Kumar et Klefsjö \(1992\)](#), les auteurs étudient le système hydraulique de chargeuses-navettes, un aspect critique dans certaines études (*voir* art. [2.9.2](#)). Ce papier est pertinent, entre autres, pour valider les deux tests vérifiant l'évolution de l'intensité de défaillance. La première méthode, le test MIL-HDBK-189 (*voir* art. [3.4.4](#)), permet d'accepter ou de rejeter l'hypothèse nulle H_0 qui admet un processus de renouvellement, et la deuxième méthode, le test d'ajustement de Cramér-von Mises (*voir* art. [3.7.3](#)), permet d'accepter ou de rejeter l'hypothèse nulle H_0 qui admet un processus de Poisson non homogène. La validation du test MIL-HDBK-189 est disponible au [tableau 4.3](#) et les réponses obtenues par l'exécution du test démontrent une grande concordance entre les données de l'article et ceux calculés par l'outil. Il est à noter que deux erreurs se sont glissées dans le seuil critique défini par les chercheurs (valeurs suivies par un obèle †). Il est aisément vérifiable dans la table de khi carré ([Rigdon et Basu, 2000](#)), avec la population n et le seuil de signification α , que les seuils critiques exacts sont bien ceux indiqués dans les cases correspondantes aux calculs de Visual Basic. Pour la validation du test de Cramér-von Mises, montrée au [tableau 4.4](#), le paramètre de forme β du modèle Crow-AMSAA est calculé et inclus dans la comparaison puisque le test en tient compte dans son équation. L'obtention de paramètres de formes identiques valide le calcul d'estimation de cette variable. Une légère différence des résultats au niveau du test de C_M^2 est observable, où l'écart maximal est identifié à l'équipement LHD 9. La valeur du seuil critique peut varier légèrement en fonction de la table de référence consultée : selon la grandeur de la population et le seuil de signification, certaines tables nécessitent une interpolation pour déterminer le seuil critique dans un intervalle de valeurs spécifiques. Les seuils critiques employés dans l'algorithme proviennent de l'ouvrage de référence [Rigdon et Basu \(2000\)](#), où une table complète et précise est fournie.

Tableau 4.3: Validation du test MIL-HDBK-189

	[Kumar et Klefsjö]				[Recherche actuelle]			Décision Rejet de H_0 si $MH < \chi^2_{1-\alpha, 2n}$
	Degré de liberté [$2(n-1)$]	Test MIL-HDBK-189 (MH)	Seuil critique ($\alpha = 0,05$)	Test MIL-HDBK-189 (MH)	Seuil critique ($\alpha = 0,05$)	Test MIL-HDBK-189 (MH)	Seuil critique ($\alpha = 0,05$)	
LHD 1	44	28,26	29,79	28,26	29,79	28,26	29,79	rejetée
LHD 3	48	33,50	33,10	33,50	33,10	33,50	33,10	non rejetée
LHD 9	52	32,65	36,44	32,65	36,44	32,65	36,44	rejetée
LHD 11	54	42,54	38,42 [†]	42,54	38,42 [†]	42,54	38,12	non rejetée
LHD 17	50	34,02	36,44 [†]	34,02	36,44 [†]	34,02	34,76	rejetée
LHD 20	44	37,01	29,79	37,01	29,79	37,01	29,79	non rejetée

[†] Erreur observée.

Tableau 4.4: Première validation du test de Cramér-von Mises

	[Kumar et Klefsjö]				[Recherche actuelle]				
	Paramètre de forme ($\hat{\beta}$)	Cramér-von Mises (C_M^2)	Seuil critique ($\alpha = 0,05$)	Paramètre de forme ($\hat{\beta}$)	Cramér-von Mises (C_M^2)	Seuil critique ($\alpha = 0,05$)	Paramètre de forme ($\hat{\beta}$)	Cramér-von Mises (C_M^2)	Décision Rejet de H_0 si $C_M^2 > C_M^2(\alpha, M)$
LHD 1	1,628	0,199	0,217	1,628	0,207	0,218	1,628	0,207	non rejetée
LHD 3	1,493	0,181	0,216	1,493	0,181	0,218	1,493	0,181	non rejetée
LHD 9	1,654	0,184	0,216	1,654	0,079	0,217	1,654	0,079	non rejetée
LHD 11	1,316	0,206	0,218	1,316	0,190	0,217	1,316	0,190	non rejetée
LHD 17	1,528	0,073	0,215	1,528	0,058	0,218	1,528	0,058	non rejetée
LHD 20	1,220	0,095	0,217	1,220	0,079	0,218	1,220	0,079	non rejetée

Afin de s'assurer de la concordance de la méthode codée dans Visual Basic, une deuxième validation du test de Cramér-von Mises est exécutée avec les données de défaillances d'un générateur d'avion provenant de [Rigdon et Basu \(2000\)](#). Comme cela a été vu au tableau 4.5, les résultats obtenus avec les données intégrées dans le code de résolution de la recherche actuelle démontrent une parfaite conformité lorsqu'ils sont confrontés à ceux de la référence.

Tableau 4.5: Deuxième validation du test de Cramér-von Mises

[Rigdon et Basu]				Décision
&	Paramètre	Cramér-von Mises	Seuil critique	Rejet de H_0 si
[Recherche actuelle]	de forme ($\hat{\beta}$)	(C_M^2)	($\alpha = 0,05$)	$C_M^2 > C_M^2(\alpha, M)$
Générateur d'avion	0,414	0,041	0,215	non rejetée

4.4.3 Validation 3 : estimation par la méthode des moindres carrés

Divers ouvrages traitent de l'estimation des paramètres des lois de probabilités avec la méthode des moindres carrés (*voir art. 3.6.2*). La validation proposée tient compte du papier de [Qin et al. \(2014\)](#) pour ce qui est de l'estimation des paramètres des distributions normale, log-normale et de Weibull. Pour compléter le portrait des lois de probabilité mises en application dans la recherche, la résolution des paramètres avec celle de la loi exponentielle se réfère au livre de [Tobias et Trindade \(2012\)](#) pour valider la démarche. En comparant les estimations des paramètres pour les lois de probabilité de type normale, log-normale et Weibull du tableau 4.7, il est visible que les régressions linéaires modélisant les données comportent une très forte similitude entre les résultats calculés par Visual Basic et les résultats de l'article. De plus, les coefficients de détermination sont identiques dans tous les cas. Le constat est similaire pour l'estimation des paramètres avec la loi exponentielle, disponible au tableau 4.6.

Tableau 4.6: Validation des paramètres pour la distribution exponentielle

	Régression linéaire	Estimation paramètre	MTTF
[Tobias et Trindade]	$y = 0,00545x$	$\lambda = 0,00545$	183,19
[Recherche actuelle]	$y = 0,00542x$	$\lambda = 0,00542$	184,22

Tableau 4.7: Validation des paramètres pour les distributions normale, log-normale et Weibull

	Distribution	Régression linéaire	Coefficient de détermination (R^2)	Estimation paramètre	MTTF
[Qin et al.]	normale	$y = 0,0849x - 2,2326$	0,9892	$\mu = 26,30$ $\sigma = 11,78$	26,30
	log-normale	$y = 1,9793x - 6,3006$	0,9669	$\mu = 3,15$ $\sigma = 0,51$	26,58
	Weibull	$y = 2,4895x - 8,4690$	0,9989	$\alpha = 30,02$ $\beta = 2,49$	26,63
[Recherche actuelle]	normale	$y = 0,0858x - 2,2771$	0,9892	$\mu = 26,53$ $\sigma = 11,65$	26,53
	log-normale	$y = 2,0471x - 6,5164$	0,9669	$\mu = 3,18$ $\sigma = 0,49$	27,18
	Weibull	$y = 2,4895x - 8,4690$	0,9989	$\alpha = 30,02$ $\beta = 2,49$	27,63

4.4.4 Validation 4 : test de Kolmogorov-Smirnov

Pour la validation du test de Kolmogorov-Smirnov (voir art. 3.7.2), il est nécessaire d'avoir à la disposition les temps défaillances et les paramètres des lois de probabilité qui caractérisent ces données. Deux sources scientifiques en particulier donnent ces informations : l'article scientifique de Ghosh et Majumdar (2011) et la thèse doctorale de Kumar (1990). La première validation, disponible au tableau 4.8, exécute et confirme le test d'ajustement des données d'une machine pour la distribution exponentielle en utilisant la notion théorique de Kolmogorov-Smirnov. C'est une validation équivalente qui est montrée au tableau 4.9, à l'exception que le test d'ajustement est validé pour la distribution exponentielle et la distribution de Weibull dans un contexte de temps entre défaillances pour des chargeuses navettes. Dans tous les cas, l'exécution du code Visual Basic pour le test K-S à partir des valeurs fournies par les références donne des résultats très similaires.

Tableau 4.8: Première validation du test de Kolmogorov-Smirnov

Machine no.2	Seuil critique ($\alpha = 0,05$) ($D_{critique}$)	K-S exponentielle (D)	Décision Rejet de H_0 si $D > D_{critique}$
[Ghosh et Majumdar]	0,176	0,140	non rejetée
[Recherche actuelle]	0,176	0,140	non rejetée

Tableau 4.9: Deuxième validation du test de Kolmogorov-Smirnov

LHD	Seuil critique	K-S	K-S	Décision
	$(\alpha = 0,05)$ $(D_{critique})$	exponentielle (D)	Weibull (D)	Rejet de H_0 si $D > D_{critique}$
[Kumar]	0,190	0,110	0,080	non rejetée
[Recherche actuelle]	0,190	0,112	0,088	non rejetée

4.4.5 Validation 5 : processus de Poisson non homogène

Deux références sont retenues afin de valider le processus de Poisson non homogène avec l'estimation des paramètres associés au modèle (voir art. 2.8.5). Dans le premier papier scientifique (Podder et al., 2004), il y a identification et classification des différents types de défaillances obtenues lors de l'opération de robot sous-marin autonome, ainsi qu'une analyse de la fiabilité de ce type de véhicule. La partie pertinente de cet article est celle où les paramètres du modèle Crow-AMSAA sont estimés pour les temps entre défaillances ayant une intensité de défaillance non constante. La validation de ces paramètres est effectuée sans employer les paramètres non biaisés α et β tels que proposés par certains auteurs (Procaccia et al. 2011; Rigdon et Basu 2000). Dans le cas des données de défaillances fournies par le deuxième papier scientifique (Krasich, 2012), il est possible de valider les paramètres non biaisés $\hat{\alpha}$ et $\hat{\beta}$ tels qu'inscrits dans les algorithmes de résolution. Les validations des paramètres du processus de Poisson non homogène sont données respectivement au tableau 4.10 pour le premier article et au tableau 4.11 pour le deuxième article. Les résultats des chercheurs coïncident avec les résultats de la recherche actuelle calculés par le code.

Tableau 4.10: Première validation des paramètres du processus de Poisson non homogène

Robot sous-marin	Paramètre d'échelle (α)	Paramètre de forme (β)	MTBF
[Podder et al.]	0,492	0,584	37,80
[Recherche actuelle]	0,492	0,584	37,80

Tableau 4.11: Deuxième validation des paramètres du processus de Poisson non homogène

	Paramètre d'échelle non biaisé ($\hat{\alpha}$)	Paramètre de forme non biaisé ($\hat{\beta}$)	MTBF
[Krasich]	0,5958	0,6092	20,37
[Recherche actuelle]	0,5974	0,6088	20,39

4.4.6 Validation 6 : test de dépendance et processus de branchement de Poisson

La validation des calculs de la dépendance des données (voir art. 3.5.2) et du processus de branchement de Poisson (voir art. 2.8.6) prend en considération le papier de Karyagina et al. (1998). Les chercheurs considèrent les données des rapports de maintenance provenant de machines-outils à commande numérique. Cet article présente un modèle économique pour un cycle de vie d'un système réparable. Le modèle se base sur la nature stochastique des défaillances associées aux coûts du système, en tenant compte du processus de renouvellement, du processus de branchement de Poisson (BPP) et du processus de Poisson non homogène (NHPP). La première section pertinente de l'article est la validation de la corrélation des données de défaillances. Il faut mentionner que le test est réalisé avec des décalages temporels de $k = 1$ et $k = 2$, et le rejet de l'hypothèse nulle H_0 se valide avec un seuil de signification α de 10 %. Comme cela est présenté au tableau 4.12, les coefficients de corrélation calculés par la modélisation du code adapté sont similaires à ceux obtenus par les chercheurs, avec une légère différence pour la corrélation avec un décalage temporel de $k = 2$.

Tableau 4.12: Validation du coefficient de corrélation

Machine	[Karyagina et al.]		[Recherche actuelle]		Décision Rejet de H_0 si $t_0 > S(n - \nu, 1 - \alpha/2)$
	Coefficient de corrélation (r_1)	Coefficient de corrélation (r_2)	Coefficient de corrélation (r_1)	Coefficient de corrélation (r_2)	
M1	0,40	0,39	0,40	0,42	rejetée
M4	0,42	0,08	0,42	0,07	rejetée
M8	-0,03	0,28	-0,03	0,29	rejetée

La section de l'article qui adapte le processus de branchement de Poisson aux données de défaillances des machines permet de comparer les résultats obtenus par les auteurs et ceux calculés par l'algorithme de Visual Basic. Dans l'article, il est à noter qu'il n'est pas possible d'adapter le modèle BPP aux données de défaillances de la machine M4 et, de ce fait, cette dernière ne fait pas partie de la validation. La comparaison des résultats est exposée au tableau 4.13. Cette confrontation des valeurs prouve que le processus intégré dans les codes Visual Basic fonctionne adéquatement : l'estimation des paramètres possède une forte similitude entre les méthodes. Il est à noter que la valeur de 57 attribuée par les auteurs au paramètre $\mathbb{E}(Z)$ dans le contexte de la machine M8 constitue vraisemblablement une erreur de transcription, dont la lecture devrait être de 457, étant donné que cette moyenne influence les valeurs des paramètres a et b .

Tableau 4.13: Validation des paramètres du processus de branchement de Poisson

Machine	Moyenne des temps observés $\mathbb{E}(T)$		Pente λ	Ordonnée à l'origine	Moyenne des temps de la distribution primaire $\mathbb{E}(Z)$		Paramètre		Moyenne des temps de la distribution subsidiaire $\mathbb{E}(Y)$
					a	b			
[Karyagina et al.]	M1	396	0,00232	-0,2017	430	0,0086	0,72	597	
	M8	150	0,00219	-1,4085	57 [†]	2,040	6,86	67	
[Recherche actuelle]	M1	396	0,00232	-0,2017	430	0,0088	0,75	576	
	M8	150	0,00219	-1,4086	457	2,042	6,90	66	

[†] Erreur observée.

4.4.7 Validation 7 : processus avec approche bayésienne

Le processus qui applique les théories de Bayes (*voir* art. 2.8.7) est confirmé par le papier publié par Ghosh et Majumdar (2011). Le but de cet article est de fournir une méthodologie pour la modélisation et l'estimation de la fiabilité des systèmes de machines critiques en utilisant l'historique de leurs temps entre défaillances. Les défaillances des diverses machines sont modélisées avec le processus de Poisson non homogène suivant le modèle log-linéaire, ainsi que le processus de Poisson homogène pour prédire leur fiabilité dans les temps futurs. Outre l'approche statistique classique, l'approche bayésienne est également employée en impliquant la distribution antérieure non informative de Jeffreys afin d'obtenir les densités de probabilité postérieures pour les modèles HPP et NHPP en vue d'estimer la fiabilité des machines. Dans cet article, l'approche qui est pertinente à vérifier est celle avec les théories de Bayes appliquée au processus de Poisson homogène caractérisant les données de défaillances de la machine no.2. Comme vu au tableau 4.14, les valeurs de la fiabilité de la machine no.2 qui ont été modélisées par les algorithmes de Visual Basic coïncident avec celles calculées par les auteurs.

Tableau 4.14: Validation de la fiabilité avec approches classique et bayésienne

Machine no.2 (h)	[Ghosh et Majumdar]		[Recherche actuelle]	
	Fiabilité (Bayes)	Fiabilité (HPP)	Fiabilité (Bayes)	Fiabilité (HPP)
500	0,1440	0,1395	0,1440	0,1395
700	0,0675	0,0635	0,0675	0,0635
900	0,0319	0,0289	0,0319	0,0289
1100	0,0152	0,0131	0,0152	0,0131
1300	0,0074	0,0060	0,0073	0,0060
1500	0,0036	0,0027	0,0036	0,0027

4.5 Stratégie de maintenance prévisionnelle

À partir de l'historique de données et de modèles précis, la stratégie de maintenance prévisionnelle est mise à contribution afin de créer une procédure de surveillance et d'estimer un futur intervalle pour la prochaine maintenance. Cette stratégie est configurée pour entrevoir des maintenances par périodicité et elle doit être mise à jour régulièrement, soit au fur et à mesure que des interventions deviennent disponibles dans la base de données. L'utilisation de l'approche fiabiliste pour le calcul de la moyenne de survie est une forme de pronostic (Muller, 2005) et est aussi définie comme un facteur à la prise de décision. Le rôle du processus de l'aide à la décision est de configurer un plan de maintenance qui permet d'accomplir ou de rétablir un niveau de performance adéquat. Présentée à la figure 4.10, la stratégie de maintenance prévisionnelle par l'aide à la décision se résume par les étapes suivantes :

1. Prédire la durée de vie résiduelle en fonction de la valeur du compteur actuelle $t + \Delta t$ et de la durée de vie moyenne estimée selon le processus stochastique caractérisant les données ;
2. Surveiller et inspecter les données afin de déceler toute anomalie parmi les interventions effectuées. En cas d'interventions non conformes (valeurs extrêmes) ou anormales, il faudra diagnostiquer les données collectées. À la suite de cette observation de la source de données, il est possible que la modélisation fiabiliste ne puisse être considérée et il faudra, le cas échéant, corriger la situation en retirant les mesures aberrantes. Si les interventions semblent justifiées, alors la modélisation fiabiliste est applicable et ses résultats peuvent être analysés (fonction de fiabilité $R(t)$, densité de probabilité $f(t)$, taux de défaillance $\lambda(t)$, MTTF, MTBF) ;
3. Élaboration du plan de maintenance adéquat selon les paramètres liés à la dégradation et à la planification.

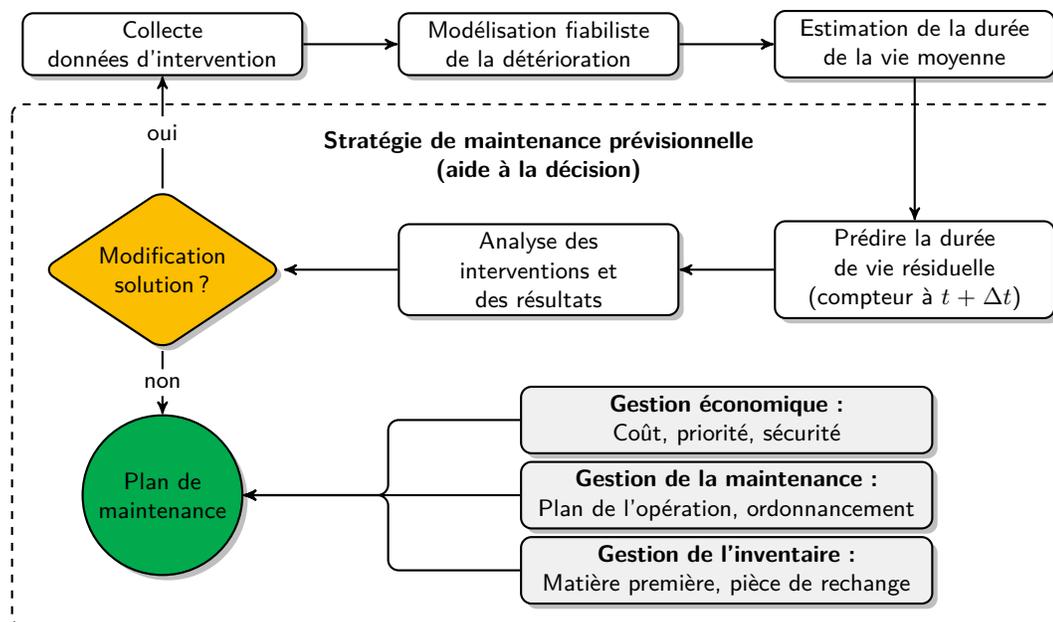


Figure 4.10: Stratégie de maintenance prévisionnelle

À la suite des résultats de l'analyse fiabiliste obtenus par l'outil de supervision, il est possible d'anticiper, en partie, le type de maintenance à mettre en œuvre selon la durée de vie résiduelle à l'instant présent $T (t + \Delta t)$. La durée de vie résiduelle est comparée à celle du retour d'expérience, représentée par la périodicité de maintenance. L'estimation du seuil de remplacement par la périodicité de maintenance se calcule par la moyenne de temps de bon fonctionnement évaluée par le processus stochastique et multipliée par un facteur réducteur k . La périodicité est un temps prévisionnel toujours en évolution en raison de l'analyse répétée de l'évaluation des paramètres significatifs de dégradation (Monchy et Kojchen, 2015). Avant d'émettre un plan de maintenance, il est recommandé d'effectuer un examen manuel des données d'interventions et de vérifier si elles comportent des anomalies : lorsqu'un comportement non idéal ou aberrant est observé, l'identification des causes potentielles et les moyens de rectification doivent être exécutés. Dans les faits, les algorithmes sont en mesure de gérer les entrées/sorties des actifs et de neutraliser les entrées erronées, mais il n'est pas impossible que certains changements d'actifs contiennent des erreurs. Pour faciliter l'observation de ce fait, un outil visuel est utile pour identifier et supprimer les erreurs de données (Jardine et al., 2006). Pour l'outil automatisé, l'exécution des algorithmes entraîne le recensement des événements dans la troncature temporelle comprise entre la date de début et la date de fin pour chaque équipement demandé. Le graphique des interventions est l'un des dispositifs d'analyse qui permet de détecter les anomalies potentielles parmi le recensement de données.

Un aperçu de ce graphique d'interventions est présenté à la figure 4.11 par l'historique des événements de maintenance pour un actif (p. ex. pièce spécifique d'un équipement). Les repères de forme carrée (couleur rouge) représentent les événements de remplacement dans le cadre d'une maintenance préventive (PM) et les repères de forme circulaire (couleur bleue) indiquent les événements de remplacement dans le cadre d'une maintenance corrective (CM).

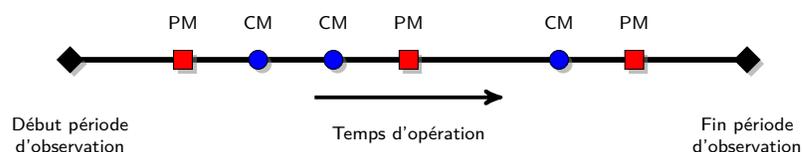


Figure 4.11: Historique pour un actif et ses événements de maintenance

Après la résolution, la prise de décision est fonction de l'analyse des résultats, qui tient compte, entre autres, de la fiabilité, de la durée de vie moyenne, de la durée de vie résiduelle et des inspections prévues prochainement. Les indicateurs de fiabilité présentés dans les graphiques et leurs interprétations fournissent des informations sur des aspects importants tels que :

- la capacité d'une entité à atteindre la durée de vie souhaitée ;
- la présence de défaillances chroniques ou précoces ;
- le comportement réel par rapport aux performances attendues.

Interprétables par le personnel de maintenance, ces résultats permettent de comprendre les événements d'interventions et de prendre des mesures correctives en fonction de ces informations. Dans un contexte minier, certaines décisions doivent être prioritaires et le choix des actions à mener se base sur une logique qui inclut à la fois les paramètres liés à la dégradation et ceux liés à la planification. Outre la durée de vie, la décision de la maintenance prévisionnelle doit tenir compte de la gestion de la maintenance (plan de l'opération, ordonnancement), de la gestion économique (coût, priorité et sécurité) et de la gestion de l'inventaire (matière première, pièce de rechange).

CHAPITRE 5

ÉTUDES DES DÉFAILLANCES ET DE LA FIABILITÉ D'ÉQUIPEMENTS MINIERS MOBILES

Sommaire : En lien avec les algorithmes de résolution développés, ce chapitre propose une introspection des défaillances et de la fiabilité des équipements miniers dits mobiles et de leurs décortications en sous-systèmes. Pour chacune des flottes d'équipements concernées, soit les boulonneuses standards, les boulonneuses à plateforme et les foreuses long trou, les résultats et les discussions tiennent compte des modes de défaillance, de l'analyse avec approche non paramétrique et de l'analyse avec approche fiabiliste.

5.1 Sélection des équipements miniers mobiles

Dans le cadre des activités d'une mine souterraine, le processus d'extraction du minerai se résume en pratique par les étapes d'opérations suivantes (Tatiya, 2005) : le forage, le dynamitage, le déblayage (soutirage du minerai à la suite du sautage), la manutention (transport du minerai vers le concasseur) et le hissage (transport du minerai concassé à la surface). Afin de satisfaire les objectifs de ces activités, les équipements mobiles pris en considération sont les équipements de forage de développement (p. ex. foreuse jumbo), les équipements de forage de production (p. ex. foreuse long trou), les équipements de chargement (p. ex. chargeuse-navette), les équipements de manutention (p. ex. camions 50 tonnes), les équipements de soutènement (p. ex. boulonneuse, camion à béton projeté) et les équipements de service (p. ex. tracteur, élévateur à fourche). Avant de traiter de la sélection des machines, il est important d'aborder le contexte particulier de la mine partenaire, qui possède d'imposantes flottes d'équipements mobiles. Pour les activités minières souterraines, plus de 200 équipements mobiles ont été dénombrés en 2016 à la mine. En outre, un niveau de criticité est associé à chaque famille d'équipements mobiles en fonction des conséquences liées à leurs défaillances sur la production de la mine. Trois degrés de criticité ont été établis : criticité élevée, notée A ; criticité modérée, notée B ; et criticité faible, notée C. Le tableau 5.1 classe les équipements mobiles disponibles à la mine en fonction du type d'équipement, du numéro de parent, du numéro d'équipement et de la criticité.

Tableau 5.1: Classement des équipements miniers mobiles en fonction de leur criticité

Type d'équipement	N° parent	N° équipement	Criticité
Foreuse de monteries	AL1	AL1101, AL1102, AL1103	A
Lance à béton	BL1	BL1103, BL1105, BL1106	A
Boulonneuse à plateforme	BO1	BO1111-BO1115, [BO1116-BO1119]	A
Boulonneuse	BO2	BO2101, B02102, BO2103, [BO2104-BO2105]	A
Chargeuse-navette 9 verges	CN9	CN9101, [CN9102-CN9105]	A
Foreuse long trou	FO2	FO2103, FO2104, FO2106, FO2107	A
Foreuse de câblage	FO3	FO3103	A
Boulonneuse à plateforme	BO1	BO1101 à BO1110	B
Camion 30 tonnes	CA3	CA3106, CA3108-CA3113	B
Camion 50 tonnes	CA5	CA5101-CA5113	B
Camion de type ciseaux	CI1	CI1102, CI1110, CI1111, CI1114, CI1115, CI1117, CI1118	B
Chargeuse-navette 8 verges	CN8	CN8102-CN8123	B
Tracteur mine <i>Caterpillar</i>	TR4	TR4104, TR4107, TR4113	B
Service lourd divers	VS7	VS7101, VS7102, VS7104	B
Camion à béton	BC1	BC1101-BC1106	C
Camion de type ciseaux	CI1	CI1101, CI1104, CI1105, CI1109, CI1112, CI1113, CI1116	C
Chargeuse-navette 2 verges	CN2	CN2101, CN2102	C
Chargeuse-navette 3, 5 verges	CN3	CN3102, CN3103	C
Chargeuse-navette 6, 7 verges	CN6	CN6106-CN6108	C
Élévateur à fourche	EL1	EL1103, EL1106-EL1110	C
Foreuse jumbo	FO1	FO1102-FO1107	C
Forage divers	FO4	FO4103, F04105, FO4106	C
Niveleuse	NI1	NI1102-NI1104	C
Tracteur <i>Kubota</i>	TR2	TR2103, TR2106, TR2109, TR2110, TR2114, TR2116, TR2118, TR2119, TR2121-TR2146	C
Tracteur <i>Kubota L5740</i>	TR3	TR3101-TR3125	C
Tracteur mine <i>Caterpillar</i>	TR4	TR4101-TR4113	C
Tracteur <i>John Deere</i>	TR5	TR5101, TR5102, TR5104	C
Nacelle et grue	VS1	VS1102-VS1105	C
Service léger divers	VS2	VS2102, VS2103, VS2105	C
Camion plateforme	VS3	VS3104, VS3106-VS3109	C
Camion <i>Landcruiser</i>	VS4	VS4102-VS4108	C
Petite chargeuse	VS5	VS5101, VS5103-VS5109	C

En premier lieu, la sélection d'équipements mobiles de la présente étude concerne les équipements de criticité élevée (notation A). Il faut prendre note que les numéros d'équipements inscrits entre crochets représentent des machines neuves dont il était trop prématuré dans le temps d'analyser les défaillances. En deuxième lieu, la chargeuse-navette CN9101 et la foreuse de câblage FO3103 ont été éliminées dans le choix des études de cas, étant donné que, d'une part, qu'une seule unité représentait leur flotte et que, d'autre part, la chargeuse-navette a été largement étudiée au travers des articles scientifiques. L'observation au sein d'une même flotte d'équipements est essentielle pour vérifier si les types d'interventions exécutées sont similaires (validation globale des défaillances) ou s'il y a des anomalies apparentes qui pourraient résulter, entre autres, du facteur humain ou d'une mauvaise conception de certains systèmes. Troisièmement, le choix s'est porté sur des équipements miniers peu traités dans la revue de littérature, mais essentiels à l'opération minière tels que la boulonneuse (modèle standard), la boulonneuse à plateforme (modules de boulonnage et de forage incorporés à une plateforme élévatrice) et la foreuse long trou. La synthèse de ces équipements mobiles critiques est disponible au tableau 5.2.

Tableau 5.2: Équipements miniers mobiles sélectionnés

N° équipement	Type	Date mise en service
BO1111	Boulonneuse à plateforme	2009-01-12
BO1112	Boulonneuse à plateforme	2009-01-28
BO1113	Boulonneuse à plateforme	2010-05-10
BO1114	Boulonneuse à plateforme	2013-05-08
BO1115	Boulonneuse à plateforme	2013-05-08
BO2102	Boulonneuse	2010-04-03
BO2103	Boulonneuse	2012-12-01
FO2103	Foreuse long trou	2000-06-01
FO2104	Foreuse long trou	2002-10-01
FO2106	Foreuse long trou	2008-09-11
FO2107	Foreuse long trou	2011-09-11

Pour une meilleure compréhension de la fonctionnalité de ces équipements miniers, les sections 5.2 et 5.3 expliquent brièvement les opérations associées aux activités de forage et de boulonnage. La section 5.4 énonce les hypothèses et les limitations des études de cas, et la section 5.5 présente les modes de défaillance communs entre les flottes de machineries. Une présentation complète de chacune des flottes d'équipements et de leurs sous-systèmes est abordée dans leur section respective (voir sect. 5.6, sect. 5.7 et sect. 5.8).

5.2 Opération de forage

L'opération de forage consiste à percer une partie de la masse rocheuse lors des activités minières de développement (avancement horizontal des galeries dans un niveau afin de se rendre, notamment, à la zone minéralisée) et de production (forage de chantiers long trous, ainsi que de monteries ascendantes et descendantes). Le trou foré sert à la fois à l'installation d'explosif en vue du dynamitage de la roche (chargement et sautage) et à l'activité de soutènement (boulonnage) lors de l'installation du support de terrain une fois la zone dégagée. La réalisation du chargement d'explosif au travers du massif rocheux et du sautage séquentiel du chantier dépendent de divers facteurs : les dimensions nécessaires aux trous de forage, telles que la longueur et le diamètre, les agents de sautage (mélange nitrate d'ammonium/mazout dit ANFO, explosif en émulsion, etc.), le type de détonateur (non électrique, électrique ou électronique) et les conditions de l'environnement (température et humidité). Durant l'opération de soutènement, les dimensions du trou sont fonction de la catégorie de boulon installée (voir sect. 5.3). Tel que vu à la figure 5.1, le système de forage comprend quatre composants principaux qui agissent de manière complémentaire pour perforer la roche (Tatiya, 2005) :

1. **foreuse** : agit comme moteur principal en convertissant l'énergie hydraulique en énergie mécanique afin d'actionner le système qui comprend des actions de rotation et de percussion ;
2. **tige de forage** : transmet l'énergie du moteur principal au trépan ;
3. **trépan** : applicateur d'énergie qui attaque mécaniquement la roche afin de la perforer ;
4. **fluide de circulation** : nettoie le trou en éliminant les débris rocheux et refroidit le trépan (de l'air et de l'eau sont utilisés à cette fin).

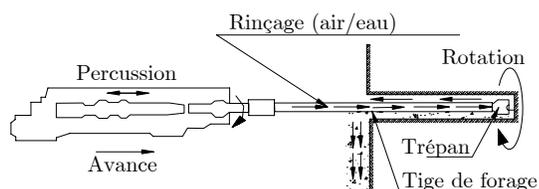


Figure 5.1: Principe de forage (tirée de Atlas Copco, 1982)

5.3 Opération de boulonnage

Parmi les différents moyens de soutènement existants (boulons, câbles d'ancrage, treillis et béton projeté), le boulonnage est une opération qui consiste à forer et installer des boulons dans une galerie afin de supporter la pression exercée par le terrain (Lemy et al., 1998). Cette pression dépend des facteurs géologiques, ainsi que de la méthode et des dimensions de l'excavation. En plus, il faut prendre en considération le poids du massif rocheux, puisque les couches supérieures de la roche exercent une pression sur celles situées en dessous. Dans le toit rocheux d'un tunnel, le changement de contrainte provoqué par la déformation de la roche environnante comprend la zone de fissuration progressive et la zone active, qui exercent une pression directe sur le toit (Boky, 1967). De ce fait et tel qu'indiqué à la figure 5.2, le maintien de la surface du massif rocheux est nécessaire afin de résister à la pression *in situ*, notamment, avec un support exercé par des boulons (boulons à ancrage mécanique, boulons tubulaires, Swellex®, Split Set®, boulons scellés à la résine).

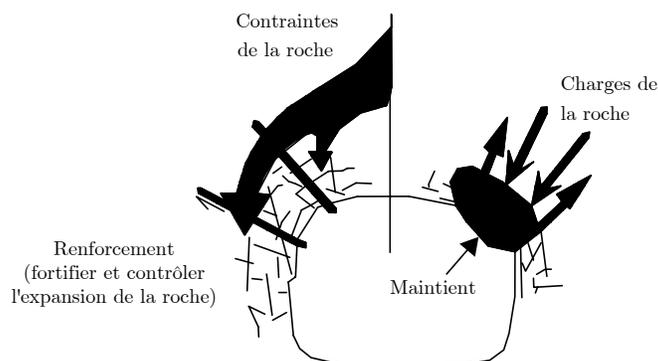


Figure 5.2: Principe de boulonnage (tirée de Tatiya, 2005)

Le concept du boulonnage s'explique de la manière suivante : l'installation du boulon sert de poutre permettant de soutenir les couches superposées de roches, en bloquant le toit immédiat. En d'autres mots, le toit immédiat est retenu au toit principal, qui est plus stable et solide (Tatiya, 2005). De plus, le soutènement de la paroi du tunnel par l'action de boulonnage renforce et supporte le massif rocheux par un arc de pression. Pour de la roche de qualité plus faible et friable, un treillis est ajouté pendant l'installation des boulons (Lemy et al., 1998). Ce dernier permet de retenir les éventuelles ruptures de roche provenant du toit et d'améliorer la stabilité du support de terrain. En conséquence, le support de terrain par le boulonnage est une activité primordiale pour la sécurité des travailleurs et des équipements miniers.

5.4 Hypothèses et limitations des études de cas

Toute étude scientifique comporte ses hypothèses et ses limites, et quelques-unes sont à souligner dans le cadre des prochaines études de cas. Elles sont exprimées comme suit :

- La recherche se base sur les données de défaillance et de réparation de la mine partenaire selon un temps donné : les informations sont liées à des équipements miniers mobiles avec des caractéristiques d'environnement et d'opération spécifiques aux mines souterraines ;
- Les résultats se limitent aux équipements mentionnés (*voir* sect. 5.1) et à l'information qui peut être extraite des données recueillies (relevés de bons de travail) ;
- L'exploitation des données provenant des études de cas est limitée à une période comprise entre deux (2) années d'activités opérationnelles ;
- Les systèmes réparables étudiés sont soumis à des maintenances correctives et préventives ;
- La référence de temps pour chaque intervention d'équipement est associée à la valeur de compteur d'heures de percussion ;
- Seules les interventions liées à l'usage des équipements étudiés ont été incluses ;
- Le schéma fonctionnel des équipements étudiés est défini comme une entité divisée en sous-systèmes connectés en série. Même si la panne de certains des sous-systèmes n'affecte pas toujours systématiquement la mise en marche de l'équipement, il est considéré que tous ces sous-systèmes doivent fonctionner simultanément pour accomplir la fonction requise désignée ;
- Deux méthodologies d'analyse sont ciblées pour évaluer les données de défaillances : l'analyse avec approche non paramétrique et l'analyse avec approche fiabiliste ;
- À des fins de confidentialité, certains fabricants d'équipements ne sont pas dévoilés.

5.5 Classement et modes de défaillance généraux

Une connaissance de l'équipement est nécessaire afin d'effectuer un classement adéquat des bons de travail. D'abord, il est essentiel de procéder à un prétraitement des données de maintenance puisque certaines descriptions de bons de travail, que ce soit dans le titre ou dans l'annexe (section réservée à la description complémentaire de la maintenance réalisée), n'indiquent en rien la cause du bris (p. ex. trouble de démarrage) ou ne sont pas en lien avec une défaillance de l'équipement (p. ex. cales de roue manquantes). Dans la plupart des situations, un bon travail est attribué à un seul sous-système. Or, lors de l'arrêt de l'équipement, plusieurs sous-systèmes peuvent être en maintenance. Certaines actions de maintenance proviennent de réparations jugées non prioritaires et effectuées lors des maintenances préventives. Alors, ces défaillances peuvent être incluses ou non dans l'étude du sous-système (données censurées) : il faut parfois les dissocier et les classer correctement.

En relation avec le classement des défaillances, il est pertinent de mettre l'accent sur la définition des modes de défaillance généraux et communs entre les équipements étudiés. Il est à noter que les modes de défaillance spécifiques aux sous-systèmes des équipements sont abordés dans leur section respective. D'abord, les défauts du système hydraulique intégrant le circuit global (percussion, alimentateur, flèche) proviennent du dysfonctionnement des composants hydrauliques (pompes à déplacement variable et de remplissage, limiteur hydraulique, vanne hydraulique, soupape hydraulique, etc.), de la contamination d'huile et de bris de boyaux, qui engendrent des fuites. Pour continuer, les bris physiques au niveau de la structure englobent le châssis, la cabine, les stabilisateurs et l'enrouleur de boyaux. Il est à noter que ces bris peuvent être liés aux compétences de l'opérateur et à l'environnement hostile de la mine plutôt qu'à l'usure du système. Les défaillances pour le système eau/air sont provoquées notamment par la défectuosité des valves d'eau et des valves d'air, du compresseur, de la pompe à eau et de bris de boyaux. Après, les principales maintenances relatives au moteur diesel sont dues aux bris de la courroie d'alternateur et du tuyau d'échappement, et à l'encrassement du filtre à air. Dans la situation des pneus, les défaillances sont essentiellement dues à des crevaisons causées par des usures généralisées ou l'environnement (cisaillement par la roche et piqûre par les broches présentes sur le terrain). Les pannes du système d'air conditionné proviennent des défectuosités du condensateur et du compresseur, ainsi que du non-fonctionnement du ventilateur.

Ensuite, les deux types de boulonneuses étudiés permettent l'installation, notamment, du boulon Swellex® développé par Atlas Copco. Ce boulon est un tube en acier doux replié sur lui-même, dont l'expansion nécessite une injection d'eau à haute pression. La force hydraulique radiale exercée contre le tube au travers du trou de forage permet de fixer le boulon dans la paroi rocheuse (Lemy et al., 1998). La panne récurrente de ce système découle de la défektivité de la pompe à eau.

5.6 Étude de la boulonneuse (BO2102-BO2103)

Les boulonneuses de cette étude ont pour numérotation BO2102 et BO2103. Cet équipement minier est un chariot mécanisé de boulonnage électro-hydraulique et est destiné au renforcement des roches dans les tunnels souterrains. La tête de boulonnage comporte, entre autres, un marteau perforateur, ainsi qu'un carrousel qui gère et achemine les boulons de renforcement. La configuration de cette machine permet le forage et l'installation du support de terrain tel que le boulon à ancrage mécanique, le boulon à friction et le boulon scellé. En option à ce modèle, un bras hydraulique est installé pour manipuler et placer le treillis de soutènement. Ce choix est à privilégier dans la situation où les travailleurs ne doivent pas être directement exposés sous le massif rocheux, considéré instable et non sécuritaire (Darling, 2011). La figure 5.3 montre la vue d'ensemble de ce modèle de boulonneuse.

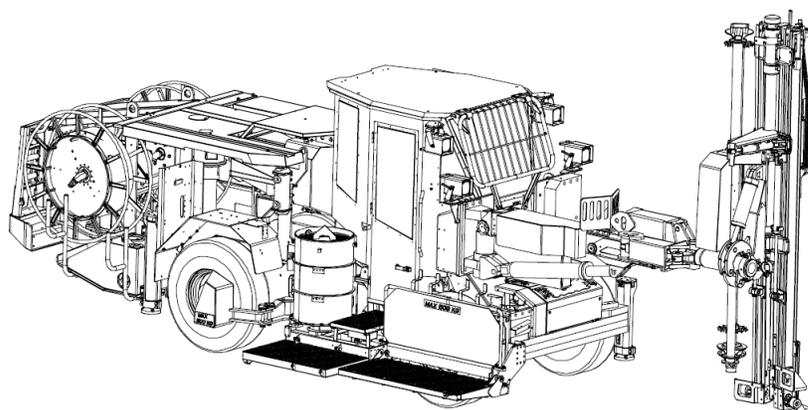


Figure 5.3: Vue d'ensemble de la boulonneuse (fournie par AEM)

Dans le cadre de cette thèse, ce modèle de boulonneuse a été divisé en deux sections distinctes. Une de ces sections est la partie constituante du chariot, composée de la cabine et du module arrière. Le module arrière possède les composants indispensables au bon fonctionnement de l'équipement tels que le moteur diesel, la transmission et la lubrification. Les figures 5.4 et 5.5 présentent respectivement la vue d'ensemble et la vue en plan du module arrière de la boulonneuse.

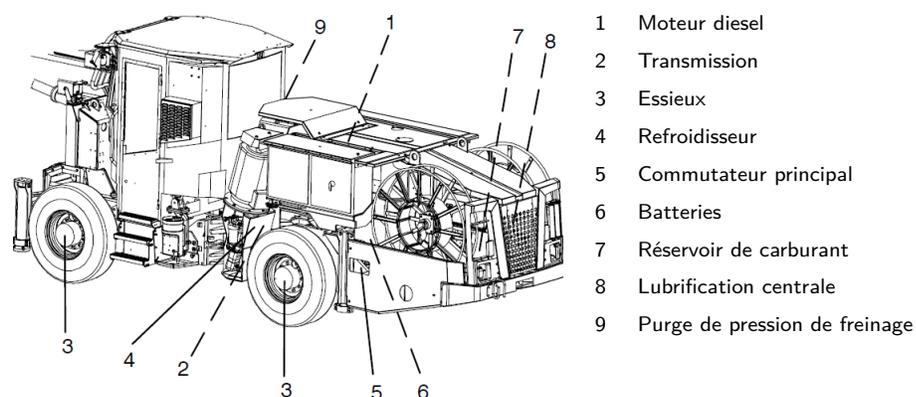


Figure 5.4: Vue d'ensemble du module arrière de la boulonneuse (fournie par AEM)

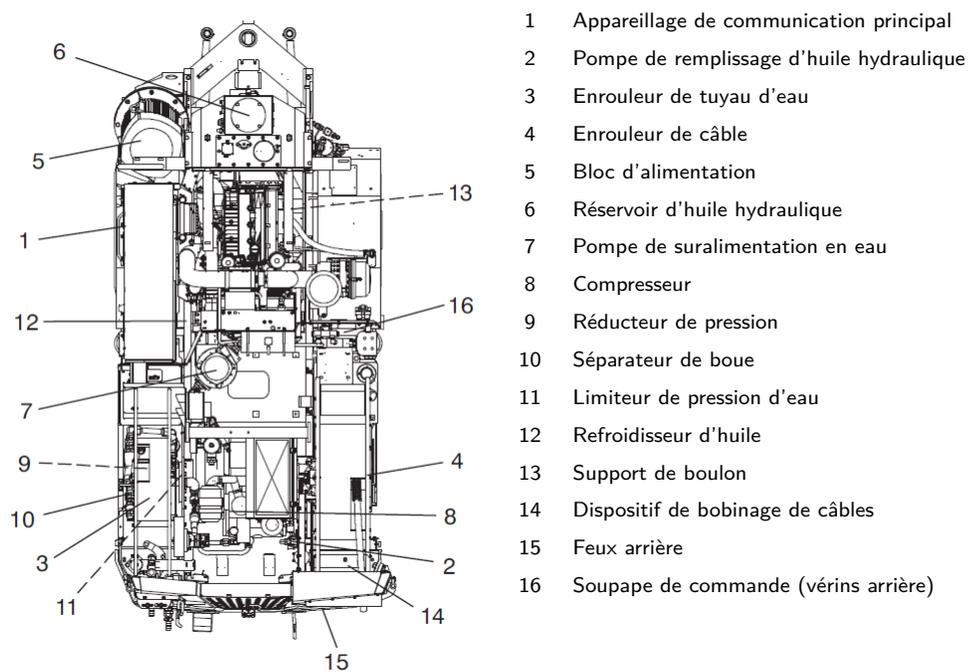


Figure 5.5: Vue en plan du module arrière de la boulonneuse (fournie par AEM)

Le second module, celui de forage et de boulonnage, se compose des sous-systèmes suivants : la flèche, le bras manipulateur de treillis, les foreuses et la tête de boulonnage. Cette dernière comprend, notamment, le changeur de boulons (dit carrousel), l'avance de forage et l'avance de boulonnage. La figure 5.6 montre le module de forage et de boulonnage. Les foreuses se distinguent en deux groupes, le marteau perforateur (dit foreuse) pour l'opération de forage et la tête de rotation pour l'opération de boulonnage (dit boulonneuse).

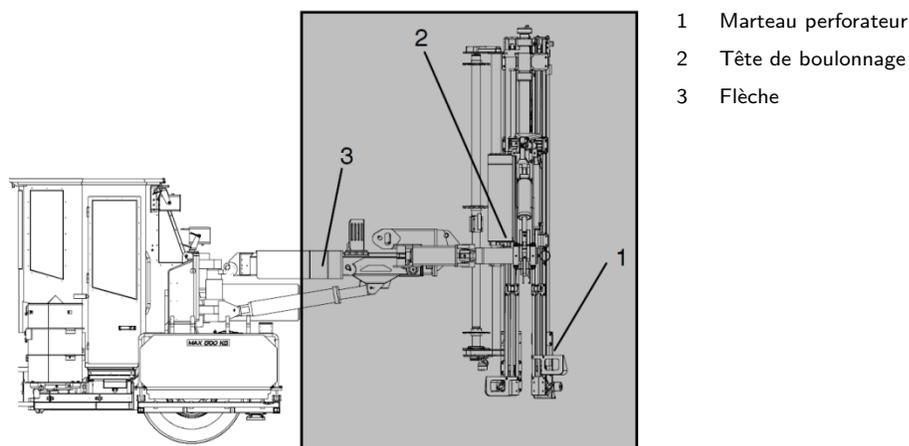


Figure 5.6: Module de forage et de boulonnage (fournie par AEM)

En outre, le bras hydraulique présenté à la figure 5.7 s'opère avec une grande flexibilité, tout en disposant d'angles d'inclinaison et d'une extension ajustable de l'avance du bras.

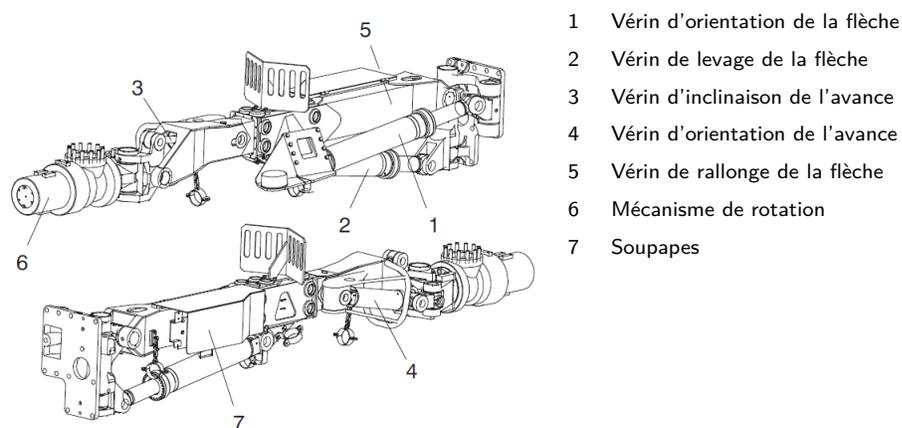


Figure 5.7: Flèche (fournie par AEM)

Le sous-système de la tête de boulonnage comporte les composants décrits à la figure 5.8. Cette section permet d'exécuter le forage de trous et l'installation de boulons de soutènement pour le support de terrain par l'emploi du chargeur de boulons, des mors de serrage de boulons, du marteau perforateur et du mécanisme de boulonnage.

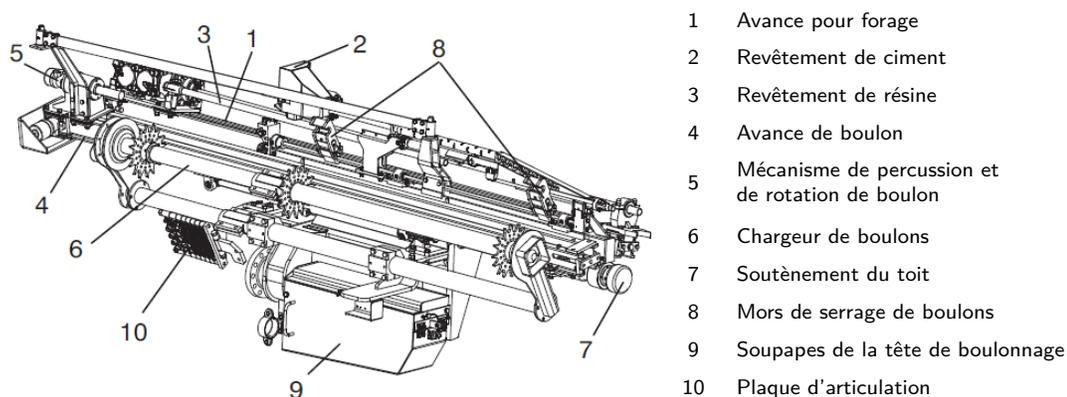


Figure 5.8: Tête de boulonnage (fournie par AEM)

Le sous-système de l'avance se compose de deux parties différentes, soit l'avance de boulon et l'avance de foration qui sont présentées respectivement aux figures 5.9 et 5.10. Les avances de foration et de boulon sont comprises dans la tête de boulonnage, mais elles sont étudiées à part puisqu'elles engendrent un plus grand nombre de pannes et qu'une étude indépendante permet de cibler adéquatement les problèmes récurrents. Dans les deux sous-systèmes, le mécanisme d'alimentation de l'avance est commandé par un moteur hydraulique qui fait glisser la boulonneuse (mécanisme de rotation de boulon) ou la foreuse (marteau perforateur) sur les plaques de guidage à l'aide d'un système de chaîne. L'avance de foration sert à maintenir en contact étroit le corps formé par l'emmanchement du marteau perforateur, la tige de forage et le trépan avec la roche (*voir art. 5.2*)

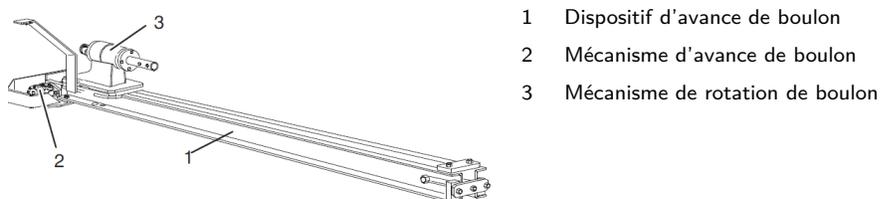


Figure 5.9: Avance de boulon (fournie par AEM)

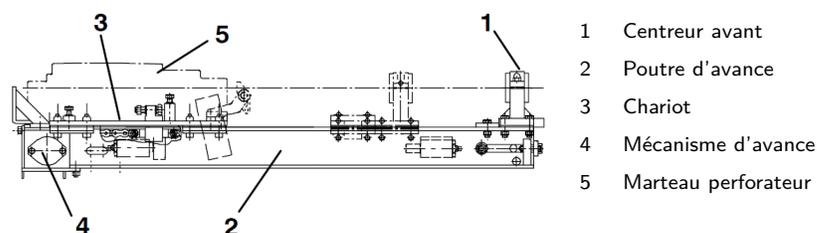


Figure 5.10: Avance de foration (fournie par AEM)

L'avance de foration est équipée d'un marteau perforateur hydraulique (foreuse) dont les principaux composants sont illustrés à la figure 5.11. Le marteau perforateur exerce les fonctions de percussion et de rotation. La puissance de percussion transmise par la tige de forage est la combinaison de la force et de la fréquence d'impact. Dans l'opération de forage, la rotation a pour fonction de faire pivoter le trépan dans une nouvelle position après chaque impact. Le marteau perforateur est constitué de deux catégories d'accumulateur de pression. La fonction principale de l'accumulateur à haute pression est d'emmagasiner le fluide hydraulique sous pression afin de l'utiliser lors de la prochaine course du piston. L'accumulateur à basse pression permet d'amortir les vibrations hydrauliques dans la conduite de retour et il empêche également la cavitation dans les lignes et les canaux de retour.

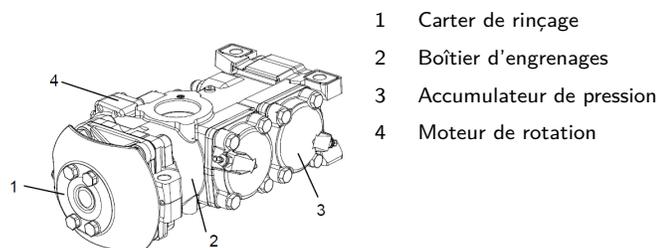


Figure 5.11: Marteau perforateur ou foreuse (fournie par AEM)

Indépendamment du type de boulon, la perforation par le marteau perforateur s'effectue de manière identique. Dans un premier temps, l'opérateur met en place la tête de boulonnage à l'endroit où doit s'effectuer le boulonnage. Dans un deuxième temps, il commence la perforation à faible puissance, et met l'avance ainsi que la rotation du marteau perforateur en marche. Après le début de la foration du trou, l'opérateur entreprend la perforation à pleine puissance. Pendant la perforation, il règle la force de l'avance au moyen d'un potentiomètre, qui est fonction de la pression de percussion, du type de roche et de la profondeur du trou. Lorsque le trou est foré, l'opérateur déplace les mors de serrage et les ferme vers le boulon afin de le positionner. Finalement, l'opérateur termine par l'activité de boulonnage qui dépend du type de boulon employé.

Le tableau 5.3 présente les informations techniques de la machine et la division en sous-systèmes pour ce modèle de boulonneuse (BO2102-BO2103). À titre informatif, lorsqu'il est fait mention de « boulonneuse (composant) » ou de « foreuse (composant) », ces termes visent le sous-système spécifique étudié et non l'équipement global du même nom.

Tableau 5.3: Informations techniques et classement des sous-systèmes de la boulonneuse

Information	Section	Sous-système
Dimensions : 11,00 m (long.) × 2,25 m (larg.) × 2,91 m (haut.) Masse : 18 000 kg	Module de forage et de boulonnage	Flèche Manipulateur de treillis Tête de boulonnage Avance de boulon Avance de foration Foreuse (composant) Boulonneuse (composant)
		Chariot (cabine et module arrière)
Moteur diesel : 110 kW (149 hp)		
Moteur électrique : 45 kW (60 hp)		

5.6.1 Modes de défaillance spécifiques

En analysant les maintenances des sous-systèmes pour ce type d'équipement, les défaillances de la flèche surviennent principalement en raison des défauts des vérins de rallonge de la flèche et de l'inclinaison de l'avance. Dans le cas du manipulateur de treillis, il subit des pannes récurrentes dues à la défektivité de l'actuateur rotatif et à l'usure des plaques du manipulateur. Les défaillances les plus dominantes pour les deux systèmes d'avance sont l'ajustement et le bris du système de chaîne pour l'alimentation, la défektivité du moteur d'alimentation et l'usure des plaques de guidage. En excluant les systèmes d'avance, les problématiques de la tête de boulonnage touchent essentiellement les mors de serrage de boulons, le centralisateur et le transfert. Les bris du marteau perforateur sont concentrés sur la défektivité des accumulateurs de pression, ainsi que l'usure de l'emmanchement et des joints d'étanchéité. Le résumé des composants de la boulonneuse les plus susceptibles d'engendrer une panne par leurs modes de défaillance est disponible au tableau 5.4.

Tableau 5.4: Modes de défaillance récurrents des composants de la boulonneuse

Sous-système	Composant	Mode de défaillance
Flèche	<ul style="list-style-type: none"> ◆ vérin d'inclinaison de l'avance ◆ vérin d'orientation de l'avance ◆ vérin de rallonge de la flèche ◆ vérin de pivot ◆ arbre de l'orientation 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ fuites, déformation ◆ desserrage (palier lisse) ◆ fuites, déformation ◆ fuites, déformation ◆ desserrage
Manipulateur de treillis	<ul style="list-style-type: none"> ◆ actuateur rotatif ◆ vérin de rallonge du manipulateur ◆ plaques du manipulateur ◆ arbre du manipulateur 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ desserrage, rupture (boulon) /fuites, blocage, bris ◆ fuites ◆ usure ◆ usure
Avance de boulon	<ul style="list-style-type: none"> ◆ chaînes pour l'avance ◆ moteur d'alimentation ◆ plaques de guidage 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ rupture ◆ défaillance en fonctionnement (général) /usure (pignon) ◆ usure
Avance de foration	<ul style="list-style-type: none"> ◆ chaînes pour l'avance ◆ moteur d'alimentation ◆ plaques de guidage ◆ table de la foreuse 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ rupture ◆ défaillance en fonctionnement (général) /usure (pignon) ◆ usure ◆ desserrage, rupture (boulon)
Tête de boulonnage	<ul style="list-style-type: none"> ◆ mors de serrage ◆ centralisateur ◆ vérin de transfert 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ fuites (vérins des mâchoires) /usure (mâchoires) /desserrage, rupture, déformation (support de mâchoires) ◆ usure ◆ fuites
Foreuse (composant)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ marteau perforateur ◆ accumulateurs de pression ◆ emmanchement ◆ joint d'étanchéité ◆ joint torique ◆ diaphragme 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ défaillance en fonctionnement (général) /desserrage, rupture (boulon) ◆ défaillance en fonctionnement (général) /gaz insuffisant /desserrage, rupture (boulon) ◆ usure ◆ usure ◆ usure ◆ usure
Électrique/électronique	<ul style="list-style-type: none"> ◆ câble d'alimentation 600 V ◆ panneau de commande ◆ fils électriques ◆ lumières ◆ joystick 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ usure, bris ◆ trouble électronique, bris ◆ rupture ◆ trouble électrique, bris ◆ trouble électrique, bris

5.6.2 Analyse avec approche non paramétrique : résultats et discussion

La première méthodologie d'analyse des défaillances, dite non paramétrique, fournit une mesure statique du comportement de défaillance des équipements critiques par l'utilisation de deux types de diagramme. Tout d'abord, l'analyse par le diagramme des fréquences d'interventions est une méthode qui identifie la proportion d'événements la plus significative sur le nombre total d'événements et qui peut s'avérer efficace lors d'une première introspection des défaillances. En complément à la première méthode, le diagramme de Pareto est l'un des outils disponibles pour l'observation des maintenances et se base sur le principe général suivant : 80 % des effets proviennent de 20 % des causes (Kiremire, 2011). Même si cette répartition reste théorique, la distribution s'en rapproche dans de nombreuses situations. Les deux types de diagramme offrent des repères intéressants afin de cibler des systèmes susceptibles d'être critiques et nécessitant une attention particulière.

Le premier diagramme présente la fréquence de bons de travail (BT) dans l'éventail de temps ciblé, selon le type d'intervention de l'équipement. Le terme « intervention » a été employé pour la définition de l'axe des abscisses du graphique plutôt que le terme « défaillance » dû au fait que les maintenances préventives ne correspondent pas à des défaillances, mais à un arrêt de l'équipement où des modifications et des améliorations sont apportées afin de limiter le nombre de maintenances correctives. Le diagramme de la fréquence d'interventions se divise en deux axes distincts. Indiqué par les bandes situées à gauche (couleur bleue), l'axe des ordonnées de gauche présente la fréquence d'interventions, soit le nombre décroissant de bons de travail qui est reporté à chaque type d'intervention. L'axe des ordonnées de droite met en évidence, à l'aide des bandes situées à droite (couleur jaune), la répartition de chacun des types d'intervention en fonction de l'ensemble des interventions (en pourcentage). Le deuxième graphique mis en valeur est le diagramme de Pareto. Cette représentation aide à cibler les sous-systèmes qui génèrent le plus de pannes et à vérifier lesquelles constituent plus de 80 % de l'ensemble de ces pannes. Ce graphique est interprété comme suit : l'axe des ordonnées de gauche montre la fréquence de défaillances avec le nombre décroissant de bons de travail et les sous-systèmes les plus critiques sont ciblés lorsque la courbe tracée des sous-systèmes distribués (répartition cumulative) atteint la valeur de 80 % de la répartition totale de l'axe des ordonnées de droite (délimitée par la ligne pointillée). À partir de ces diagrammes, des constats immédiats peuvent être émis concernant les maintenances et ils offrent aussi des réponses partielles à la recherche des causes de défaillances.

Les figures 5.12 et 5.14 présentent respectivement le diagramme de la fréquence d'interventions pour la boulonneuse BO2102 et la boulonneuse BO2103. Le nombre de maintenances préventives correspond à la proportion la plus élevée pour le nombre de bons de travail créé (respectivement de 24 % pour la boulonneuse BO2102 et 18 % pour la boulonneuse BO2103). Ensuite, le pourcentage de répartition du module de forage et de boulonnage pour la boulonneuse BO2102 est représenté de la façon suivante : la tête de boulonnage (10 %), la foreuse (9 %), le manipulateur de treillis (9 %), l'avance de foration (6 %) et l'avance de boulon (3 %). Quant à la boulonneuse BO2103, les pourcentages se répartissent comme suit : la tête de boulonnage (11 %), la foreuse (6 %), l'avance de foration (6 %), l'avance de boulon (6 %) et le manipulateur de treillis (5 %). Dans les deux machines, la flèche a la plus faible représentation de l'ensemble des interventions du module de forage et de boulonnage (moins de 5 %). En examinant le chariot, les trois sous-systèmes les plus défaillants pour la boulonneuse BO2102 sont le système électrique/électronique (10 %), le système hydraulique (9 %) et la structure (7 %). Les principaux sous-systèmes défaillants pour la boulonneuse BO2103 sont le système hydraulique (11 %), le système électrique/électronique (9 %) et le système Swellex® (6 %). Au regard des diagrammes de Pareto disponibles aux figures 5.13 et 5.15, il est observable que le nombre de sous-systèmes pour la boulonneuse BO2102 qui génère plus de 80 % de la répartition cumulative totale est moins élevé que la boulonneuse homologue (7 contre 9 sous-systèmes). De plus, le nombre de maintenances est généralement supérieur pour les sous-systèmes de la boulonneuse BO2103. Le pourcentage de répartition indique que plus de 80 % des défaillances cumulatives sont provoquées par la tête de boulonnage (10 % ; 11 %), la foreuse (9 % ; 6 %), le manipulateur de treillis (9 % ; 5 %), le système électrique/électronique (10 % ; 9 %), le système hydraulique (9 % ; 11 %), l'avance de foration (6 % ; 6 %) et la structure (7 % ; 5 %). Pour la boulonneuse BO2103, il faut ajouter l'avance de boulon (6 %) et le système Swellex® (6 %) pour accumuler plus de 80 % de la répartition totale des défaillances.

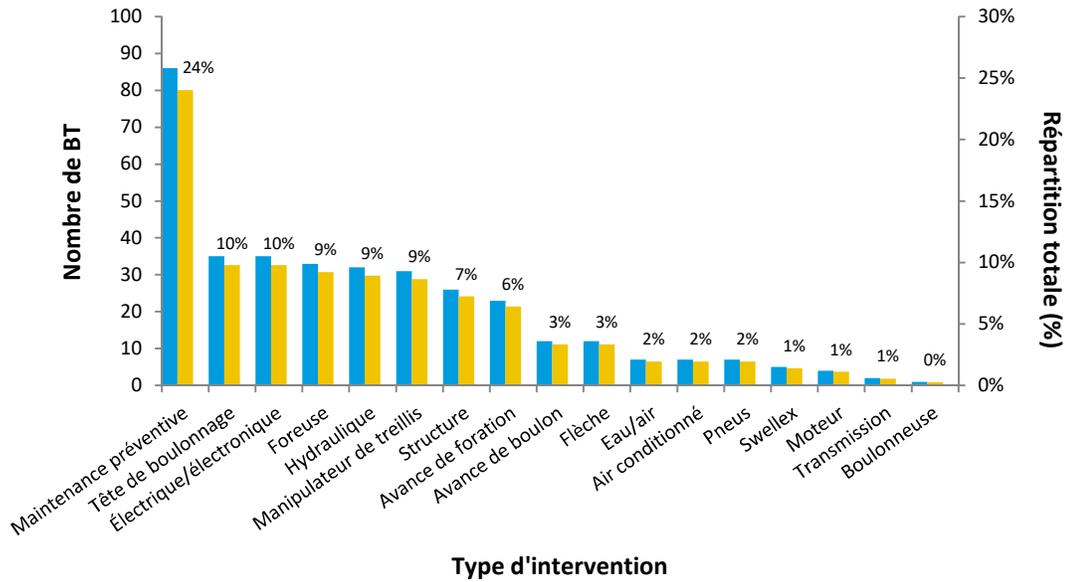


Figure 5.12: Diagramme de la fréquence d'interventions [BO2102]

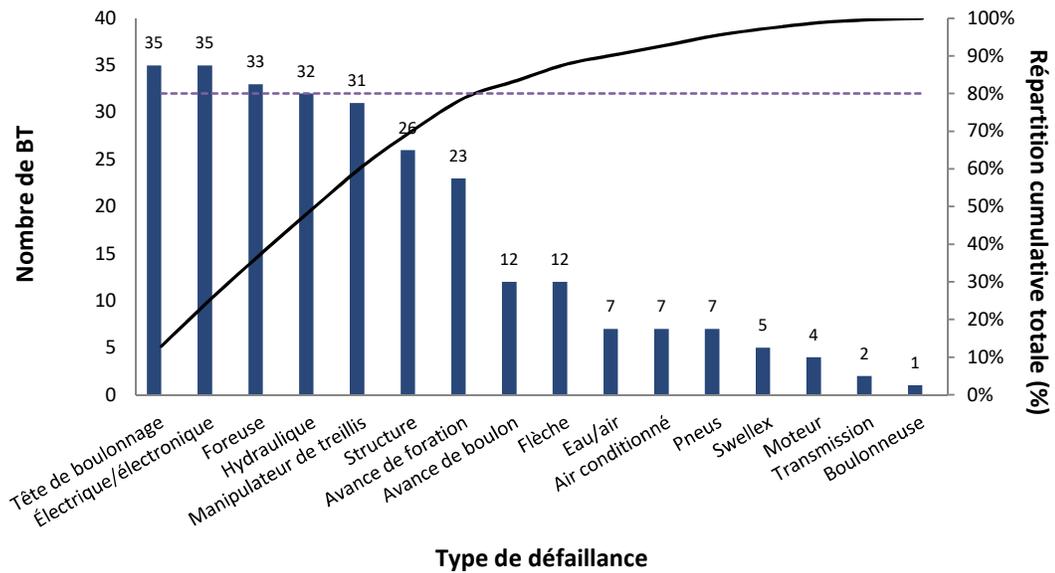


Figure 5.13: Diagramme de Pareto [BO2102]

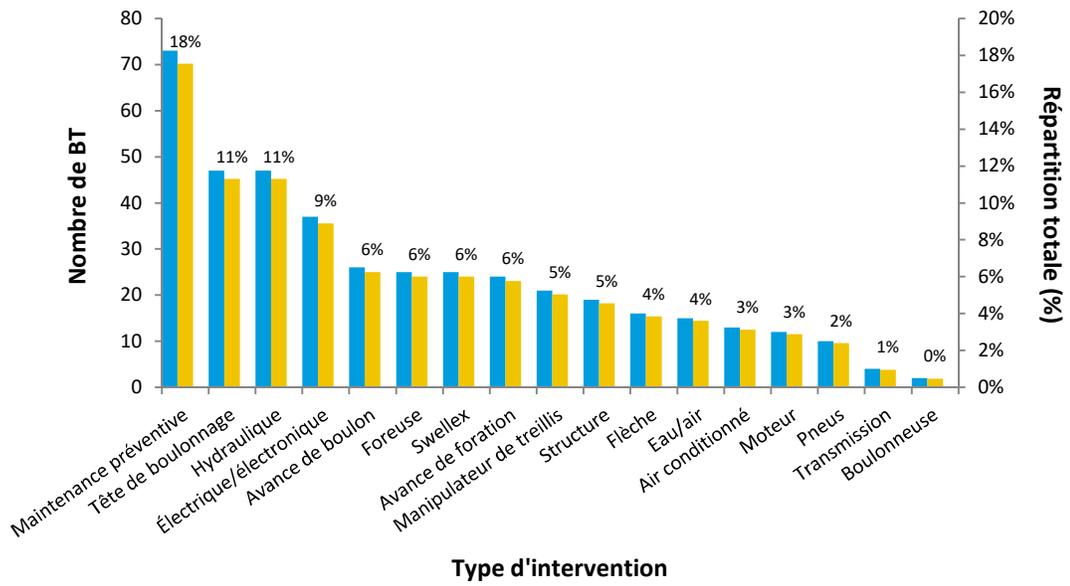


Figure 5.14: Diagramme de la fréquence d'interventions [BO2103]

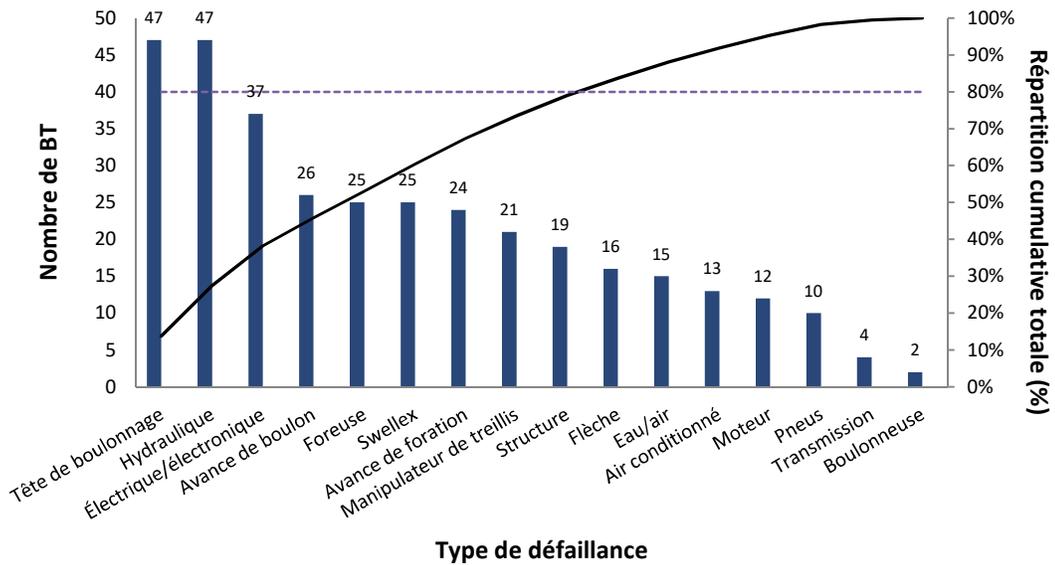


Figure 5.15: Diagramme de Pareto [BO2103]

5.6.3 Analyse avec approche fiabiliste : résultats et discussion

La deuxième approche consiste en une analyse fiabiliste par l'utilisation des modèles stochastiques explicites et concrétisés par l'emploi d'une fonction particulière (voir sect. 3.3). Les tableaux 5.5 et 5.6 montrent les valeurs calculées pour les tests de tendance des boulonneuses BO2102 et BO2103. Si la probabilité est inférieure au seuil de signification (5 %), l'hypothèse nulle est rejetée, puisqu'elle est considérée trop invraisemblable. Dans le cas d'un rejet de l'hypothèse nulle du test de Laplace ou du test MIL-HDBK-189, alors le test de Cramér-von Mises est calculé pour confirmer l'hypothèse de résolution à adopter. Par la validation de la tendance, le système hydraulique de la boulonneuse BO2102, le manipulateur de treillis et le système Swellex® de la boulonneuse BO2103 admettent une évolution de l'intensité de défaillance au fil du temps. C'est le modèle Crow-AMSAA qui est mis en application pour analyser ces sous-systèmes. Pour le processus de Poisson non homogène, l'espérance mathématique correspond au temps moyen de bon fonctionnement instantané à la fin du test. Les autres sous-systèmes acceptent l'hypothèse nulle et les données de défaillances sont alors considérées sans tendance. Les résultats des calculs effectués pour le test de dépendance des boulonneuses sont disponibles aux tableaux 5.7 et 5.8. Le test de corrélation se fait entre les séries composées des variables quantitatives représentant la $(i-1)^e$ donnée de temps de bon fonctionnement et la i^e donnée de temps de bon fonctionnement (décalage temporel de $k = 1$). Tous les sous-systèmes des deux équipements assujettis à ce test démontrent que leurs données de défaillances sont indépendantes et identiquement distribuées, et admettent un processus de renouvellement. La loi de probabilité caractérisant les données du processus de renouvellement est confirmée par l'application du test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov. L'approche bayésienne est considérée pour l'analyse du moteur de l'équipement BO2102, où la distribution gamma *a posteriori* est l'association de la fonction de vraisemblance et de la distribution exponentielle *a priori* selon le paramètre non informatif de Jeffreys. Étant donné le faible nombre de problématiques engendrées par la boulonneuse (composant) et le système de transmission pour l'ensemble de la flotte, ceux-ci ne sont pas considérés dans l'étude fiabiliste de ce type d'équipement. Les lois de probabilités, les estimations des paramètres et les moyennes de temps de bon fonctionnement (heure compteur) des sous-systèmes sont présentées de façon respective pour chaque boulonneuse aux tableaux 5.9 et 5.10.

Tableau 5.5: Calcul numérique du test de tendance [BO2102]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification				
	Laplace		MIL-HDBK-189		Cramér-von Mises
Flèche (n = 12)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,44 > -1,96)	valeur-p 0,148	non rejetée : RP/HPP (36,42 > 20,98 > 13,85)	valeur-p 0,360	-
Manipulateur de treillis (n = 31)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,47 > -1,96)	valeur-p 0,641	non rejetée : RP/HPP (81,38 > 52,14 > 44,89)	valeur-p 0,190	-
Tête de boulonnage (n = 35)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,47 > -1,96)	valeur-p 0,636	non rejetée : RP/HPP (90,53 > 75,82 > 51,74)	valeur-p 0,704	-
Avance de boulon (n = 12)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,62 > -1,96)	valeur-p 0,536	non rejetée : RP/HPP (36,42 > 20,85 > 18,35)	valeur-p 0,352	-
Avance de foration (n = 23)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,98 > -1,96)	valeur-p 0,326	non rejetée : RP/HPP (62,83 > 59,31 > 31,44)	valeur-p 0,910	-
Foreuse (n = 33)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,95 > -1,96)	valeur-p 0,051	non rejetée : RP/HPP (85,96 > 77,78 > 48,31)	valeur-p 0,846	-
Hydraulique (n = 32)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,45 > -1,96)	valeur-p 0,145	rejetée : NHPP (39,46 < 46,59)	valeur-p 0,007	non rejetée : NHPP (0,218 > 0,102)
Électrique/électronique (n = 35)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,24 > -1,96)	valeur-p 0,215	non rejetée : RP/HPP (90,53 > 75,53 > 51,74)	valeur-p 0,696	-
Swellex® (n = 5)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,67 > -1,96)	valeur-p 0,094	non rejetée : RP/HPP (18,31 > 12,33 > 3,94)	valeur-p 0,737	-
Eau/air (n = 7)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,40 > -1,96)	valeur-p 0,688	non rejetée : RP/HPP (23,68 > 10,59 > 6,57)	valeur-p 0,282	-
Air conditionné (n = 7)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,20 > -1,96)	valeur-p 0,838	non rejetée : RP/HPP (23,68 > 8,22 > 6,57)	valeur-p 0,122	-
Structure (n = 26)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,28 > -1,96)	valeur-p 0,782	non rejetée : RP/HPP (69,83 > 37,97 > 36,44)	valeur-p 0,073	-
Moteur (n = 4)	-	-	-	-	-
Pneus (n = 7)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,80 > -1,96)	valeur-p 0,426	non rejetée : RP/HPP (23,68 > 9,77 > 6,57)	valeur-p 0,221	-

Tableau 5.6: Calcul numérique du test de tendance [BO2103]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification				
	Laplace		MIL-HDBK-189		Cramér-von Mises
Flèche (n = 16)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,25 > -1,96)	valeur-p 0,212	rejetée : NHPP (16,39 < 20,07)	valeur-p 0,010	rejetée : RP/HPP (0,215 < 0,222)
Manipulateur de treillis (n = 21)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,49 > -1,96)	valeur-p 0,136	rejetée : NHPP (23,98 < 28,98)	valeur-p 0,011	non rejetée : NHPP (0,220 > 0,069)
Tête de boulonnage (n = 47)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,29 > -1,96)	valeur-p 0,198	non rejetée : RP/HPP (117,63 > 91,16 > 72,64)	valeur-p 0,436	-
Avance de boulon (n = 26)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,74 > -1,96)	valeur-p 0,458	non rejetée : RP/HPP (69,83 > 38,34 > 36,44)	valeur-p 0,079	-
Avance de foration (n = 24)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,36 > -1,96)	valeur-p 0,719	non rejetée : RP/HPP (65,17 > 42,33 > 33,10)	valeur-p 0,296	-
Foreuse (n = 25)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,49 > -1,96)	valeur-p 0,623	non rejetée : RP/HPP (67,50 > 35,00 > 34,76)	valeur-p 0,053	-
Hydraulique (n = 47)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,97 > -1,96)	valeur-p 0,330	non rejetée : RP/HPP (117,63 > 81,91 > 72,64)	valeur-p 0,191	-
Électrique/électronique (n = 37)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,84 > -1,96)	valeur-p 0,399	non rejetée : RP/HPP (95,08 > 70,09 > 55,19)	valeur-p 0,393	-
Swelllex® (n = 25)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,29 > -1,96)	valeur-p 0,197	rejetée : NHPP (32,99 < 34,76)	valeur-p 0,030	non rejetée : NHPP (0,217 > 0,065)
Eau/air (n = 15)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,29 > -1,96)	valeur-p 0,197	non rejetée : RP/HPP (43,77 > 35,90 > 18,49)	valeur-p 0,789	-
Air conditionné (n = 13)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,49 > -1,96)	valeur-p 0,624	rejetée : NHPP (14,88 < 15,38)	valeur-p 0,040	rejetée : RP/HPP (0,214 < 0,442)
Structure (n = 19)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,76 > -1,96)	valeur-p 0,447	non rejetée : RP/HPP (53,38 > 26,91 > 24,88)	valeur-p 0,090	-
Moteur (n = 12)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,38 > -1,96)	valeur-p 0,701	non rejetée : RP/HPP (36,42 > 20,29 > 13,85)	valeur-p 0,320	-
Pneus (n = 10)	non rejetée : RP/HP (1,96 > -0,19 > -1,96)	P valeur-p 0,846	non rejetée : RP/HPP (31,41 > 13,54 > 10,85)	valeur-p 0,147	-

Tableau 5.7: Calcul numérique du test de dépendance [BO2102]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification		
	r_1	valeur-p	Pearson
Flèche (n = 12)	-0,49	0,104	non rejetée : RP/HPP (1,79 < 2,23)
Manipulateur de treillis (n = 31)	-0,04	0,837	non rejetée : RP/HPP (0,21 < 2,06)
Tête de boulonnage (n = 35)	-0,08	0,630	non rejetée : RP/HPP (0,49 < 2,03)
Avance de boulon (n = 12)	-0,19	0,563	non rejetée : RP/HPP (0,60 < 2,23)
Avance de foration (n = 23)	0,05	0,815	non rejetée : RP/HPP (0,23 < 2,08)
Foreuse (n = 33)	0,05	0,803	non rejetée : HPP (0,25 < 2,04)
Hydraulique (n = 32)	-	-	-
Électrique/électronique (n = 35)	-0,19	0,281	non rejetée : RP/HPP (1,10 < 2,03)
Swellex® (n = 5)	0,44	0,454	non rejetée : RP/HPP (0,85 < 3,18)
Eau/air (n = 7)	-0,44	0,323	non rejetée : RP/HPP (1,10 < 2,57)
Air conditionné (n = 7)	0,17	0,722	non rejetée : RP/HPP (0,37 < 2,57)
Structure (n = 26)	-0,19	0,341	non rejetée : RP/HPP (0,97 < 2,06)
Moteur (n = 4)	-	-	-
Pneus (n = 7)	-0,74	0,053	non rejetée : RP/HPP (2,51 < 2,57)

Tableau 5.8: Calcul numérique du test de dépendance [BO2103]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification		
	r_1	valeur-p	Pearson
Flèche (n = 16)	0,03	0,899	non rejetée : RP/HPP (0,13 < 2,14)
Manipulateur de treillis (n = 21)	-	-	-
Tête de boulonnage (n = 47)	-0,09	0,548	non rejetée : RP/HPP (0,60 < 2,01)
Avance de boulon (n = 26)	0,02	0,919	non rejetée : RP/HPP (0,10 < 2,06)
Avance de foration (n = 24)	0,22	0,312	non rejetée : RP/HPP (1,03 < 2,07)
Foreuse (n = 25)	-0,14	0,508	non rejetée : RP/HPP (0,67 < 2,07)
Hydraulique (n = 47)	-0,08	0,604	non rejetée : RP/HPP (0,52 < 2,01)
Électrique/électronique (n = 37)	-0,07	0,680	non rejetée : RP/HPP (0,42 < 2,03)
Swellex® (n = 25)	-	-	-
Eau/air (n = 15)	-0,46	0,085	non rejetée : RP/HPP (1,86 < 2,16)
Air conditionné (n = 13)	-0,18	0,555	non rejetée : RP/HPP (0,61 < 2,20)
Structure (n = 19)	-0,15	0,528	non rejetée : RP/HPP (0,64 < 2,11)
Moteur (n = 12)	-0,04	0,896	non rejetée : RP/HPP (0,12 < 2,23)
Pneus (n = 10)	-0,34	0,332	non rejetée : RP/HPP (1,03 < 2,31)

Tableau 5.9: Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO2102]

Sous-système	Modélisation		
	Loi	Paramètre	MTBF (h)
Flèche (n = 12)	log-normale	$\mu = 3,72$ $\sigma = 1,27$	92
Manipulateur de treillis (n = 31)	log-normale	$\mu = 3,57$ $\sigma = 0,88$	53
Tête de boulonnage (n = 35)	Weibull	$\alpha = 40,33$ $\beta = 1,14$	39
Avance de boulon (n = 12)	Weibull	$\alpha = 128,98$ $\beta = 1,16$	123
Avance de foration (n = 23)	log-normale	$\mu = 3,48$ $\sigma = 1,16$	64
Foreuse (n = 33)	Weibull	$\alpha = 46,74$ $\beta = 1,04$	46
Hydraulique (n = 32)	non i.i.d. loi de puissance (NHPP)	$\alpha = 6,3 \times 10^{-4}$ $\beta = 1,52$	38
Électrique/électronique (n = 35)	log-normale	$\mu = 3,35$ $\sigma = 0,85$	41
Swellex® (n = 5)	Weibull	$\alpha = 187,16$ $\beta = 0,71$	233
Eau/air (n = 7)	log-normale	$\mu = 4,38$ $\sigma = 1,78$	391
Air conditionné (n = 7)	exponentielle	$\lambda = 0,056$	177
Structure (n = 26)	log-normale	$\mu = 3,41$ $\sigma = 1,19$	61
Moteur (n = 4)	approche bayésienne	$\lambda = 0,003$	312
Pneus (n = 7)	log-normale	$\mu = 4,84$ $\sigma = 0,69$	160

Tableau 5.10: Modèle, estimation des paramètres et MTBF [BO2103]

Sous-système	Modélisation		
	Loi	Paramètre	MTBF (h)
Flèche (n = 16)	Weibull	$\alpha = 54,87$ $\beta = 0,73$	66
Manipulateur de treillis (n = 21)	non i.i.d. loi de puissance (NHPP)	$\alpha = 3,64 \times 10^{-4}$ $\beta = 1,59$	31
Tête de boulonnage (n = 47)	exponentielle	$\lambda = 0,037$	27
Avance de boulon (n = 26)	log-normale	$\mu = 3,23$ $\sigma = 1,11$	47
Avance de foration (n = 24)	log-normale	$\mu = 3,48$ $\sigma = 0,84$	46
Foreuse (n = 25)	Weibull	$\alpha = 43,34$ $\beta = 1,04$	43
Hydraulique (n = 47)	Weibull	$\alpha = 25,08$ $\beta = 1,11$	24
Électrique/électronique (n = 37)	log-normale	$\mu = 2,86$ $\sigma = 0,97$	28
Swellex® (n = 25)	non i.i.d. loi de puissance (NHPP)	$\alpha = 1,64 \times 10^{-3}$ $\beta = 1,39$	29
Eau/air (n = 15)	log-normale	$\mu = 3,92$ $\sigma = 0,99$	82
Air conditionné (n = 13)	Weibull	$\alpha = 49,09$ $\beta = 0,77$	57
Structure (n = 19)	log-normale	$\mu = 3,65$ $\sigma = 0,82$	54
Moteur (n = 12)	exponentielle	$\lambda = 0,017$	57
Pneus (n = 10)	exponentielle	$\lambda = 0,011$	88

En examinant les résultats statistiques des boulonneuses, plusieurs constatations peuvent être émises en fonction de leurs sous-systèmes. Premièrement, les données des boulonneuses s'adaptent majoritairement à la loi log-normale (7 sous-systèmes pour la boulonneuse BO2102 et 5 sous-systèmes pour la boulonneuse BO2103) et la loi de Weibull (4 sous-systèmes pour la boulonneuse BO2102 et 4 sous-systèmes pour la boulonneuse BO2103). De plus, en comparant les deux boulonneuses de ce type de flotte, quatre sous-systèmes sont définis par une loi de probabilité identique : la foreuse (Weibull), le système électrique/électronique (log-normale), le système eau/air (log-normale) et la structure (log-normale). Pour la distribution de Weibull, il est pertinent de vérifier les caractéristiques du paramètre de forme β . Dans le cas du système Swellex® ($\beta = 0,71$) de la boulonneuse BO2102, de la flèche ($\beta = 0,73$) et du système d'air conditionné ($\beta = 0,77$) de la boulonneuse BO2103, le paramètre de forme est inférieur à 1 et cela indique que le taux de défaillance diminue au fil du temps. Ce contexte est sujet aux défaillances précoces où les causes potentielles peuvent résulter de l'utilisation de pièces défectueuses ou de déficience dans le processus de maintenance telles que des contraintes de temps limité ou un manque d'expertise. Pour la foreuse (composant) des deux équipements, le paramètre est identique et proche de la valeur unitaire ($\beta = 1,04$). Donc, les données sont caractérisées par une loi quasi exponentielle en ayant un taux de défaillance relativement constant qui augmente légèrement dans le temps. Pour un paramètre de forme compris entre 1 et 3, cette condition représente la phase entre la période de maturité et la période de vieillesse dans laquelle une fluctuation du taux de défaillance est observée. Ce constat est vrai pour la tête de boulonnage ($\beta = 1,14$), l'avance de boulon ($\beta = 1,16$) et le système hydraulique ($\beta = 1,11$) de la boulonneuse BO2103. L'état d'un sous-système qui suit un processus de Poisson non homogène est, entre autres, défini par le paramètre de forme β . Les systèmes qui se détériorent malgré l'apport de maintenances sont le système hydraulique ($\beta = 1,52$) pour la boulonneuse BO2102, le manipulateur de treillis ($\beta = 1,59$) et le système Swellex® ($\beta = 1,39$) pour la boulonneuse BO2103. Les données de défaillance de la tête de boulonnage de la boulonneuse BO2102, ainsi que le moteur et les pneus de la boulonneuse BO2103 suivent une loi exponentielle avec un taux de défaillance constant auquel les pannes sont complètement fortuites.

La comparaison entre les sous-systèmes des boulonneuses se fait également avec la valeur du temps moyen de bon fonctionnement (MTBF). Tous les sous-systèmes de la boulonneuse BO2102 possèdent une espérance supérieure à la boulonneuse BO2103. La MTBF est similaire entre les boulonneuses pour la foreuse (respectivement, 46 pour la boulonneuse BO2102 et 43 pour la boulonneuse BO2103) et la structure (61 ; 54).

Le plus grand écart de la MTBF provient des sous-systèmes de l'avance de boulon (123 ; 47), le système Swellex® (233 ; 29), le système d'eau/air (391 ; 82), le système d'air conditionné (177 ; 57) et le moteur (312 ; 57). À la suite de ces observations, il est pertinent d'examiner ces sous-systèmes afin de déterminer d'où viennent les écarts importants du nombre de défaillances entre les deux équipements. Pour le système d'avance de boulon, la différence provient, d'une part, du nombre de pannes du moteur d'alimentation, et d'autre part, à des bris plus fréquents de la chaîne de l'avance. Le nombre de défaillances supplémentaires pour le système eau/air est issu, en partie, d'un plus grand nombre de défauts des valves à eau. Pour le système d'installation de boulon de type Swellex®, c'est la récurrence du nombre de pannes de la pompe à eau qui explique la différence entre les deux équipements. Pour le système d'air conditionné, cela est dû à une défaillance plus accrue du condenseur et du compresseur. Pour le moteur, il n'a pas de mode de défaillance qui soit plus fréquent qu'un autre et l'écart est surtout caractérisé par un nombre de pannes plus élevé, sans qu'il n'ait de corrélation entre les types de réparations effectués.

Les graphiques de la fiabilité $R(t)$ des boulonneuses, qui représentent la probabilité d'un sous-système à accomplir une fonction requise sous des conditions données dans un intervalle de temps donné, sont comprises respectivement entre la figure 5.16 et la figure 5.19. La plus faible courbe de fiabilité caractérisant le module de forage et de boulonnage est attribuée à la tête de boulonnage, commune aux deux boulonneuses. Cependant, l'avance de boulon et la flèche, respectivement pour la boulonneuse BO2102 et la boulonneuse BO2103, affichent la meilleure fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage. En examinant l'évolution de la fiabilité dans la situation du chariot, le système hydraulique et le système électrique/électronique démontrent une détérioration plus rapide en fonction du temps. À l'inverse, le moteur et les pneus, respectivement pour la boulonneuse BO2102 et la boulonneuse BO2103, affichent une fiabilité supérieure dans l'ensemble des sous-systèmes. La boulonneuse peut être considérée comme un système divisé en plusieurs sous-systèmes connectés en série. En portant attention au tableau 5.11, qui montre la modélisation de la fiabilité de chaque sous-système de la flotte après 50 heures d'opération, il est possible de conclure que, dans l'ensemble, la boulonneuse BO2102 a des sous-systèmes moins défaillants que son homologue avec une fiabilité totale de $1,07 \times 10^{-5}$ contre $1,59 \times 10^{-8}$.

L'allure du taux de défaillance $\lambda(t)$ en fonction du nombre d'heures de fonctionnement est représentée entre la figure 5.20 et la figure 5.23 pour chaque équipement et leurs sous-systèmes. En résumé, la description par une loi exponentielle implique un taux de défaillance constant dans le temps.

Les sous-systèmes caractérisés par la loi log-normale se comportent de cette façon : initialement, dans un court intervalle de temps, le taux de défaillance augmente progressivement et après un intervalle de temps, atteint une valeur à peu près constante. Pour la distribution de Weibull c'est le paramètre de forme β qui indique l'allure de la courbe du taux de défaillance. Dans les cas caractérisés par cette loi avec un paramètre de forme proche de 1, ils se comportent de manière similaire à une loi exponentielle et l'allure de la courbe du taux de défaillance est quasi constante. Pour les données modélisées par un processus de Poisson non homogène et dont les sous-systèmes ont un paramètre β supérieur à 1, cela indique une dégradation du sous-système et une augmentation de l'intensité de défaillance. Dans le cas contraire, un paramètre β en dessous de 1 dévoile une amélioration du sous-système et l'intensité de défaillance diminue dans le temps.

En examinant les résultats présentés par les diagrammes de Pareto et les graphiques de fiabilité, il est possible de valider des points pertinents sur le modèle de résolution adopté. Pour la boulonneuse BO2102, la détérioration de la fiabilité des sous-systèmes est fortement conséquente au nombre de défaillances recensé par le diagramme de Pareto. Même constat pour la boulonneuse BO2103, sauf pour une exception : le manipulateur de treillis a une courbe de fiabilité qui décroît plus vite dans le temps, même en ayant un nombre de défaillances inférieur par rapport à certains sous-systèmes.

Tableau 5.11: Résumé de la fiabilité de la flotte de boulonneuses

Sous-système	Estimation fiabilité R(50 h)	
	BO2102	BO2103
Flèche	0,439	0,393
Manipulateur de treillis	0,351	0,198
Tête de boulonnage	0,279	0,158
Avance de boulon	0,716	0,269
Avance de foration	0,357	0,304
Foreuse	0,342	0,313
Hydraulique	0,143	0,116
Électrique/électronique	0,261	0,139
Swellex®	0,677	0,179
Eau/air	0,603	0,505
Air conditionné	0,754	0,362
Structure	0,335	0,376
Moteur	0,812	0,419
Pneus	0,911	0,607
R_{total} (50 h)	$1,07 \times 10^{-5}$	$1,59 \times 10^{-8}$

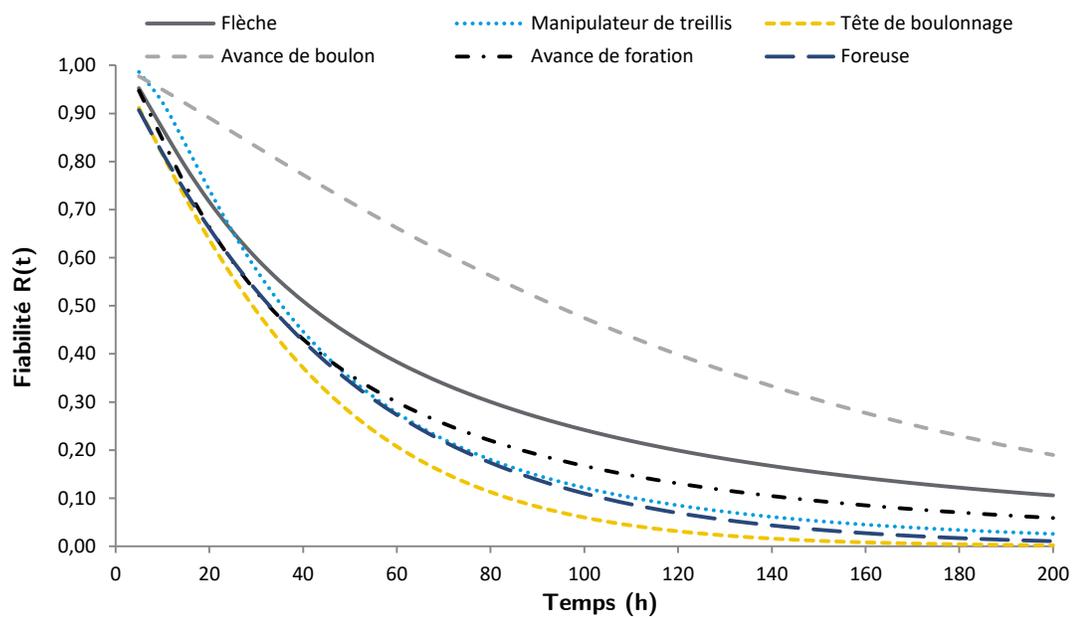


Figure 5.16: Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO2102]

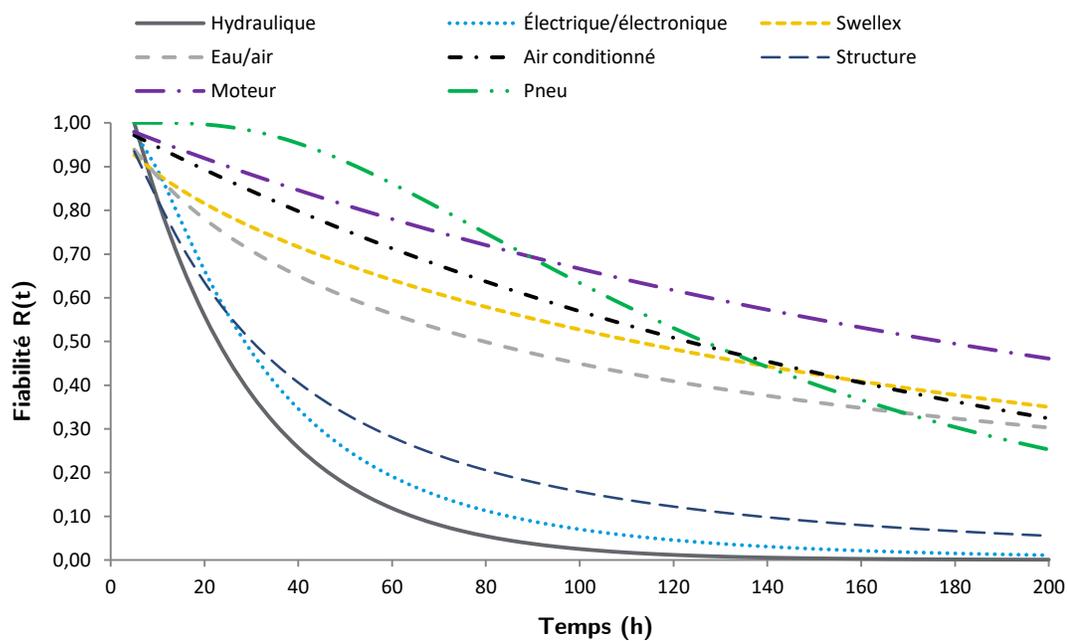


Figure 5.17: Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO2102]

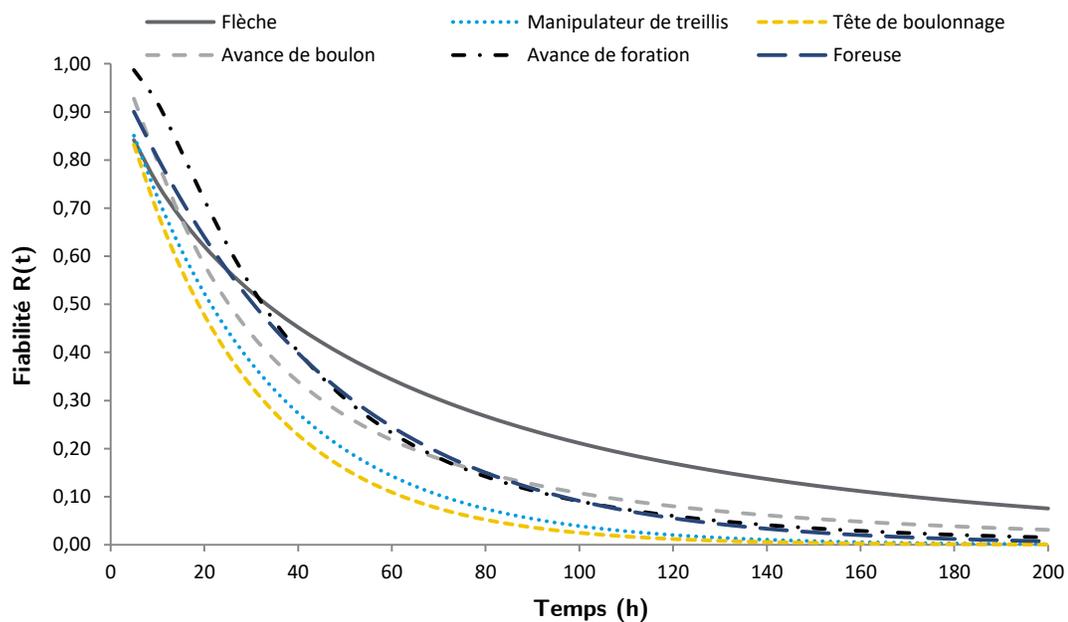


Figure 5.18: Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO2103]

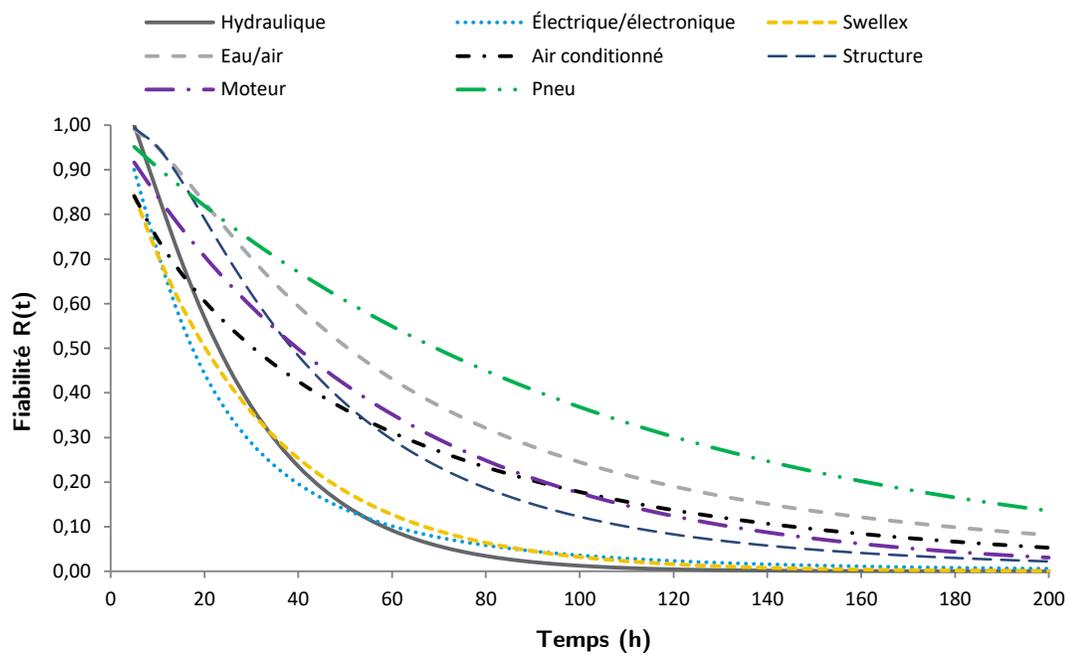


Figure 5.19: Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO2103]

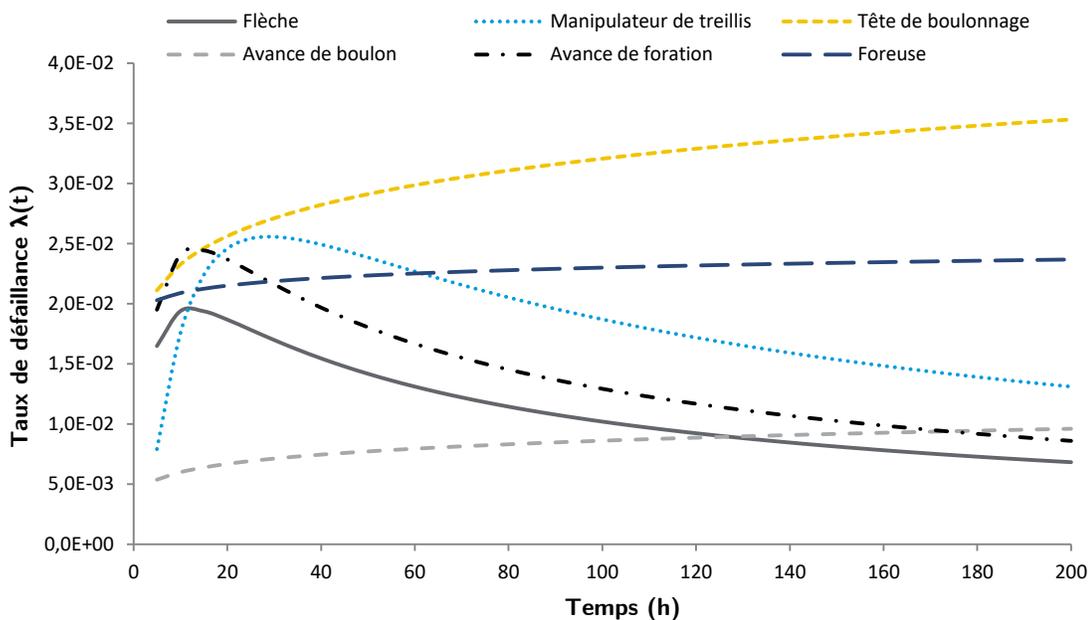


Figure 5.20: Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO2102]

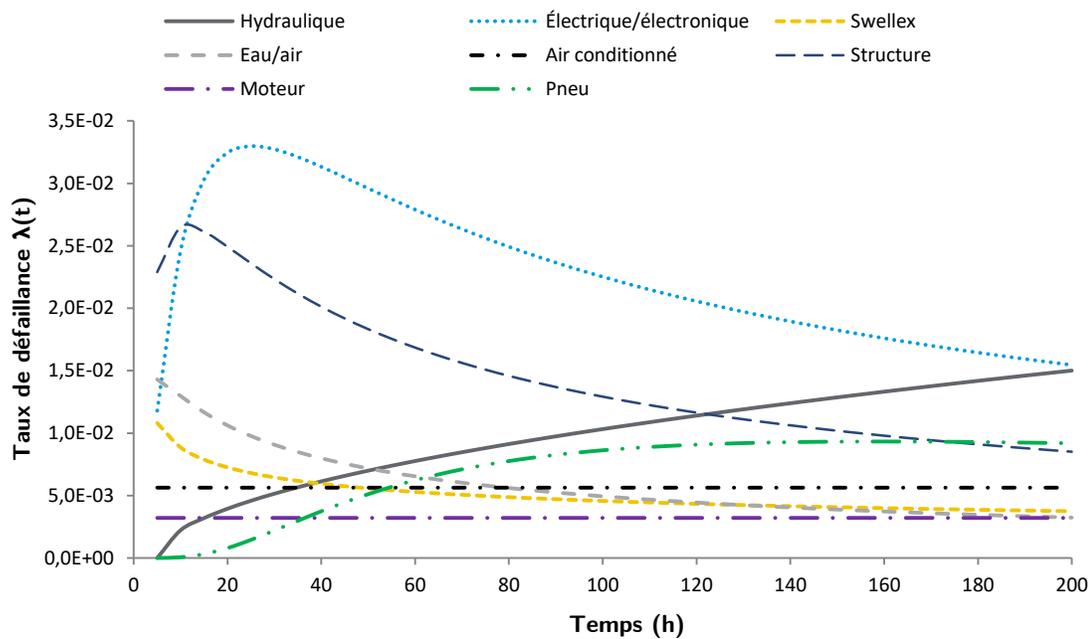


Figure 5.21: Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO2102]

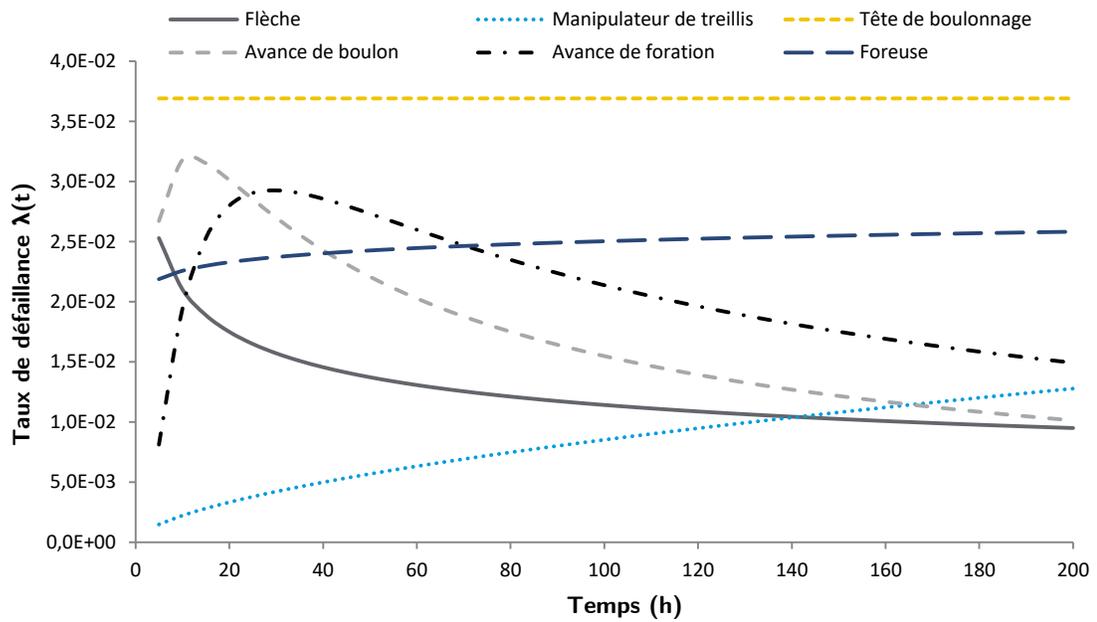


Figure 5.22: Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO2103]

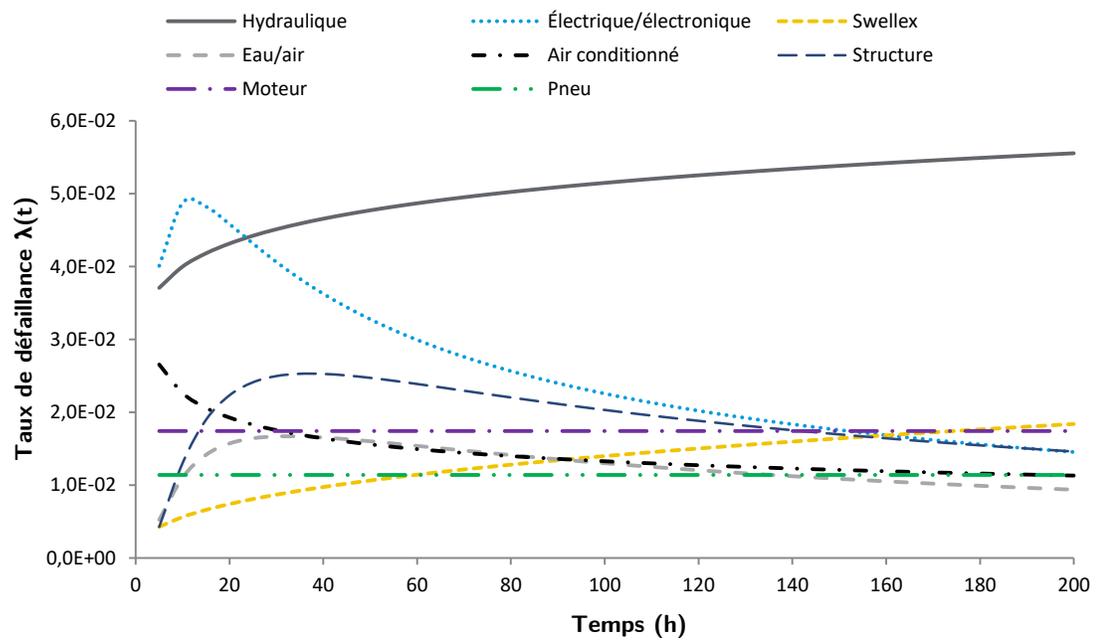


Figure 5.23: Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO2103]

5.7 Étude de boulonneuse à plateforme (BO1111-BO1115)

Employé pour le support de terrain et numéroté entre BO1111 et BO1115, ce type d'équipement est similaire aux boulonneuses BO2102 et BO2103. À la différence du modèle précédent, le module de forage et de boulonnage est intégré à une plateforme élévatrice de type ciseaux qui permet d'atteindre une grande élévation. De plus, il est à noter que ce module est plus rudimentaire que l'autre modèle de la précédente étude de cas. En ce sens, la machine ne possède pas de carrousel permettant de recharger les boulons de renforcement et de bras manipulateur de treillis. Les figures 5.24 et 5.25 montrent respectivement la vue en élévation et la vue en plan de ce modèle de boulonneuse à plateforme. La boulonneuse en opération est illustrée à la figure 5.26.

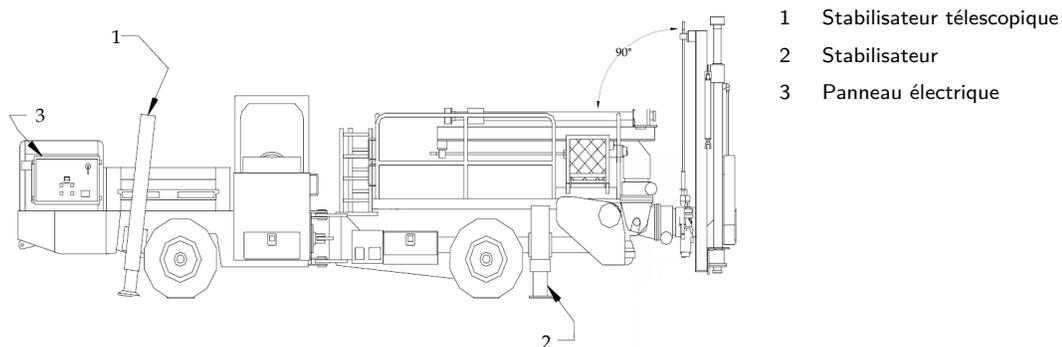


Figure 5.24: Vue en élévation de la boulonneuse à plateforme (fournie par AEM)

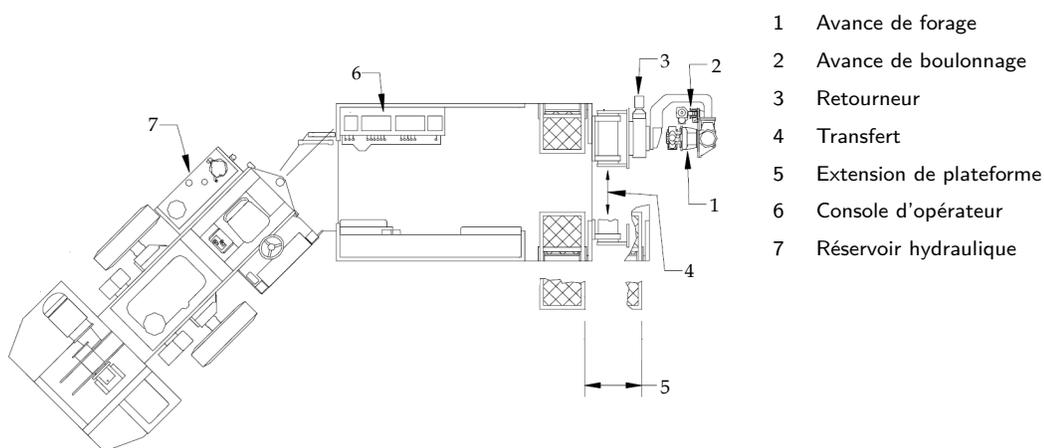


Figure 5.25: Vue en plan de la boulonneuse à plateforme (fournie par AEM)



Figure 5.26: Vue de la boulonneuse à plateforme en opération (fournie par AEM)

À part les exceptions mentionnées, les processus de forage et de boulonnage sont équivalents au modèle de boulonneuse précédent. Le tableau 5.12 présente les informations techniques de l'équipement, ainsi que la division en sous-systèmes pour la flotte de boulonneuses à plateforme (BO1111-BO1115).

Tableau 5.12: Informations techniques et classement des sous-systèmes de la boulonneuse à plateforme

Information	Section	Sous-système
Dimensions : 9,01 m (long.) × 2,59 m (larg.) × 2,59 m (haut.) Masse : 22 000 kg Moteur diesel : 115 kW (155 hp) Moteur électrique : 45 kW (60 hp)	Module de forage et de boulonnage	Flèche Avance de foration Avance de boulon Foreuse (composant) Boulonneuse (composant)
	Chariot (cabine et module arrière)	Hydraulique Électrique/électronique Swellex® Eau/air Air conditionné Structure Transmission Moteur diesel Pneus

5.7.1 Modes de défaillance spécifiques

Dans le cadre de l'analyse des maintenances de cette machine minière, les pannes de la flèche sont caractérisées essentiellement par la défectuosité du moteur du transfert, le bris du système de chaîne du transfert et la défectuosité du vérin d'extension du pivot. Pour cette étude de cas, la tête de boulonnage est plus simple et englobe les deux systèmes d'avance distinctifs : l'avance de la boulonneuse et l'avance de la foreuse. Les modes de défaillance les plus récurrents pour ces systèmes sont la défectuosité du moteur d'alimentation, l'ajustement et le bris du système de chaîne pour l'alimentation, et l'usure des plaques de guidage. Les défectuosités de la boulonneuse (composant), peu nombreux, se concentrent principalement sur les accumulateurs à pression et la tête de rotation. Les pannes de la foreuse (composant) surviennent par l'usure des joints d'étanchéités, des joints toriques, de l'emmanchement, de la défectuosité des accumulateurs de pression et du bris du nez de la foreuse. Les défaillances les plus fréquentes répertoriées pour le système électrique/électronique sont les bris du câble d'alimentation 600 V et les troubles électriques du pendentif à commande centralisée. Le tableau 5.13 dresse la liste des composants de la boulonneuse à plateforme les plus à risque d'avoir une problématique due à leurs modes de défaillance.

Tableau 5.13: Modes de défaillance récurrents des composants de la boulonneuse à plateforme

Sous-système	Composant	Mode de défaillance
Flèche	<ul style="list-style-type: none"> ◆ moteur de transfert ◆ chaînes pour le transfert ◆ vérin d'extension du pivot ◆ vérin d'alimentation ◆ retourneur ◆ plaques de guidage 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ défaillance en fonctionnement (général) ◆ rupture ◆ fuites, rupture ◆ fuites, déformation ◆ bris /desserrage, rupture (boulon) ◆ usure
Avance de boulon	<ul style="list-style-type: none"> ◆ chaînes pour l'avance ◆ moteur d'alimentation ◆ plaques de guidage ◆ mât d'alimentation 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ rupture ◆ défaillance en fonctionnement (général) /usure (pignon) ◆ usure ◆ usure
Avance de foration	<ul style="list-style-type: none"> ◆ chaînes pour l'avance ◆ moteur d'alimentation ◆ plaques de guidage ◆ table de foreuse 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ rupture ◆ défaillance en fonctionnement (général) /usure (pignon) ◆ usure ◆ desserrage, rupture (boulon)
Foreuse (composant)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ marteau perforateur ◆ accumulateurs de pression ◆ nez (carter) ◆ emmanchement ◆ joint d'étanchéité ◆ joint torique ◆ diaphragme 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ défaillance en fonctionnement (général) /desserrage, rupture (boulon) ◆ défaillance en fonctionnement (général) /gaz insuffisant /desserrage, rupture (boulon) ◆ fuites, bris ◆ usure ◆ usure ◆ usure ◆ usure
Boulonneuse (composant)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ tête de rotation ◆ accumulateurs de pression 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ défaillance en fonctionnement (général) /fuites ◆ défaillance en fonctionnement (général) /gaz insuffisant
Électrique/électronique	<ul style="list-style-type: none"> ◆ câble d'alimentation 600 V ◆ pendentif à commande centralisée ◆ panneau de commande ◆ fils électriques ◆ lumières 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ usure, bris ◆ trouble électrique ◆ trouble électronique, bris ◆ rupture ◆ trouble électrique, bris

5.7.2 Analyse avec approche non paramétrique : résultats et discussion

Les figures 5.27, 5.29, 5.31, 5.33 et 5.35 montrent de façon respective les diagrammes des interventions pour les boulonneuses à plateforme de numérotation BO1111 à BO1115. Les maintenances préventives symbolisent la plus grande proportion du nombre de bons de travail créés dans l'ensemble de la flotte (respectivement de, 20 % pour l'équipement BO1111, 21 % pour l'équipement BO1112, 23 % pour l'équipement BO1113, 18 % pour l'équipement BO1114 et 23 % pour l'équipement BO1115). Dans la flotte de boulonneuses à plateforme, l'avance de boulon représente le sous-système le plus défaillant (15 %; 15 %; 13 %; 18 %; 16 %). Pour les équipements BO1111 à BO1114, les trois sous-systèmes qui tombent le plus souvent en panne après l'avance de la boulonneuse sont le système hydraulique (13 %; 11 %; 11 %; 10 %), le système électrique/électronique (13 %; 13 %; 12 %; 11 %) et la flèche (9 %; 8 %; 8 %; 10 %). Individuellement, les sous-systèmes suivants représentent 5 % et moins du pourcentage de la répartition totale des interventions pour les boulonneuses à plateforme étudiées : la boulonneuse (3 %; 2 %; 3 %; 2 %; 1 %), le système eau/air (3 %; 5 %; 2 %; 5 %; 4 %), le système Swellex® (2 %; 1 %; 4 %; 2 %; 4 %), l'air conditionné (2 %; 1 %; 2 %; 1 %; 1 %), la transmission (1 %; 3 %; 3 %; 3 %; 1 %), le moteur (moins de 1 % pour l'ensemble) et les pneus (2 %; 2 %; 4 %; 2 %; 3 %). Les diagrammes de Pareto sont présentés respectivement aux figures 5.28, 5.30, 5.32, 5.34 et 5.36. Dans les cinq boulonneuses à plateforme analysées, au moins six sous-systèmes sont présents dans le cumulatif des défaillances qui atteint 80 % de la répartition cumulative totale : les avances de la boulonneuse et de la foreuse, la foreuse (composant), le système hydraulique, le système électrique/électronique et la flèche. Pour rejoindre le seuil de 80 %, il faut additionner les défaillances de la structure pour les équipements BO1112, BO1113 et BO1115, et les défaillances du système eau/air pour l'équipement BO1114.

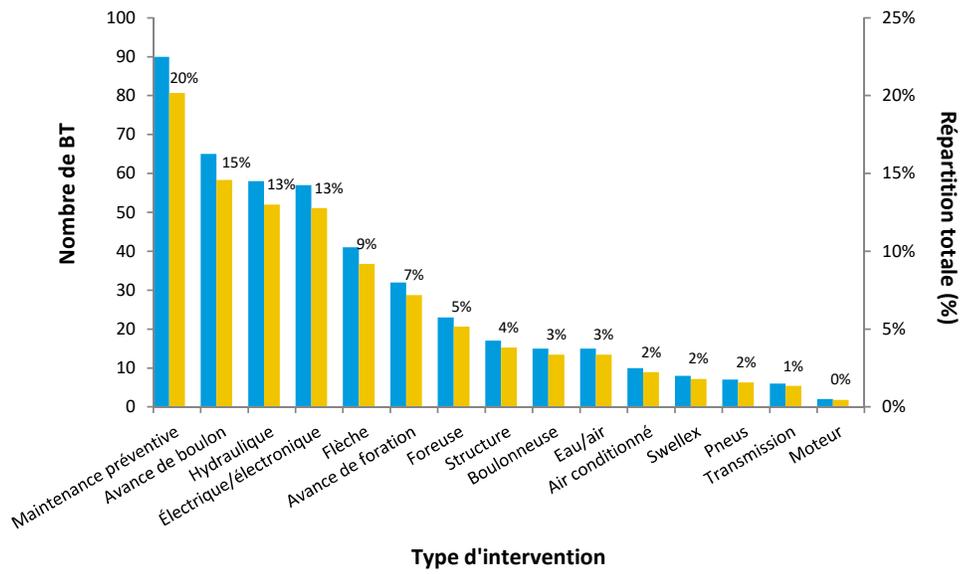


Figure 5.27: Diagramme de la fréquence d'interventions [BO1111]

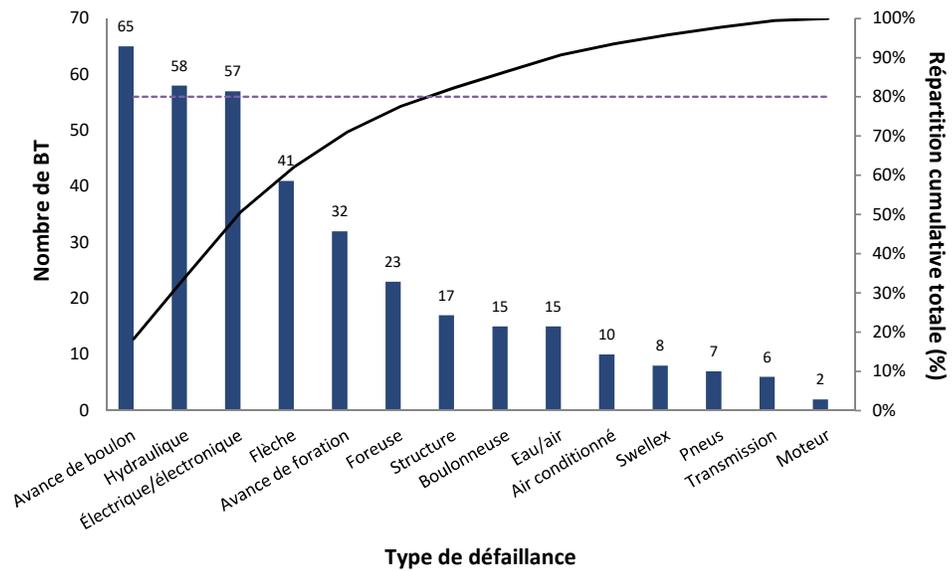


Figure 5.28: Diagramme de Pareto [BO1111]

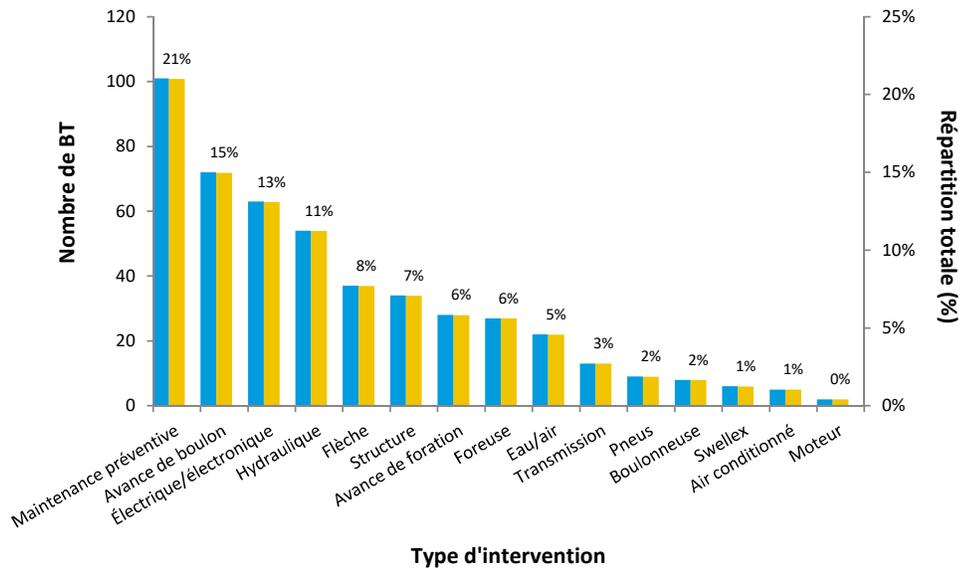


Figure 5.29: Diagramme de la fréquence d'interventions [BO1112]

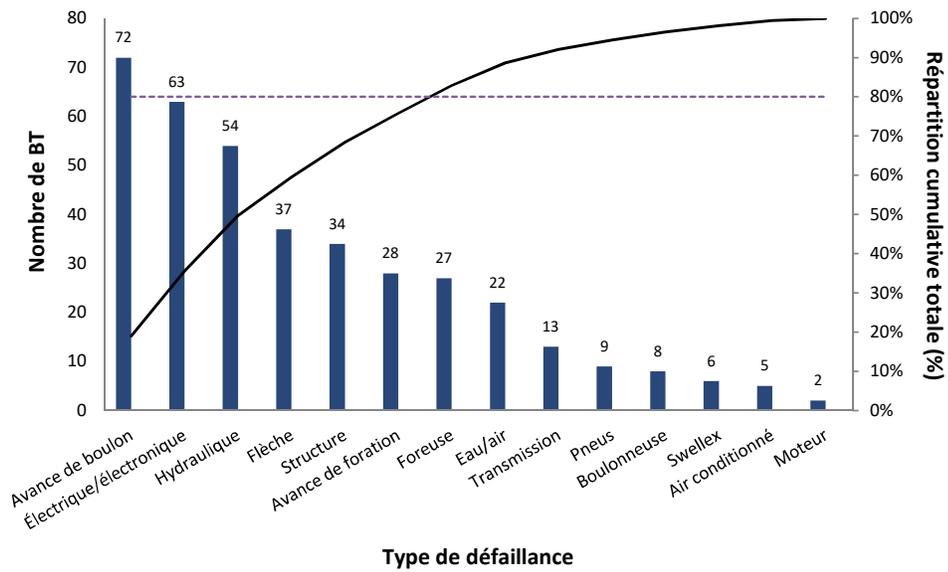


Figure 5.30: Diagramme de Pareto [BO1112]

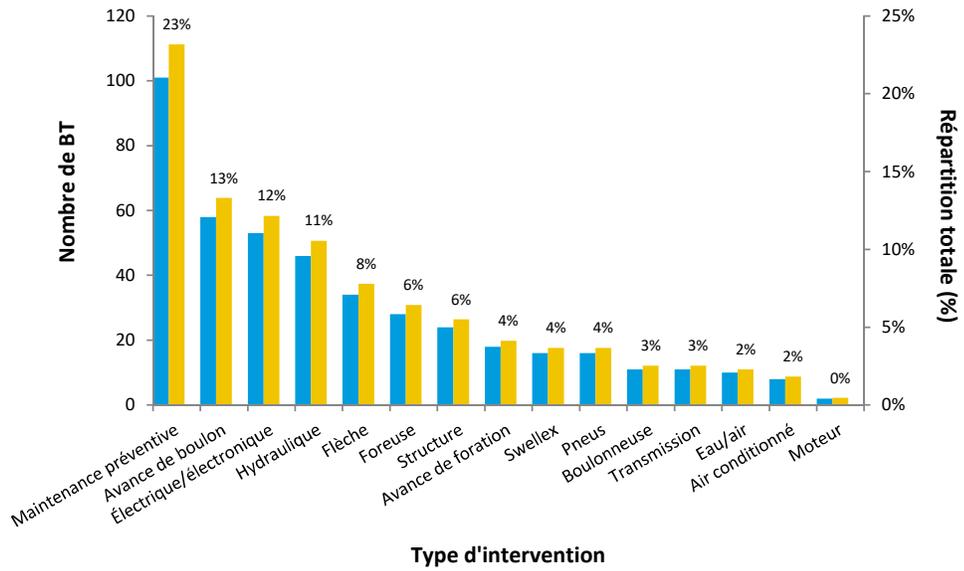


Figure 5.31: Diagramme de la fréquence d'interventions [BO1113]

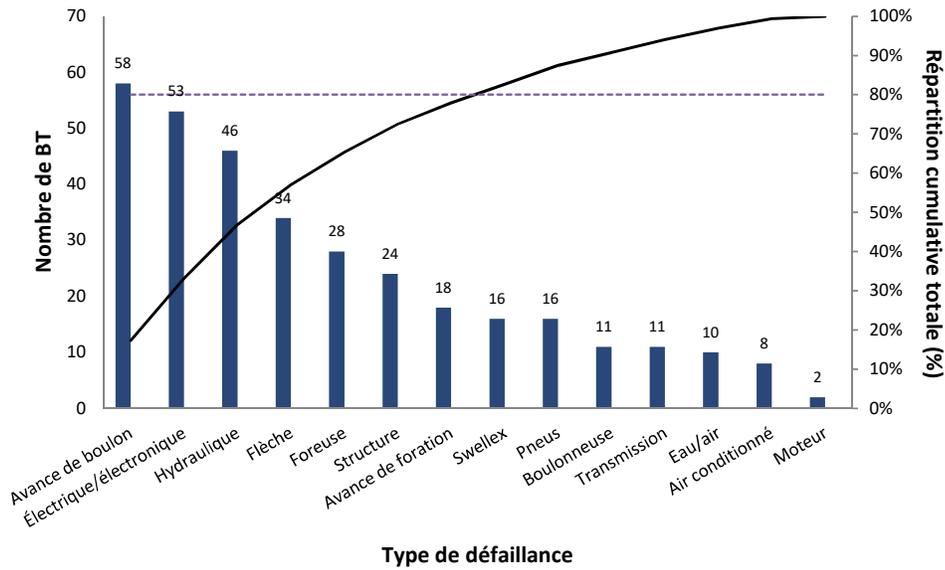


Figure 5.32: Diagramme de Pareto [BO1113]

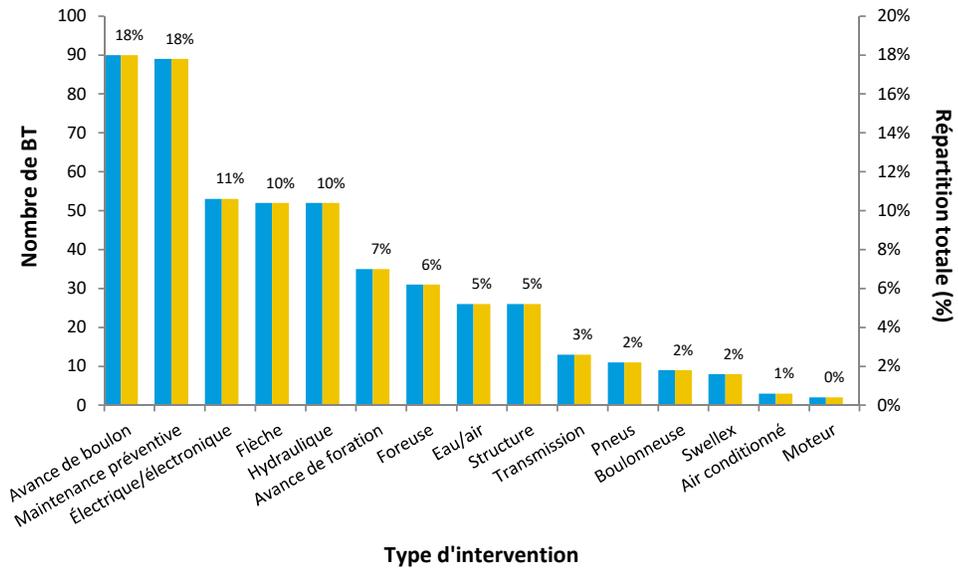


Figure 5.33: Diagramme de la fréquence d'interventions [BO1114]

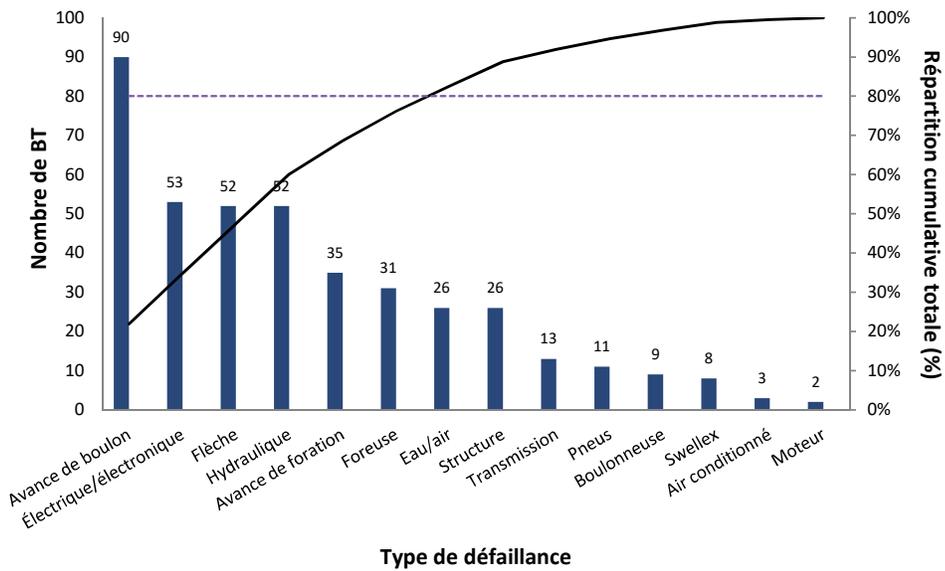


Figure 5.34: Diagramme de Pareto [BO1114]

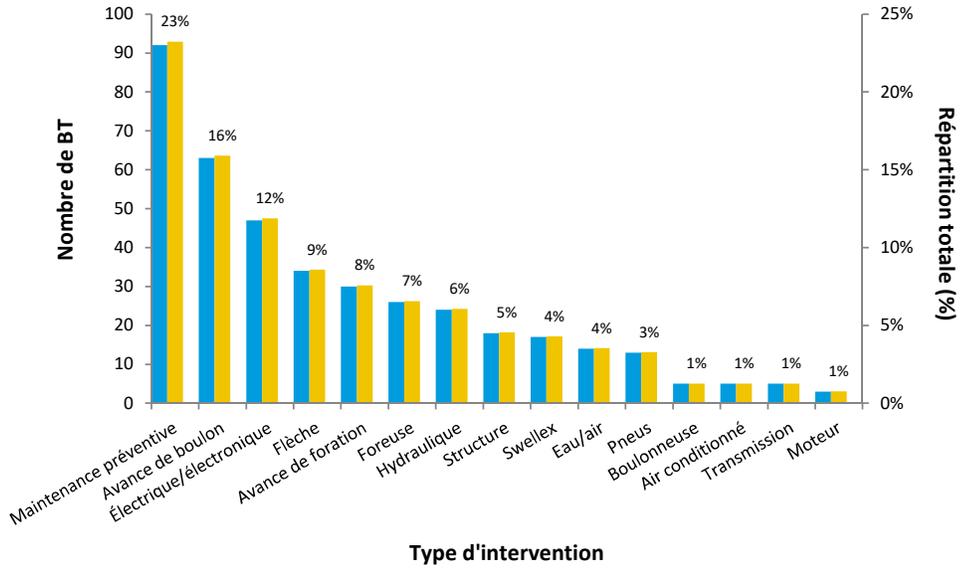


Figure 5.35: Diagramme de la fréquence d'interventions [BO1115]

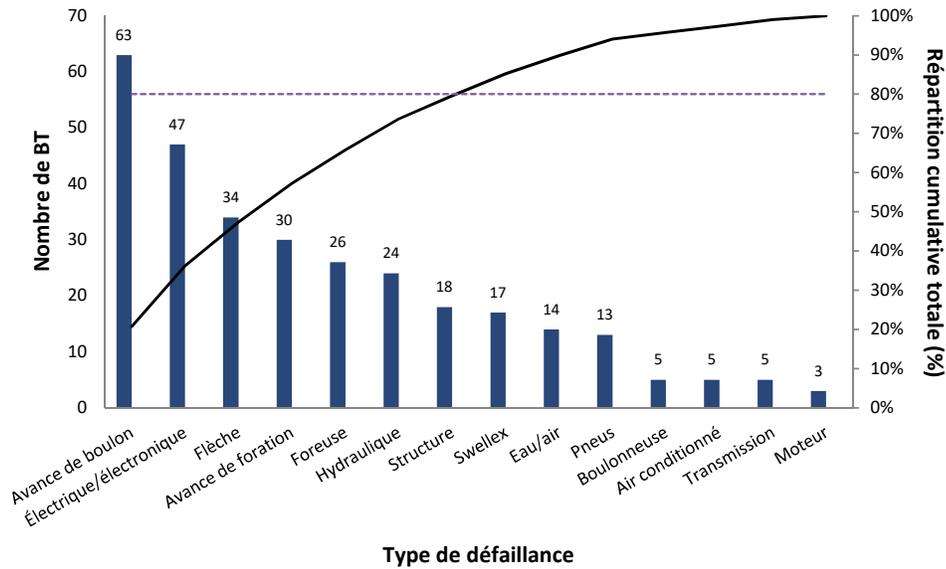


Figure 5.36: Diagramme de Pareto [BO1115]

5.7.3 Analyse avec approche fiabiliste : résultats et discussion

La première étape de l'analyse fiabiliste est de vérifier l'hypothèse de résolution par le seuil de signification (5 %) des divers tests de tendance et de dépendance. La validation des hypothèses dans le contexte de l'observation de la tendance est disponible entre les tableaux 5.14 à 5.18. Par l'exécution du test de Laplace, du test MIL-HDBK-189 et du test de Cramér-von Mises, la transmission de la boulonneuse à plateforme BO1111 ; l'avance de boulon et le système eau/air de la boulonneuse à plateforme BO1112 ; l'avance de boulon de la boulonneuse à plateforme BO1113 ; la flèche et la transmission de la boulonneuse à plateforme BO1114 ; et les pneus de la boulonneuse à plateforme BO1115 admettent que les données de défaillances suivent un processus de Poisson non homogène. Alors, leur modélisation est associée *de facto* à la loi de puissance. Dans le processus de comptage des autres sous-systèmes, la valeur moyenne des temps de défaillance ne s'éloigne pas assez du point central pour conclure à une évolution de l'intensité de défaillance. Le test de dépendance et ses résultats par le calcul numérique peuvent être consultés dans les tableaux 5.19 à 5.23. Dans la situation où les équipements et leurs sous-systèmes n'ont aucune évolution au niveau de l'intensité de défaillance, il est démontré que, par le test de corrélation, toutes les données de défaillances sont indépendantes et identiquement distribuées. En résumé, les lois de probabilités, les estimations des paramètres et les moyennes de temps de bon fonctionnement des boulonneuses à plateforme BO1111 à BO1115 sont comprises respectivement entre les tableaux 5.24 à 5.28. Les distributions statistiques des données définies par le processus stochastique de renouvellement ont été trouvées par l'application du test de Kolmogorov-Smirnov. Il est à mentionner que l'étude du système d'air conditionné pour la boulonneuse à plateforme BO1114 tient compte d'un modèle statistique avec l'approche bayésienne. En outre, les pannes du moteur diesel n'ont pas été prises en compte dans cette analyse puisque leur fréquence pour l'ensemble de la flotte est très peu représentative.

Tableau 5.14: Calcul numérique du test de tendance [BO1111]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification				
	Laplace		MIL-HDBK-189		Cramér-von Mises
Flèche (n = 36)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,66 > -1,96)	valeur-p 0,097	non rejetée : RP/HPP (92,81 > 80,42 > 53,46)	valeur-p 0,768	-
Avance de foration (n = 32)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,96 > -1,96)	valeur-p 0,335	non rejetée : RP/HPP (83,68 > 48,67 > 46,59)	valeur-p 0,078	-
Avance de boulon (n = 65)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,40 > -1,96)	valeur-p 0,690	non rejetée : RP/HPP (157,61 > 109,91 > 104,66)	valeur-p 0,101	-
Foreuse (n = 23)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,09 > -1,96)	valeur-p 0,924	non rejetée : RP/HPP (62,83 > 41,36 > 31,44)	valeur-p 0,333	-
Boulonneuse (n = 15)	rejetée : NHPP (-2,46 < -1,96)	valeur-p 0,014	non rejetée : RP/HPP (43,77 > 40,84 > 18,49)	valeur-p 0,910	rejetée : RP/HPP (0,214 < 0,287)
Hydraulique (n = 58)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,00 > -1,96)	valeur-p 0,317	non rejetée : RP/HPP (142,14 > 107,96 > 92,13)	valeur-p 0,310	-
Électrique/électronique (n = 57)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,21 > -1,96)	valeur-p 0,832	non rejetée : RP/HPP (139,92 > 110,65 > 90,35)	valeur-p 0,429	-
Swelllex® (n = 8)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,30 > -1,96)	valeur-p 0,765	non rejetée : RP/HPP (26,30 > 14,23 > 7,97)	valeur-p 0,418	-
Eau/air (n = 15)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,14 > -1,96)	valeur-p 0,889	non rejetée : RP/HPP (43,77 > 24,63 > 18,49)	valeur-p 0,257	-
Air conditionné (n = 10)	rejetée : NHPP (-2,53 < -1,96)	valeur-p 0,011	non rejetée : RP/HPP (31,41 > 31,12 > 10,85)	valeur-p 0,946	rejetée : RP/HPP (0,212 < 0,218)
Structure (n = 17)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,32 > -1,96)	valeur-p 0,750	non rejetée : RP/HPP (48,60 > 29,35 > 21,66)	valeur-p 0,305	-
Transmission (n = 6)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,38 > -1,96)	valeur-p 0,168	rejetée : NHPP (2,09 < 5,23)	valeur-p 0,003	non rejetée : NHPP (0,199 > 0,139)
Pneus (n = 7)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,43 > -1,96)	valeur-p 0,666	non rejetée : RP/HPP (23,68 > 12,63 > 6,57)	valeur-p 0,444	-

Tableau 5.15: Calcul numérique du test de tendance [BO1112]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification				
	Laplace		MIL-HDBK-189		Cramér-von Mises
Flèche (n = 37)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,79 > -1,96)	valeur-p 0,432	non rejetée : RP/HPP (95,08 > 78,32 > 55,19)	valeur-p 0,657	-
Avance de foration (n = 28)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,95 > -1,96)	valeur-p 0,051	rejetée : NHPP (33,80 < 39,80)	valeur-p 0,008	non rejetée : NHPP (0,217 > 0,047)
Avance de boulon (n = 72)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,11 > -1,96)	valeur-p 0,912	non rejetée : RP/HPP (173,00 > 125,65 > 117,27)	valeur-p 0,138	-
Foreuse (n = 27)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,08 > -1,96)	valeur-p 0,933	non rejetée : RP/HPP (72,15 > 51,45 > 38,12)	valeur-p 0,427	-
Boulonneuse (n = 8)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,49 > -1,96)	valeur-p 0,137	non rejetée : RP/HPP (26,30 > 17,14 > 7,96)	valeur-p 0,624	-
Hydraulique (n = 54)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,92 > -1,96)	valeur-p 0,358	non rejetée : RP/HPP (133,26 > 94,57 > 85,01)	valeur-p 0,182	-
Électrique/électronique (n = 63)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,10 > -1,96)	valeur-p 0,924	non rejetée : RP/HPP (153,20 > 113,54 > 101,07)	valeur-p 0,221	-
Swelllex® (n = 6)	rejetée : NHPP (-2,39 < -1,96)	valeur-p 0,017	non rejetée : RP/HPP (21,03 > 17,68 > 5,23)	valeur-p 0,874	rejetée : RP/HPP (0,199 < 0,289)
Eau/air (n = 22)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,43 > -1,96)	valeur-p 0,152	rejetée : NHPP (78,93 > 60,48)	valeur-p 0,001	non rejetée : NHPP (0,217 > 0,144)
Air conditionné (n = 5)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,01 > -1,96)	valeur-p 0,993	non rejetée : RP/HPP (18,31 > 5,93 > 3,94)	valeur-p 0,179	-
Structure (n = 34)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,40 > -1,96)	valeur-p 0,162	non rejetée : RP/HPP (88,25 > 65,08 > 50,02)	valeur-p 0,422	-
Transmission (n = 13)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,14 > -1,96)	valeur-p 0,886	non rejetée : RP/HPP (38,89 > 16,66 > 15,38)	valeur-p 0,081	-
Pneus (n = 9)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,17 > -1,96)	valeur-p 0,867	non rejetée : RP/HPP (28,87 > 13,03 > 9,39)	valeur-p 0,210	-

Tableau 5.16: Calcul numérique du test de tendance [BO1113]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification				
	Laplace		MIL-HDBK-189		Cramér-von Mises
Flèche (n = 34)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,33 > -1,96)	valeur-p 0,182	non rejetée : RP/HPP (88,25 > 51,06 > 50,02)	valeur-p 0,062	-
Avance de foration (n = 18)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,34 > -1,96)	valeur-p 0,181	non rejetée : RP/HPP (51,00 > 47,68 > 23,27)	valeur-p 0,908	-
Avance de boulon (n = 58)	rejetée : NHPP (-1,99 < -1,96)	valeur-p 0,047	non rejetée : RP/HPP (143,14 > 136,85 > 92,13)	valeur-p 0,909	non rejetée : NHPP (0,218 > 0,184)
Foreuse (n = 28)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,79 > -1,96)	valeur-p 0,073	non rejetée : RP/HPP (74,47 > 65,39 > 39,80)	valeur-p 0,817	-
Boulonneuse (n = 11)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,55 > -1,96)	valeur-p 0,120	non rejetée : RP/HPP (33,92 > 24,68 > 12,34)	valeur-p 0,687	-
Hydraulique (n = 46)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,21 > -1,96)	valeur-p 0,226	non rejetée : RP/HPP (115,39 > 85,41 > 70,88)	valeur-p 0,327	-
Électrique/électronique (n = 53)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,49 > -1,96)	valeur-p 0,136	non rejetée : RP/HPP (131,03 > 109,93 > 83,24)	valeur-p 0,623	-
Swelllex® (n = 16)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,01 > -1,96)	valeur-p 0,990	non rejetée : RP/HPP (46,19 > 27,39 > 20,07)	valeur-p 0,301	-
Eau/air (n = 10)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,63 > -1,96)	valeur-p 0,530	non rejetée : RP/HPP (31,41 > 16,61 > 10,85)	valeur-p 0,322	-
Air conditionné (n = 8)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,79 > -1,96)	valeur-p 0,429	non rejetée : RP/HPP (26,30 > 11,39 > 7,96)	valeur-p 0,215	-
Structure (n = 24)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,40 > -1,96)	valeur-p 0,160	non rejetée : RP/HPP (65,17 > 55,33 > 33,10)	valeur-p 0,782	-
Transmission (n = 11)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,11 > -1,96)	valeur-p 0,914	non rejetée : RP/HPP (33,92 > 14,63 > 12,34)	valeur-p 0,123	-
Pneus (n = 16)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,003 > -1,96)	valeur-p 0,998	non rejetée : RP/HPP (46,19 > 27,43 > 20,07)	valeur-p 0,303	-

Tableau 5.17: Calcul numérique du test de tendance [BO1114]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification				
	Laplace		MIL-HDBK-189		Cramér-von Mises
Flèche (n = 52)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,22 > -1,96)	valeur-p 0,222	rejetée : NHPP (76,11 < 81,47)	valeur-p 0,018	non rejetée : NHPP (0,218 > 0,079)
Avance de foration (n = 35)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,35 > -1,96)	valeur-p 0,728	non rejetée : RP/HPP (90,53 > 69,17 > 51,74)	valeur-p 0,494	-
Avance de boulon (n = 90)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,14 > -1,96)	valeur-p 0,886	non rejetée : RP/HPP (212,30 > 175,96 > 149,97)	valeur-p 0,429	-
Foreuse (n = 31)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,04 > -1,96)	valeur-p 0,971	non rejetée : RP/HPP (81,38 > 50,56 > 44,89)	valeur-p 0,150	-
Boulonneuse (n = 9)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,48 > -1,96)	valeur-p 0,142	non rejetée : RP/HPP (28,87 > 20,54 > 9,39)	valeur-p 0,697	-
Hydraulique (n = 52)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,13 > -1,96)	valeur-p 0,257	non rejetée : RP/HPP (128,80 > 96,06 > 81,47)	valeur-p 0,302	-
Électrique/électronique (n = 53)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,82 > -1,96)	valeur-p 0,410	non rejetée : RP/HPP (131,03 > 118,52 > 83,24)	valeur-p 0,809	-
Swelllex® (n = 8)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,82 > -1,96)	valeur-p 0,412	non rejetée : RP/HPP (26,30 > 11,98 > 7,96)	valeur-p 0,254	-
Eau/air (n = 26)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,92 > -1,96)	valeur-p 0,356	non rejetée : RP/HPP (69,83 > 58,60 > 36,44)	valeur-p 0,754	-
Air conditionné (n = 3)	-	-	-	-	-
Structure (n = 26)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,80 > -1,96)	valeur-p 0,423	non rejetée : RP/HPP (69,83 > 37,34 > 36,44)	valeur-p 0,063	-
Transmission (n = 13)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,46 > -1,96)	valeur-p 0,144	rejetée : NHPP (14,87 < 15,38)	valeur-p 0,040	non rejetée : NHPP (0,214 > 0,066)
Pneus (n = 11)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,71 > -1,96)	valeur-p 0,476	rejetée : NHPP (10,63 < 12,34)	valeur-p 0,020	rejetée : RP/HPP (0,212 < 0,269)

Tableau 5.18: Calcul numérique du test de tendance [BO1115]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification				
	Laplace		MIL-HDBK-189		Cramér-von Mises
Flèche (n = 34)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,27 > -1,96)	valeur-p 0,204	non rejetée : RP/HPP (88,25 > 66,69 > 50,02)	valeur-p 0,478	-
Avance de foration (n = 30)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,07 > -1,96)	valeur-p 0,945	non rejetée : RP/HPP (79,08 > 49,89 > 43,19)	valeur-p 0,179	-
Avance de boulon (n = 63)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,54 > -1,96)	valeur-p 0,587	non rejetée : RP/HPP (153,20 > 121,65 > 101,07)	valeur-p 0,407	-
Foreuse (n = 26)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,15 > -1,96)	valeur-p 0,250	non rejetée : RP/HPP (69,83 > 55,15 > 36,44)	valeur-p 0,644	-
Boulonneuse (n = 5)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,82 > -1,96)	valeur-p 0,411	non rejetée : RP/HPP (18,31 > 6,72 > 3,94)	valeur-p 0,249	-
Hydraulique (n = 24)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,80 > -1,96)	valeur-p 0,421	non rejetée : RP/HPP (65,17 > 46,15 > 33,10)	valeur-p 0,451	-
Électrique/électronique (n = 47)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,83 > -1,96)	valeur-p 0,404	non rejetée : RP/HPP (117,63 > 93,90 > 72,64)	valeur-p 0,516	-
Swelllex® (n = 17)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,45 > -1,96)	valeur-p 0,147	non rejetée : RP/HPP (48,60 > 35,50 > 21,66)	valeur-p 0,603	-
Eau/air (n = 14)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,47 > -1,96)	valeur-p 0,142	non rejetée : RP/HPP v (41,34 > 29,53 > 16,93)	valeur-p 0,614	-
Air conditionné (n = 5)	rejetée : NHPP (-2,97 < -1,96)	valeur-p 0,003	non rejetée : RP/HPP (18,31 > 15,54 > 3,94)	valeur-p 0,886	rejetée : RP/HPP (0,191 < 0,586)
Structure (n = 18)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,34 > -1,96)	valeur-p 0,732	non rejetée : RP/HPP (51,00 > 25,33 > 23,27)	valeur-p 0,092	- -
Transmission (n = 5)	rejetée : NHPP (-2,82 < -1,96)	valeur-p 0,005	non rejetée : RP/HPP (18,31 > 16,13 > 3,94)	valeur-p 0,904	rejetée : RP/HPP (0,191 < 0,399)
Pneus (n = 11)	rejetée : NHPP (-2,22 < -1,96)	valeur-p 0,026	rejetée : NHPP (41,44 > 38,89)	valeur-p 0,028	non rejetée : NHPP (0,214 > 0,099)

Tableau 5.19: Calcul numérique du test de dépendance [BO1111]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification		
	r_1	valeur-p	Pearson
Flèche (n = 36)	0,05	0,794	non rejetée : RP/HPP (0,26 < 2,03)
Avance de foration (n = 32)	-0,05	0,788	non rejetée : RP/HPP (0,27 < 2,04)
Avance de boulon (n = 65)	-0,11	0,399	non rejetée : RP/HPP (0,84 < 1,99)
Foreuse (n = 23)	0,456	0,088	non rejetée : RP/HPP (1,85 < 2,16)
Boulonneuse (n = 15)	0,01	0,981	non rejetée : RP/HPP (0,02 < 2,08)
Hydraulique (n = 58)	0,08	0,554	non rejetée : RP/HPP (0,60 < 2,00)
Électrique/électronique (n = 57)	-0,10	0,473	non rejetée : RP/HPP (0,72 < 2,00)
Swellex® (n = 8)	-0,15	0,721	non rejetée : RP/HPP (0,37 < 2,44)
Eau/air (n = 15)	0,14	0,630	non rejetée : RP/HPP (0,49 < 2,16)
Air conditionné (n = 10)	-0,11	0,760	non rejetée : RP/HPP (0,32 < 2,31)
Structure (n = 17)	-0,04	0,881	non rejetée : RP/HPP (0,15 < 2,13)
Transmission (n = 6)	-	-	-
Pneus (n = 7)	0,03	0,952	non rejetée : RP/HPP (0,06 < 2,57)

Tableau 5.20: Calcul numérique du test de dépendance [BO1112]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification		
	r_1	valeur-p	Pearson
Flèche (n = 37)	-0,05	0,781	non rejetée : RP/HPP (0,28 < 2,03)
Avance de foration (n = 28)	-	-	-
Avance de boulon (n = 72)	-0,08	0,491	non rejetée : RP/HPP (0,69 < 1,99)
Foreuse (n = 27)	-0,22	0,603	non rejetée : RP/HPP (0,54 < 2,44)
Boulonneuse (n = 8)	0,20	0,326	non rejetée : RP/HPP (1,00 < 2,06)
Hydraulique (n = 54)	-0,03	0,856	non rejetée : RP/HPP (0,18 < 2,00)
Électrique/électronique (n = 63)	0,05	0,695	non rejetée : RP/HPP (0,39 < 2,00)
Swellex® (n = 6)	0,80	0,057	non rejetée : RP/HPP (2,64 < 2,78)
Eau/air (n = 22)	-	-	-
Air conditionné (n = 5)	-0,28	0,645	non rejetée : RP/HPP (0,51 < 3,18)
Structure (n = 34)	-0,04	0,801	non rejetée : RP/HPP (0,25 < 2,04)
Transmission (n = 13)	-0,03	0,910	non rejetée : RP/HPP (0,12 < 2,20)
Pneus (n = 9)	-0,27	0,484	non rejetée : RP/HPP (0,74 < 2,36)

Tableau 5.21: Calcul numérique du test de dépendance [BO1113]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification		
	r_1	valeur-p	Pearson
Flèche (n = 34)	0,10	0,587	non rejetée : RP/HPP (0,55 < 2,04)
Avance de foration (n = 18)	-0,25	0,327	non rejetée : RP/HPP (1,01 < 2,12)
Avance de boulon (n = 58)	-	-	-
Foreuse (n = 28)	-0,19	0,575	non rejetée : RP/HPP (0,58 < 2,26)
Boulonneuse (n = 11)	0,08	0,691	non rejetée : RP/HPP (0,40 < 2,06)
Hydraulique (n = 46)	-0,11	0,484	non rejetée : RP/HPP (0,71 < 2,02)
Électrique/électronique (n = 53)	0,01	0,922	non rejetée : RP/HPP (0,10 < 2,00)
Swellex® (n = 16)	0,16	0,547	non rejetée : RP/HPP (0,62 < 2,14)
Eau/air (n = 10)	-0,07	0,839	non rejetée : RP/HPP (0,21 < 2,30)
Air conditionné (n = 8)	-0,36	0,378	non rejetée : RP/HPP (0,95 < 2,45)
Structure (n = 24)	0,26	0,211	non rejetée : RP/HPP (1,29 < 2,04)
Transmission (n = 11)	-0,02	0,963	non rejetée : RP/HPP (0,05 < 2,26)
Pneus (n = 16)	0,21	0,430	non rejetée : RP/HPP (0,81 < 2,14)

Tableau 5.22: Calcul numérique du test de dépendance [BO1114]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification		
	r_1	valeur-p	Pearson
Flèche (n = 52)	-	-	-
Avance de foration (n = 35)	-0,09	0,611	non rejetée : RP/HPP (0,51 < 2,03)
Avance de boulon (n = 90)	-0,02	0,829	non rejetée : RP/HPP (0,22 < 1,99)
Foreuse (n = 31)	-0,35	0,354	non rejetée : RP/HPP (0,99 < 2,36)
Boulonneuse (n = 9)	-0,02	0,895	non rejetée : RP/HPP (0,13 < 2,05)
Hydraulique (n = 52)	0,07	0,644	non rejetée : RP/HPP (0,46 < 2,01)
Électrique/électronique (n = 53)	0,11	0,439	non rejetée : RP/HPP (0,78 < 2,01)
Swellex® (n = 8)	-0,21	0,603	non rejetée : RP/HPP (0,52 < 2,45)
Eau/air (n = 26)	-0,20	0,333	non rejetée : RP/HPP (0,99 < 2,06)
Air conditionné (n = 3)	-	-	-
Structure (n = 26)	-0,15	0,451	non rejetée : RP/HPP (0,77 < 2,06)
Transmission (n = 13)	-	-	-
Pneus (n = 11)	-0,40	0,223	non rejetée : RP/HPP (1,31 < 2,26)

Tableau 5.23: Calcul numérique du test de dépendance [BO1115]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification		
	r_1	valeur-p	Pearson
Flèche (n = 34)	-0,15	0,406	non rejetée : RP/HPP (0,84 < 2,04)
Avance de foration (n = 30)	-0,25	0,185	non rejetée : RP/HPP (1,36 < 2,05)
Avance de boulon (n = 63)	-0,22	0,088	non rejetée : RP/HPP (1,37 < 1,99)
Foreuse (n = 26)	0,11	0,859	non rejetée : RP/HPP (0,19 < 3,18)
Boulonneuse (n = 5)	0,02	0,908	non rejetée : RP/HPP (0,12 < 2,06)
Hydraulique (n = 24)	-0,11	0,603	non rejetée : RP/HPP (0,53 < 2,07)
Électrique/électronique (n = 47)	0,22	0,142	non rejetée : RP/HPP (1,49 < 2,01)
Swellex® (n = 17)	-0,19	0,473	non rejetée : RP/HPP (0,74 < 2,13)
Eau/air (n = 14)	0,09	0,757	non rejetée : RP/HPP (0,31 < 2,18)
Air conditionné (n = 5)	-0,11	0,865	non rejetée : RP/HPP (0,18 < 3,18)
Structure (n = 18)	-0,13	0,611	non rejetée : RP/HPP (0,52 < 2,12)
Transmission (n = 5)	0,19	0,761	non rejetée : RP/HPP (0,33 < 3,18)
Pneus (n = 11)	-	-	-

Tableau 5.24: Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO1111]

Sous-système	Modélisation		
	Loi	Paramètre	MTBF (h)
Flèche (n = 36)	Weibull	$\alpha = 39,69$ $\beta = 0,94$	41
Avance de foration (n = 32)	Weibull	$\alpha = 45,47$ $\beta = 0,99$	46
Avance de boulon (n = 65)	Weibull	$\alpha = 25,61$ $\beta = 1,43$	23
Foreuse (n = 23)	log-normale	$\mu = 3,28$ $\sigma = 1,43$	75
Boulonneuse (n = 15)	log-normale	$\mu = 4,06$ $\sigma = 1,15$	112
Hydraulique (n = 58)	Weibull	$\alpha = 30,18$ $\beta = 1,02$	30
Électrique/électronique (n = 57)	log-normale	$\mu = 2,73$ $\sigma = 1,16$	30
Swelllex® (n = 8)	log-normale	$\mu = 3,71$ $\sigma = 1,42$	111
Eau/air (n = 15)	log-normale	$\mu = 4,40$ $\sigma = 0,51$	93
Air conditionné (n = 10)	log-normale	$\mu = 4,08$ $\sigma = 1,25$	129
Structure (n = 17)	exponentielle	$\lambda = 0,012$	86
Transmission (n = 6)	non i.i.d. loi de puissance (NHPP)	$\alpha = 2,60 \times 10^{-9}$ $\beta = 2,97$	88
Pneus (n = 7)	log-normale	$\mu = 5,07$ $\sigma = 1,41$	430

Tableau 5.25: Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO1112]

Sous-système	Modélisation		
	Loi	Paramètre	MTBF (h)
Flèche (n = 37)	Weibull	$\alpha = 38,15$ $\beta = 1,01$	38
Avance de foration (n = 28)	non i.i.d. loi de puissance (NHPP)	$\alpha = 4,45 \times 10^{-4}$ $\beta = 1,54$	30
Avance de boulon (n = 72)	log-normale	$\mu = 2,57$ $\sigma = 0,95$	21
Foreuse (n = 27)	Weibull	$\alpha = 49,38$ $\beta = 0,86$	53
Boulonneuse (n = 8)	log-normale	$\mu = 4,60$ $\sigma = 1,14$	188
Hydraulique (n = 54)	log-normale	$\mu = 2,76$ $\sigma = 1,03$	27
Électrique/électronique (n = 63)	Weibull	$\alpha = 22,03$ $\beta = 1,29$	20
Swelllex® (n = 6)	log-normale	$\mu = 4,69$ $\sigma = 1,44$	304
Eau/air (n = 22)	non i.i.d. loi de puissance (NHPP)	$\alpha = 5,43 \times 10^{-1}$ $\beta = 0,51$	127
Air conditionné (n = 5)	log-normale	$\mu = 5,26$ $\sigma = 0,98$	312
Structure (n = 34)	exponentielle	$\lambda = 0,025$	40
Transmission (n = 13)	Weibull	$\alpha = 108,27$ $\beta = 0,84$	118
Pneus (n = 9)	log-normale	$\mu = 4,33$ $\sigma = 1,56$	255

Tableau 5.26: Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO1113]

Sous-système	Modélisation		
	Loi	Paramètre	MTBF (h)
Flèche (n = 34)	Weibull	$\alpha = 47,51$ $\beta = 0,97$	48
Avance de foration (n = 18)	Weibull	$\alpha = 81,74$ $\beta = 1,01$	81
Avance de boulon (n = 58)	non i.i.d. loi de puissance (NHPP)	$\alpha = 1,49 \times 10^{-1}$ $\beta = 0,82$	31
Foreuse (n = 28)	Weibull	$\alpha = 51,04$ $\beta = 0,73$	62
Boulonneuse (n = 11)	normale	$\mu = 123,40$ $\sigma = 86,07$	123
Hydraulique (n = 46)	Weibull	$\alpha = 36,06$ $\beta = 0,96$	36
Électrique/électronique (n = 53)	Weibull	$\alpha = 30,15$ $\beta = 1,23$	28
Swelllex® (n = 16)	Weibull	$\alpha = 82,23$ $\beta = 0,98$	83
Eau/air (n = 10)	Weibull	$\alpha = 126,61$ $\beta = 1,45$	113
Air conditionné (n = 8)	normale	$\mu = 132,00$ $\sigma = 98,35$	132
Structure (n = 24)	Weibull	$\alpha = 67,19$ $\beta = 1,32$	62
Transmission (n = 11)	log-normale	$\mu = 4,72$ $\sigma = 0,71$	138
Pneus (n = 16)	Weibull	$\alpha = 94,06$ $\beta = 0,87$	101

Tableau 5.27: Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO1114]

Sous-système	Modélisation		
	Loi	Paramètre	MTBF (h)
Flèche (n = 52)	non i.i.d.	$\alpha = 3,50 \times 10^{-3}$	22
	loi de puissance (NHPP)	$\beta = 1,32$	
Avance de foration (n = 35)	log-normale	$\mu = 3,42$	44
		$\sigma = 0,84$	
Avance de boulon (n = 90)	Weibull	$\alpha = 18,10$	17
		$\beta = 1,27$	
Foreuse (n = 31)	log-normale	$\mu = 3,50$	49
		$\sigma = 0,88$	
Boulonneuse (n = 9)	log-normale	$\mu = 4,55$	149
		$\sigma = 0,95$	
Hydraulique (n = 52)	log-normale	$\mu = 2,86$	31
		$\sigma = 1,06$	
Électrique/électronique (n = 53)	log-normale	$\mu = 2,85$	29
		$\sigma = 1,01$	
Swelllex® (n = 8)	Weibull	$\alpha = 180,95$	161
		$\beta = 2,94$	
Eau/air (n = 26)	normale	$\mu = 58,57$	59
		$\sigma = 45,27$	
Air conditionné (n = 3)	approche bayésienne	$\lambda = 0,003$	315
Structure (n = 26)	log-normale	$\mu = 3,47$	73
		$\sigma = 1,27$	
Transmission (n = 13)	non i.i.d.	$\alpha = 2,74 \times 10^{-4}$	78
	loi de puissance (NHPP)	$\beta = 1,48$	
Pneus (n = 11)	Weibull	$\alpha = 161,27$	183
		$\beta = 0,80$	

Tableau 5.28: Loi, estimation des paramètres et MTBF [BO1115]

Sous-système	Modélisation		
	Loi	Paramètre	MTBF (h)
Flèche (n = 34)	Weibull	$\alpha = 42,60$ $\beta = 1,07$	42
Avance de foration (n = 30)	log-normale	$\mu = 3,39$ $\sigma = 0,95$	46
Avance de boulon (n = 63)	log-normale	$\mu = 2,58$ $\sigma = 0,97$	21
Foreuse (n = 26)	log-normale	$\mu = 3,31$ $\sigma = 1,15$	53
Boulonneuse (n = 5)	log-normale	$\mu = 5,39$ $\sigma = 0,23$	226
Hydraulique (n = 24)	Weibull	$\alpha = 54,84$ $\beta = 1,28$	51
Électrique/électronique (n = 47)	Weibull	$\alpha = 31,78$ $\beta = 1,24$	30
Swellex® (n = 17)	Weibull	$\alpha = 77,70$ $\beta = 1,20$	73
Eau/air (n = 14)	normale	$\mu = 81,23$ $\sigma = 69,68$	81
Air conditionné (n = 5)	Weibull	$\alpha = 38,36$ $\beta = 0,42$	114
Structure (n = 18)	Weibull	$\alpha = 82,31$ $\beta = 1,65$	74
Transmission (n = 5)	normale	$\mu = 92,00$ $\sigma = 80,66$	92
Pneus (n = 11)	non i.i.d. loi de puissance (NHPP)	$\alpha = 2,79 \times 10^{-1}$ $\beta = 0,53$	187

En examinant les résultats de la modélisation probabiliste, il est remarqué que, hormis quelques exceptions, les distributions log-normale (7 sous-systèmes pour la boulonneuse à plateforme BO1111, 6 sous-systèmes pour la boulonneuse à plateforme BO1112, 1 sous-système pour la boulonneuse à plateforme BO1113, 6 sous-systèmes pour la boulonneuse à plateforme BO1114 et 4 sous-systèmes pour la boulonneuse à plateforme BO1115) et de Weibull (4 sous-systèmes pour la boulonneuse à plateforme BO1111, 4 sous-systèmes pour la boulonneuse à plateforme BO1112, 9 sous-systèmes pour la boulonneuse à plateforme BO1113, 3 sous-systèmes pour la boulonneuse à plateforme BO1114 et 6 sous-systèmes pour la boulonneuse à plateforme BO1115) s'adaptent le mieux entre les données théoriques et les données empiriques. D'ailleurs, la distribution de Weibull est la loi majoritaire qui représente les données de défaillance de la flèche dans l'ensemble de la flotte. Même constat pour le sous-système de la boulonneuse (composant), où la distribution log-normale offre souvent le meilleur ajustement. À partir de l'observation du paramètre de forme β de la distribution de Weibull, des bilans peuvent être émis sur l'état des sous-systèmes. En premier lieu, il est approprié de vérifier les sous-systèmes dont le taux de défaillance décroît par une valeur inférieure à 1 pour le paramètre β . Cela comprend la foreuse ($\beta = 0,86$) et la transmission ($\beta = 0,84$) de la boulonneuse à plateforme BO1112; la foreuse ($\beta = 0,73$) et les pneus ($\beta = 0,87$) de la boulonneuse à plateforme BO1113; les pneus ($\beta = 0,80$) de la boulonneuse à plateforme BO1114; et le système d'air conditionné ($\beta = 0,42$) de la boulonneuse à plateforme BO1115. Ensuite, si le paramètre β est égal ou proche de 1, alors la distribution de probabilité a une allure exponentielle ou fortement similaire. C'est le cas pour la flèche ($\beta = 0,94$), l'avance de foration ($\beta = 0,99$) et le système hydraulique ($\beta = 1,01$) de la boulonneuse à plateforme BO1111; la flèche ($\beta = 1,01$) de la boulonneuse à plateforme BO1112, la flèche ($\beta = 0,97$), l'avance de foration ($\beta = 1,01$), le système Swellex® ($\beta = 0,98$) de la boulonneuse à plateforme BO1113; et la flèche ($\beta = 1,07$) de la boulonneuse à plateforme BO1115. Le contexte d'un paramètre de forme β compris entre 1 et 3, représentant la période de maturité et le début de la période de vieillesse du système, est observable pour l'avance de boulon ($\beta = 1,43$) de la boulonneuse à plateforme BO1111; le système électrique/électronique ($\beta = 1,29$) de la boulonneuse à plateforme BO1112; le système eau/air ($\beta = 1,45$), le système électrique/électronique ($\beta = 1,23$), la structure ($\beta = 1,32$) de la boulonneuse à plateforme BO1113; l'avance de boulon ($\beta = 1,27$) de la boulonneuse à plateforme BO1114; et le système hydraulique ($\beta = 1,28$), le système électrique/électronique ($\beta = 1,24$), le système Swellex® ($\beta = 1,20$) et la structure ($\beta = 1,65$) de la boulonneuse à plateforme BO1115. Le paramètre de forme du système Swellex® ($\beta = 2,64$) pour l'équipement BO1114 est élevé, ce qui indique une augmentation accrue du taux de défaillance. Une attention particulière devrait être accordée à ce système pour cet équipement.

Dans le contexte d'une association de la loi de Weibull avec le sous-système électrique/électronique, il est pertinent de vérifier la valeur du paramètre de forme. En tant que sous-système non mécanique, ce dernier ne devrait pas avoir une valeur β élevée, soit une valeur proche de la valeur unitaire. Ce fait est vérifiable pour les équipements BO1112 ($\beta = 1,29$), BO1113 ($\beta = 1,23$) et BO1115 ($\beta = 1,24$). Les composants électriques et électroniques ont des fonctions de risque d'usure qui n'augmentent pas de manière monotone, ce qui explique en partie l'applicabilité de la distribution log-normale pour ce sous-système dans les boulonneuses à plateforme BO1111 et BO1115. Le paramètre de forme β s'observe aussi pour les sous-systèmes caractérisés par un processus de Poisson non homogène. Les sous-systèmes dont les maintenances améliorent l'intégrité sont le système eau/air ($\beta = 0,51$) de la boulonneuse à plateforme BO1112; l'avance de boulon ($\beta = 0,82$) de la boulonneuse à plateforme BO1113; et les pneus ($\beta = 0,53$) de la boulonneuse à plateforme BO1115. Dans la situation contraire, les sous-systèmes suivants affichent une diminution de leur intégrité : la transmission ($\beta = 2,97$) de la boulonneuse à plateforme BO1111; l'avance de foration ($\beta = 1,54$) de la boulonneuse à plateforme BO1112; la flèche ($\beta = 1,32$) et la transmission ($\beta = 1,48$) de la boulonneuse à plateforme BO1114. Dans le cas de la transmission de l'équipement BO1111 où la valeur du paramètre de forme est élevée, ce constat est dû à une augmentation accrue des défaillances vers la fin de la période d'observation.

Pour continuer, l'analyse de la moyenne de temps de bon fonctionnement (MTBF) des boulonneuses à plateforme est abordée. La MTBF de l'avance de boulon pour les cinq équipements est similaire (respectivement de, 23 pour la boulonneuse à plateforme BO1111, 21 pour la boulonneuse à plateforme BO1112, 31 pour la boulonneuse à plateforme BO1113, 17 pour la boulonneuse à plateforme BO1114 et 21 pour la boulonneuse à plateforme BO1115). Même constat pour l'avance de foration (46, 30, 44 et 46, sauf pour la BO1113 avec une MTBF de 81), de la flèche (41, 38, 48 et 42, sauf pour la BO1114 avec une MTBF de 22), le système hydraulique (30, 27, 36 et 31, sauf pour la BO1115 avec une MTBF de 51) et le système électrique/électronique (30, 28, 29 et 30, sauf pour la BO1112 avec une MTBF de 20). La MTBF de la boulonneuse (composant) est comparable pour trois équipements (112 pour la BO1111, 123 pour la BO1113 et 129 pour la BO1114), mais diffère pour deux équipements (188 pour la BO1112 et 226 pour la BO1115). Cette observation est identique en ce qui concerne le système d'air conditionné (129, 132 et 114, pour la BO1112 avec une MTBF de 312 et pour la BO1114 avec une MTBF de 315), la foreuse (composant) (52, 49 et 52, sauf pour la BO1111 avec une MTBF de 75 et pour la BO1112 avec une MTBF de 36) et la transmission (88, 76 et 92, sauf pour la BO1112 avec une MTBF de 118 et pour la BO1113 avec une MTBF de 138).

Deux équipements ont une MTBF presque équivalente pour la structure (73 pour la BO1114 et 74 pour la BO1115) et trois équipements ont une MTBF qui diverge (86 pour la BO1111, 40 pour la BO1112 et 62 pour la BO1113). Il en est de même pour les pneus avec deux MTBF presque identiques (183 pour la BO1114 et 187 pour la BO1115) et avec trois autres équipements qui diffèrent (412 pour la BO1111, 255 pour la BO1112 et 101 pour la BO1113). Dans le cas du système Swellex® et du système d'eau/air de l'ensemble de la flotte, les valeurs des MTBF sont très variables entre les équipements et il est difficile de faire ressortir des similitudes entre les données recueillies. Il est approprié de vérifier les écarts de la MTBF présents dans quelques sous-systèmes par rapport aux autres boulonneuses à plateforme. Trois sous-systèmes attirent l'attention en raison leur moyenne de survie élevée : le système d'air conditionné et le système Swellex® de la boulonneuse à plateforme BO1112, la boulonneuse (composant) de la boulonneuse à plateforme BO1115 et les pneus des boulonneuses à plateforme BO1111 et BO1112. Certains équipements, tels que la boulonneuse à plateforme BO1111 et la boulonneuse à plateforme BO1113, affichent plus de pannes pour le système d'air conditionné. Cependant, les problématiques qui engendrent les pannes spécifiques ne sont pas clairement indiquées dans la description de leurs bons de travail (p. ex. A/C non fonctionnel) et, de ce fait, il est difficile de cibler un problème plus récurrent que l'équipement ayant des défaillances moindres (BO1112). De plus, le nombre de défaillances liés au système d'air conditionné pour la boulonneuse à plateforme BO1115 est identique à la boulonneuse à plateforme BO1112. La différence des MTBF entre les équipements s'explique, en partie, par l'écart de temps entre chaque intervention : les intervalles sont plus espacés pour la boulonneuse à plateforme BO1112 que ceux de la boulonneuse à plateforme BO1115, dont plusieurs problématiques ont été recensées dans un intervalle de temps plus restreint (représenté par une série de maintenances relativement proches l'une des autres). Ensuite, il a été remarqué que dans le système Swellex® de la boulonneuse à plateforme BO1112, les problématiques associées à la pompe à eau se manifestent moins souvent que ses congénères de la même flotte. Pour continuer, les différences de la MTBF pour la boulonneuse (composant) et les pneus proviennent de défaillances spécifiques plus récurrentes dans certains équipements, définies de façon respective, par la défectuosité des accumulateurs à pression et des joints d'étanchéité ; et par l'usure des pneus.

Les figures 5.37 à 5.46 montrent en ordre respectif les graphiques de la fiabilité de chaque équipement de la flotte étudiée, où une analyse de ces graphiques est pertinente. En observant le module de forage et de boulonnage, l'avance de boulon est le sous-système dont la fiabilité s'amenuise le plus rapidement dans l'ensemble de la flotte.

L'importance de la détérioration de la fiabilité des autres sous-systèmes se joue entre l'avance de foration, la foreuse (composant) et la flèche. Dans tous les équipements, la boulonneuse (composant) affiche la meilleure fiabilité dans le module. En changeant de module pour celui du chariot, il est possible de remarquer que le système électrique/électronique et le système hydraulique ont une diminution plus rapide de leur fiabilité. Ensuite, d'une part, l'importance de la dégradation des systèmes devient plus complexe à définir, à raison de la variation entre les équipements; d'autre part, tout dépendamment où la fiabilité est examinée dans le temps, l'ordre de dégradation évolue.

La courbe du taux de défaillance, affichée pour chaque machine entre les figures 2.22 et 5.56, est caractéristique de la loi de probabilité qui définit les données échantillonnées des sous-systèmes. La fonction du taux de défaillance associée à la loi normale montre une courbe qui augmente de façon stricte. Pour la fonction du taux de défaillance associée à la loi exponentielle, la courbe affiche une valeur constante, tandis que celle ajustée à la loi log-normale montre une augmentation rapide du taux de défaillance jusqu'à un maximum, puis une diminution de manière progressive. Dans le modèle caractérisé par la loi de Weibull ou la loi de puissance, le paramètre de forme β donne des indices sur l'allure de la courbe du taux de défaillance. Dans les situations caractérisées par la fonction de Weibull avec une valeur de $\beta > 1$, le taux de défaillance décroît au fil de temps. Pour une valeur de $\beta \approx 1$, le taux est à peu près constant, se rapprochant d'une loi exponentielle. Pour une valeur proche de $\beta = 1,5$, la courbe montre une augmentation du taux de défaillance, avec une croissance plus importante au début des temps d'opération. Pour une valeur supérieure de $\beta > 2$, le taux de défaillance augmente de façon rapide et quasi linéaire. Dans les sous-systèmes liés à la loi de puissance, une dégradation du système provoque une augmentation de l'intensité de défaillance ($\beta > 1$) et une amélioration du système diminue l'intensité de défaillance dans le temps ($\beta < 1$).

Un schéma fonctionnel de configuration en série est considéré pour le bon fonctionnement de la boulonneuse à plateforme et le calcul de la fiabilité après 50 heures d'opération pour chaque équipement, ainsi que leurs sous-systèmes, est disponible au tableau 5.29. Les boulonneuses à plateforme BO1112 et BO1114 possèdent une fiabilité totale plus faible que les autres équipements, respectivement de $3,48 \times 10^{-7}$ et de $2,45 \times 10^{-7}$. Quant aux autres équipements de la flotte, la fiabilité est de $1,94 \times 10^{-6}$ pour la boulonneuse à plateforme BO1111, de $3,50 \times 10^{-5}$ pour la boulonneuse à plateforme BO1113 et de $6,80 \times 10^{-6}$ pour la boulonneuse à plateforme BO1115.

En comparant et en validant le nombre de défaillances affiché par les diagrammes de Pareto et les courbes de fiabilité pour l'ensemble de la flotte de boulonneuses à plateforme, il est remarqué que la dégradation de la fiabilité des sous-systèmes est généralement conséquente au nombre recensé de défaillances. Cependant, les résultats des deux analyses diffèrent pour le système d'air conditionné de la boulonneuse à plateforme BO1115 : alors qu'il est classé comme l'un des derniers sous-systèmes en termes du nombre de défaillances par le diagramme de Pareto, la courbe de fiabilité tracée par l'approche fiabiliste s'amenuise plus rapidement en comparaison avec les autres sous-systèmes observés. Ainsi, le diagramme de Pareto donne une vue d'ensemble générale, mais l'utilisation d'une approche plus puissante offre des réponses plus précises de la situation réelle de l'état des sous-systèmes.

Tableau 5.29: Résumé de la fiabilité de la flotte de boulonneuses à plateforme

Sous-système	Estimation fiabilité R(50 h)				
	BO1111	BO1112	BO1113	BO1114	BO1115
Flèche	0,289	0,268	0,350	0,103	0,305
Avance de foration	0,333	0,189	0,544	0,280	0,291
Avance de boulon	0,075	0,079	0,196	0,026	0,085
Foreuse	0,330	0,364	0,373	0,319	0,300
Boulonneuse	0,550	0,725	0,803	0,749	1,000
Hydraulique	0,187	0,131	0,245	0,160	0,411
Électrique/électronique	0,155	0,056	0,155	0,148	0,173
Swellex®	0,442	0,705	0,540	0,977	0,555
Eau/air	0,831	0,675	0,766	0,575	0,673
Air conditionné	0,553	0,915	0,798	0,795	0,327
Structure	0,559	0,286	0,508	0,365	0,645
Transmission	0,567	0,594	0,875	0,524	0,699
Pneus	0,793	0,606	0,562	0,675	0,765
R_{total} (50 h)	$1,94 \times 10^{-6}$	$3,48 \times 10^{-7}$	$3,50 \times 10^{-5}$	$2,45 \times 10^{-7}$	$6,80 \times 10^{-6}$

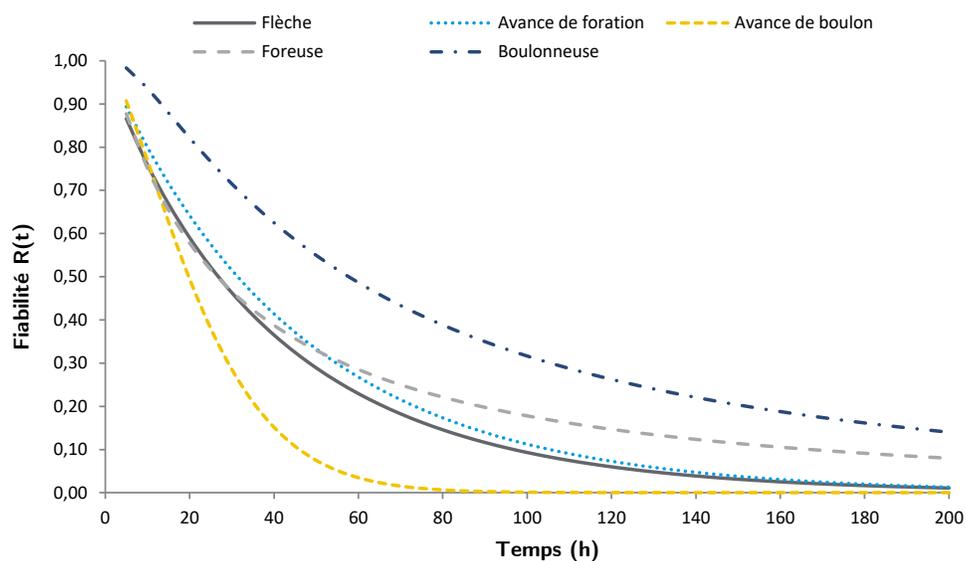


Figure 5.37: Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1111]

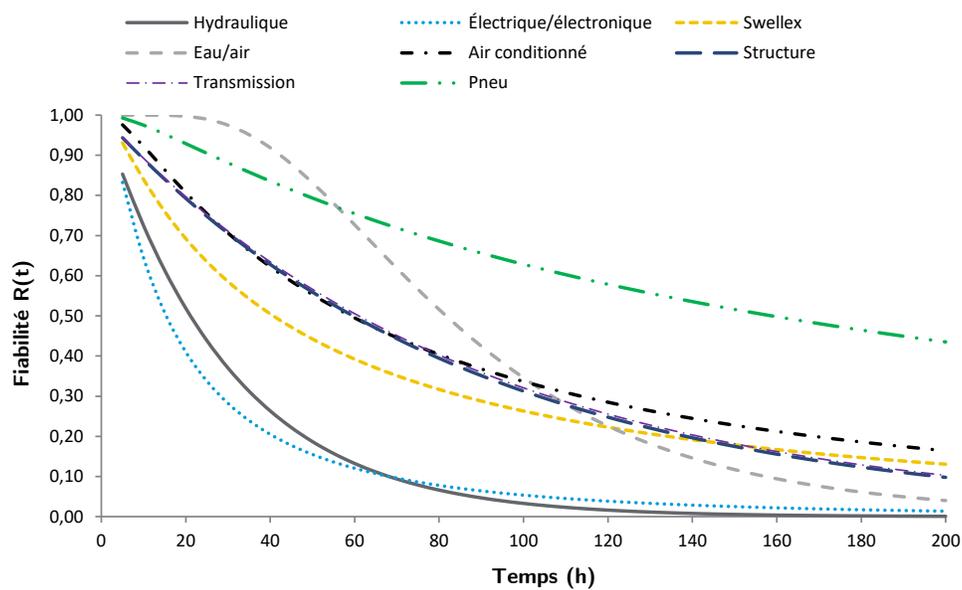


Figure 5.38: Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO1111]

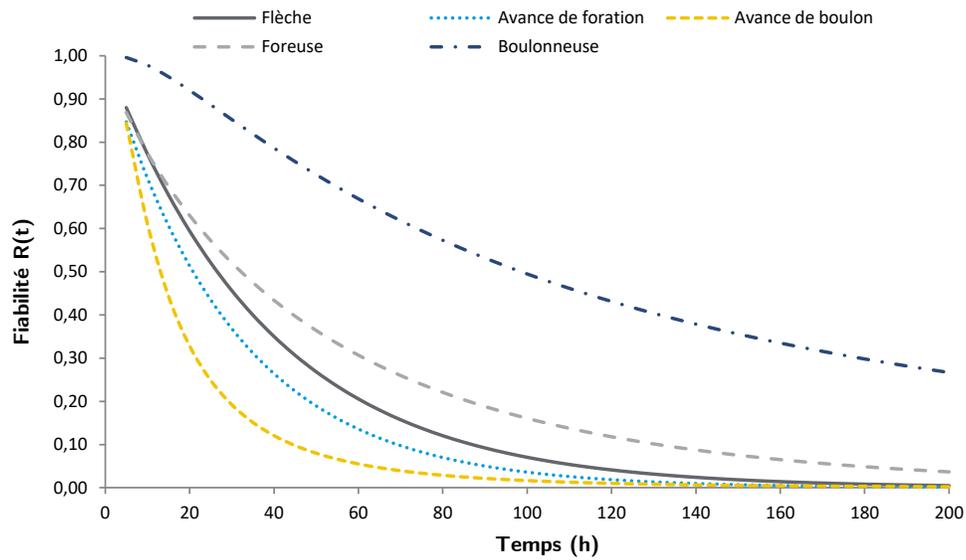


Figure 5.39: Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1112]

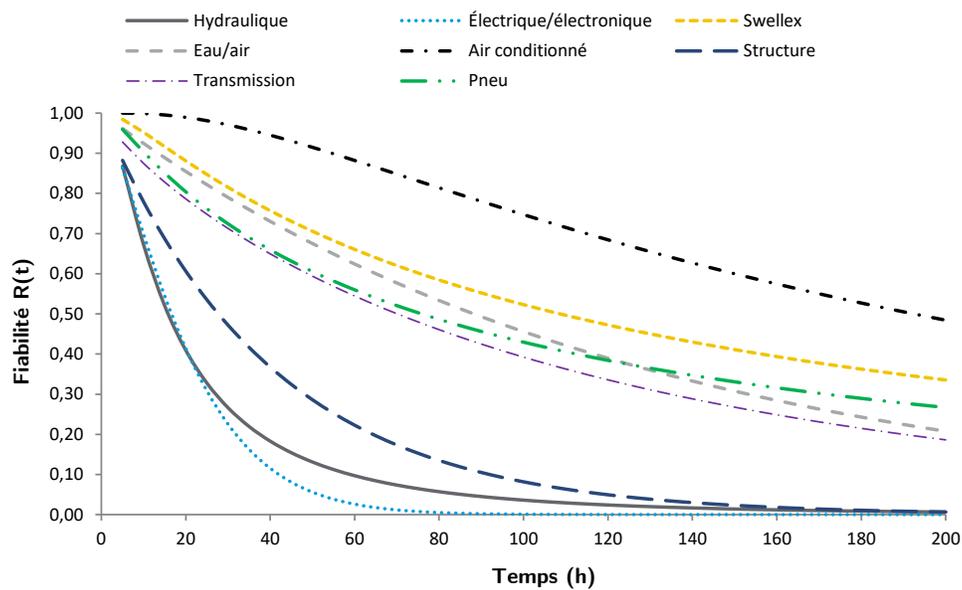


Figure 5.40: Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO1112]

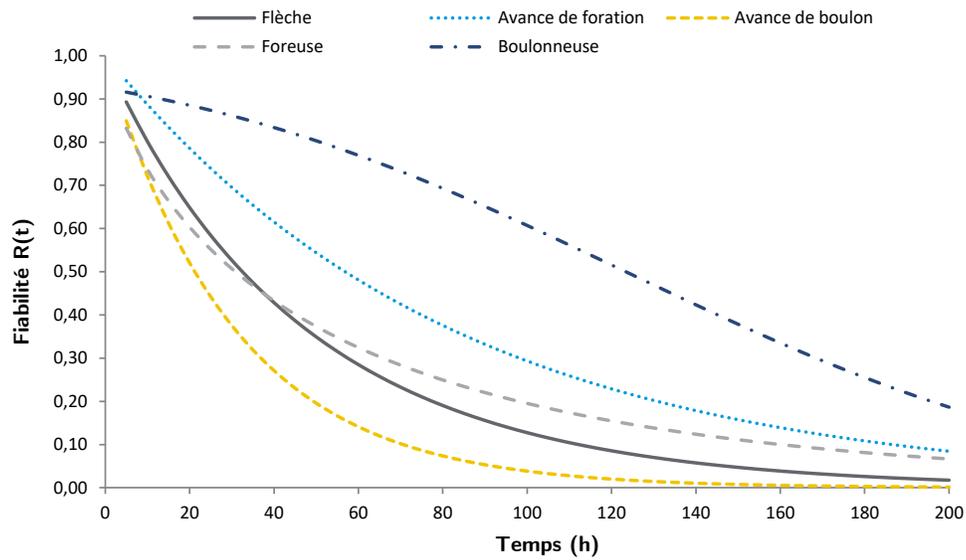


Figure 5.41: Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1113]

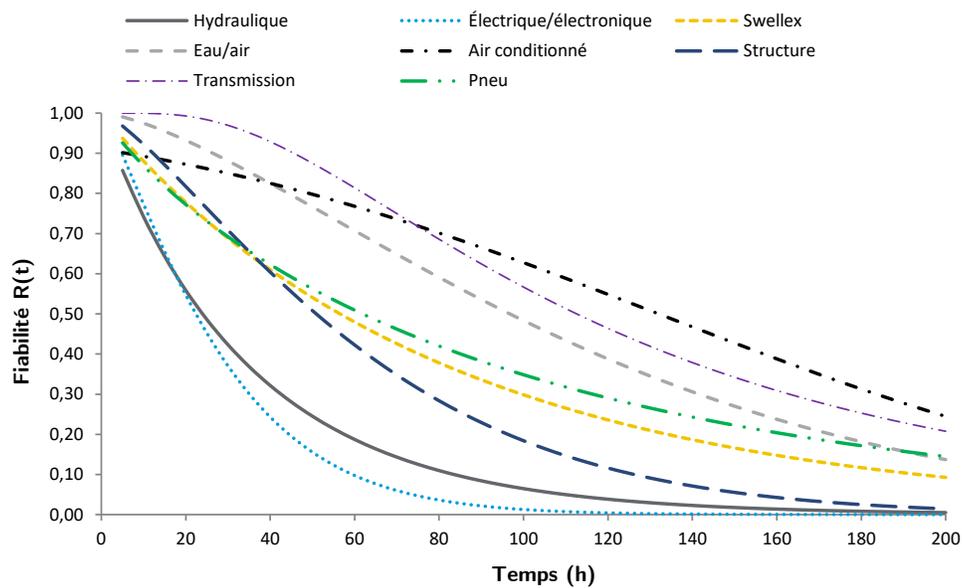


Figure 5.42: Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO1113]

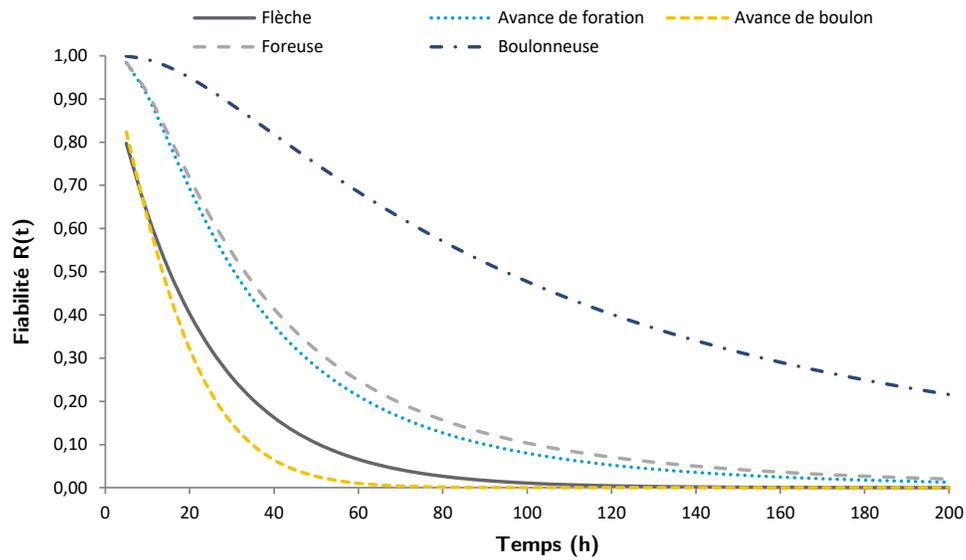


Figure 5.43: Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1114]

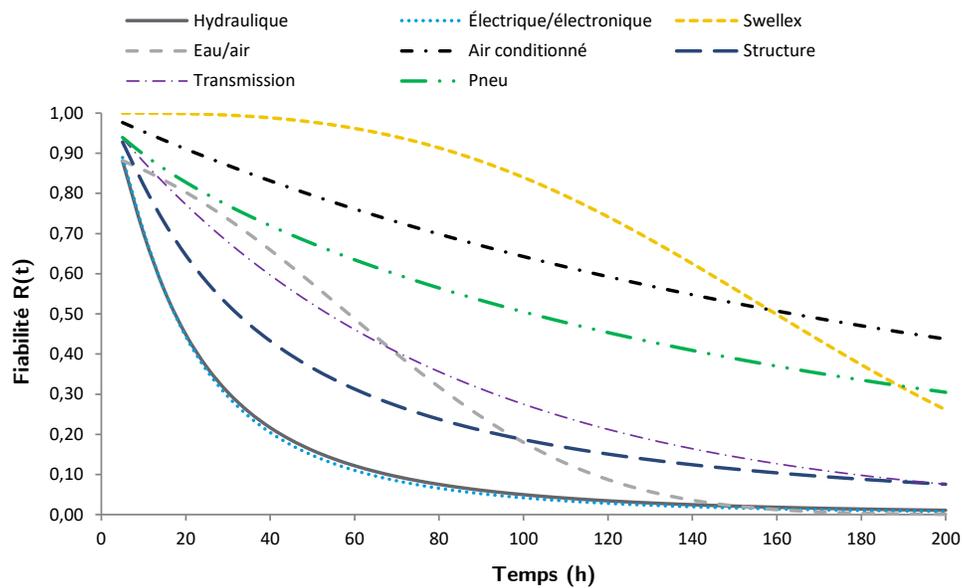


Figure 5.44: Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO1114]

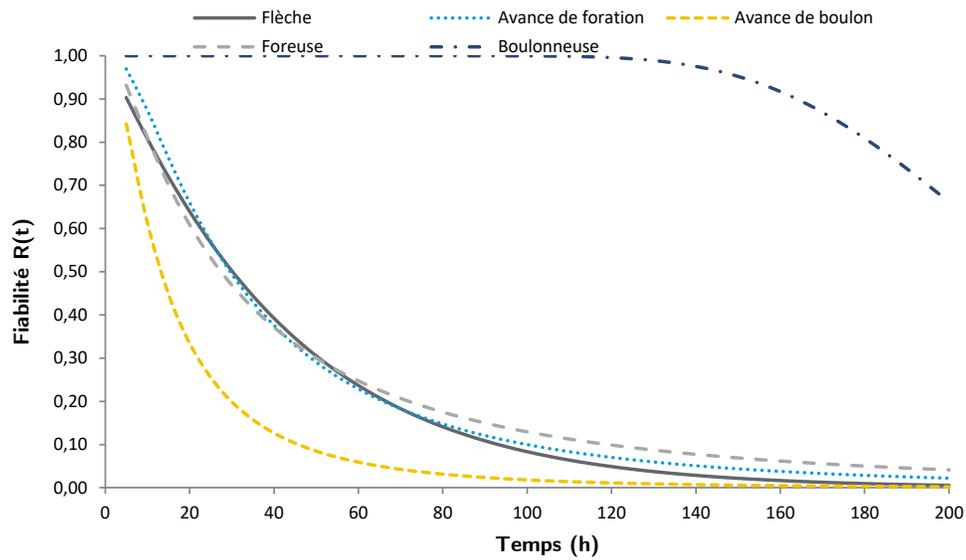


Figure 5.45: Fiabilité des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1115]

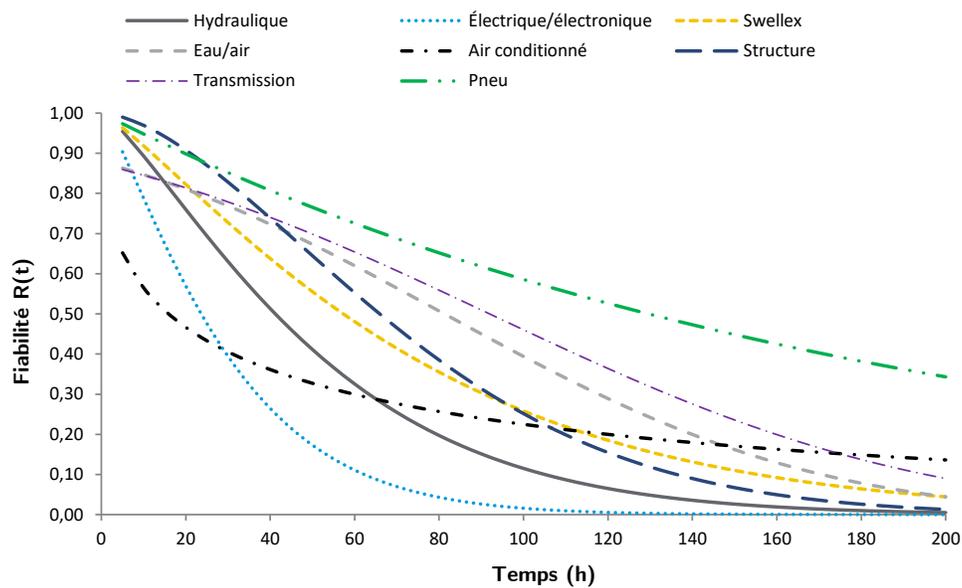


Figure 5.46: Fiabilité des sous-systèmes du chariot [BO1115]

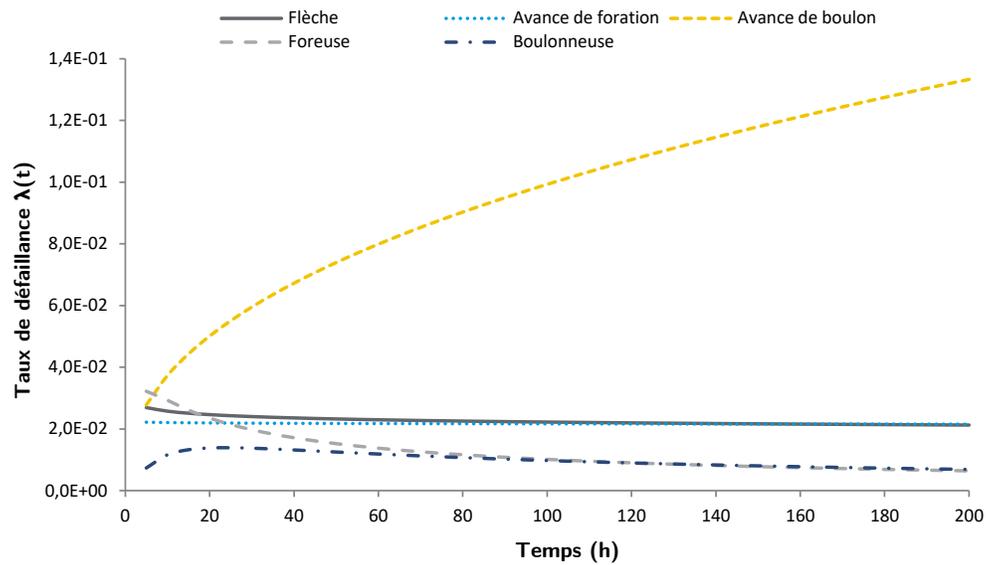


Figure 5.47: Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1111]

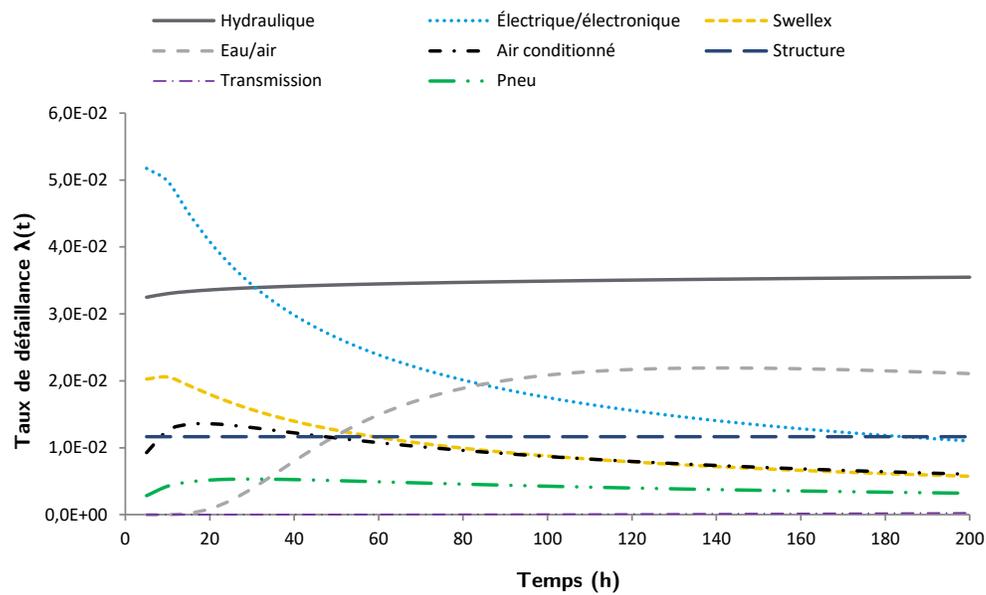


Figure 5.48: Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO1111]

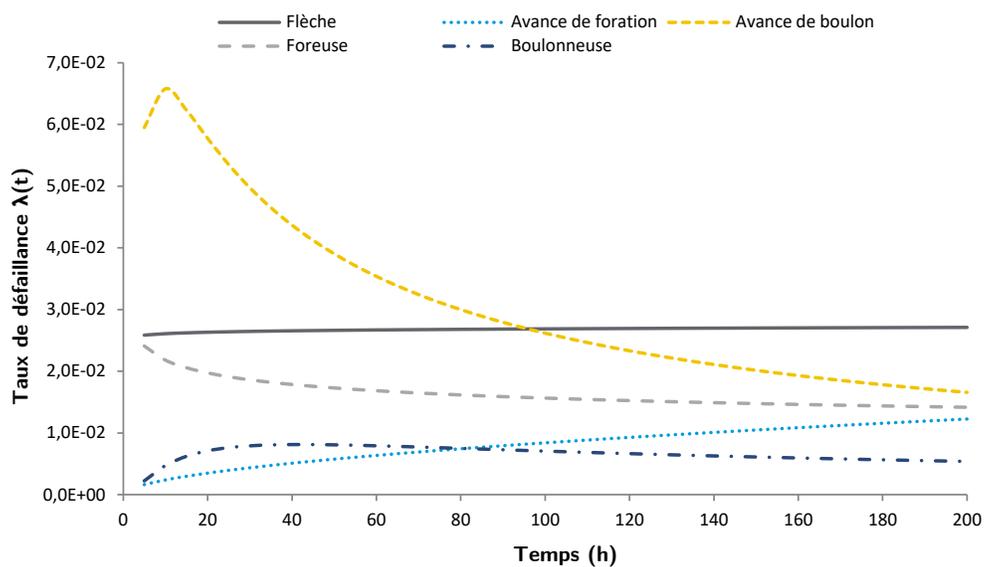


Figure 5.49: Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1112]

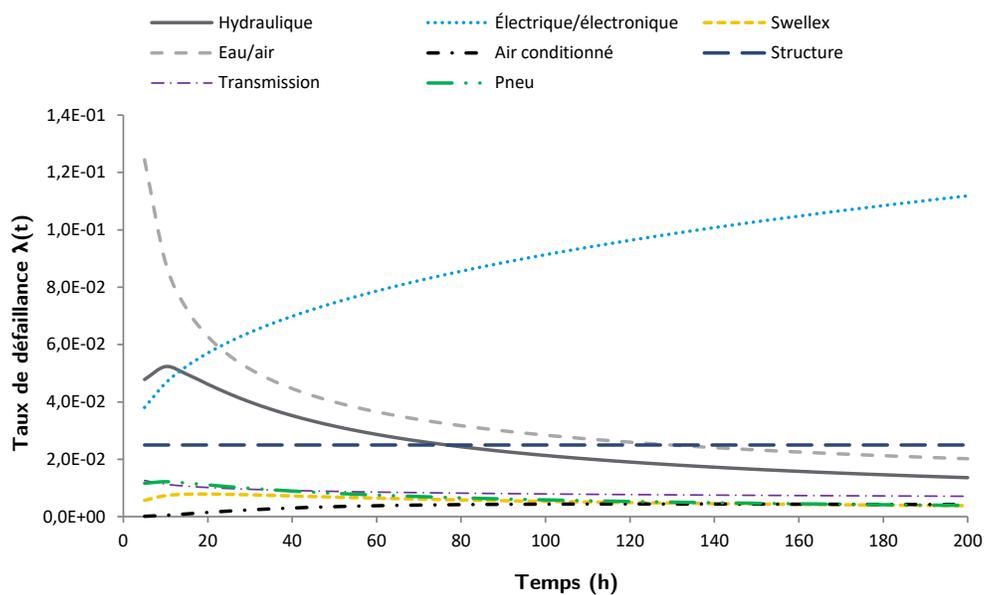


Figure 5.50: Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO1112]

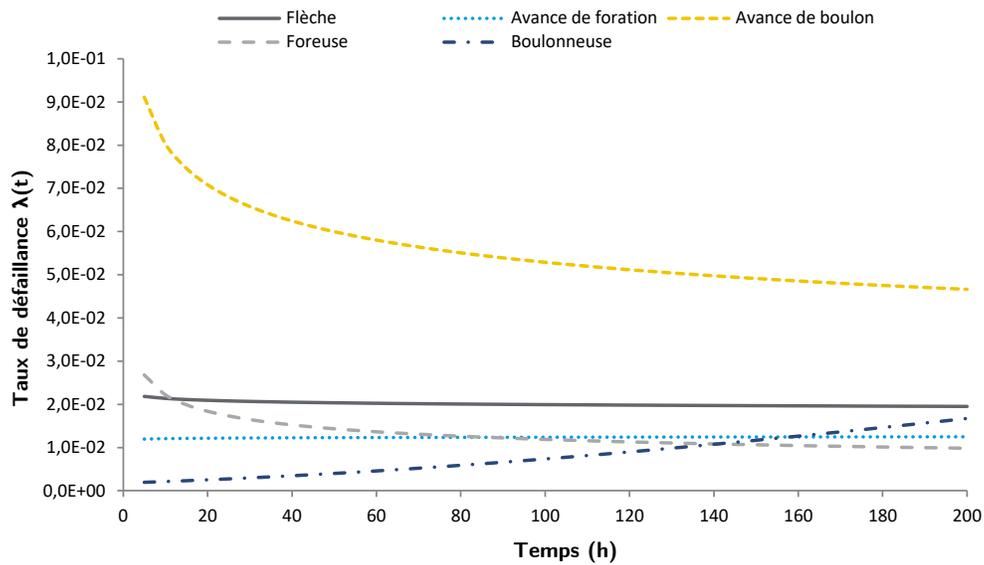


Figure 5.51: Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1113]

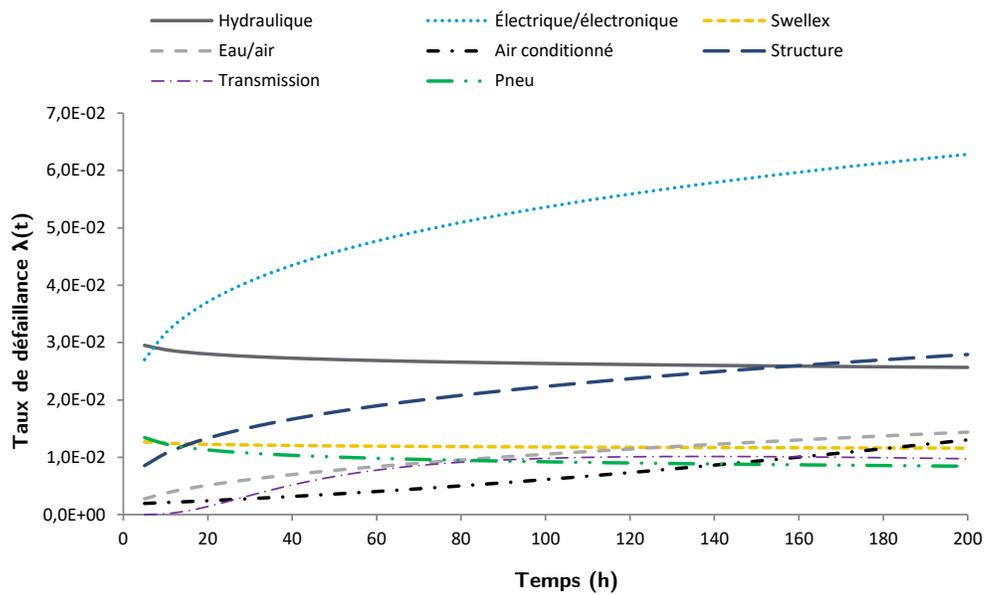


Figure 5.52: Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO1113]

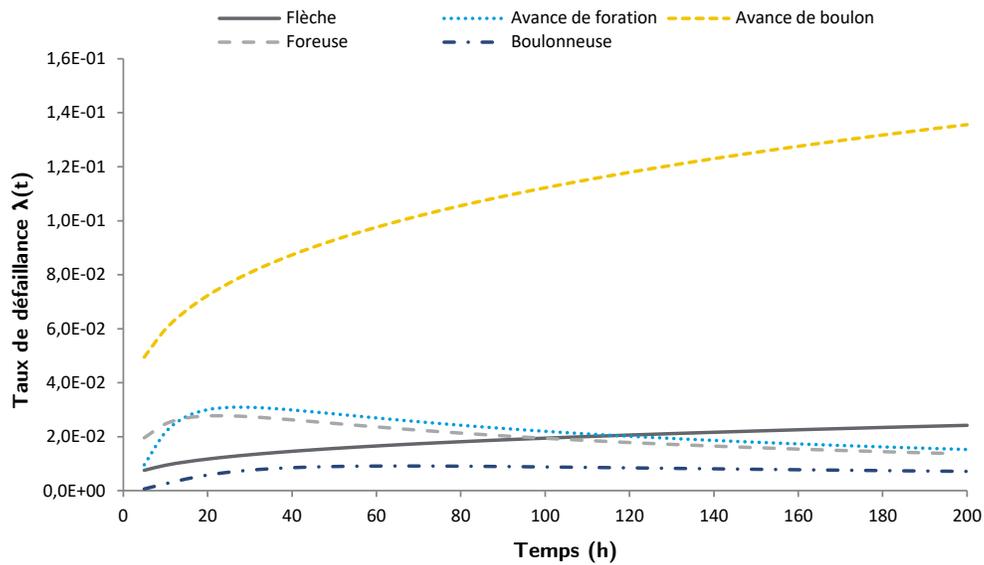


Figure 5.53: Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1114]

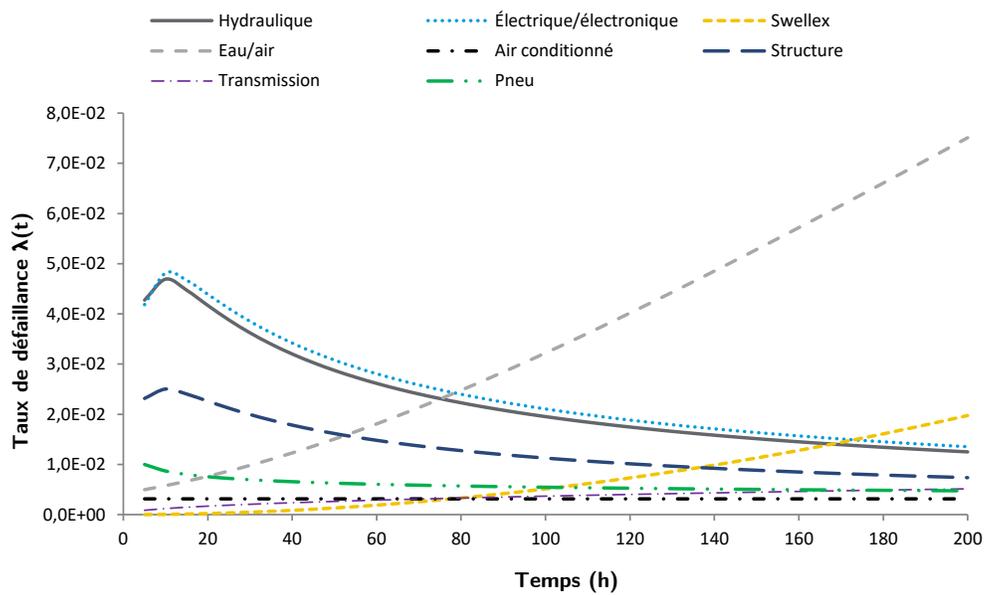


Figure 5.54: Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO1114]

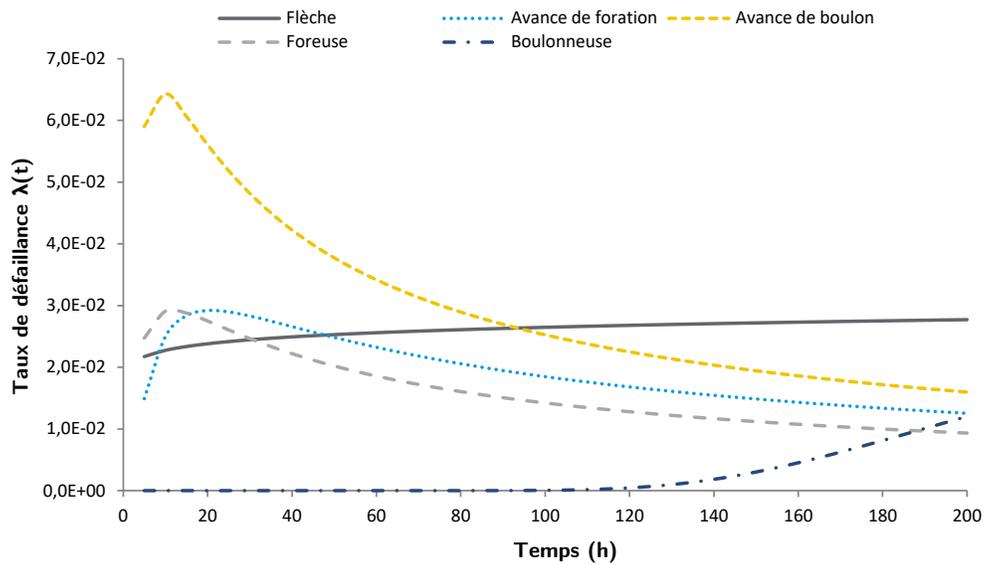


Figure 5.55: Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage et de boulonnage [BO1115]

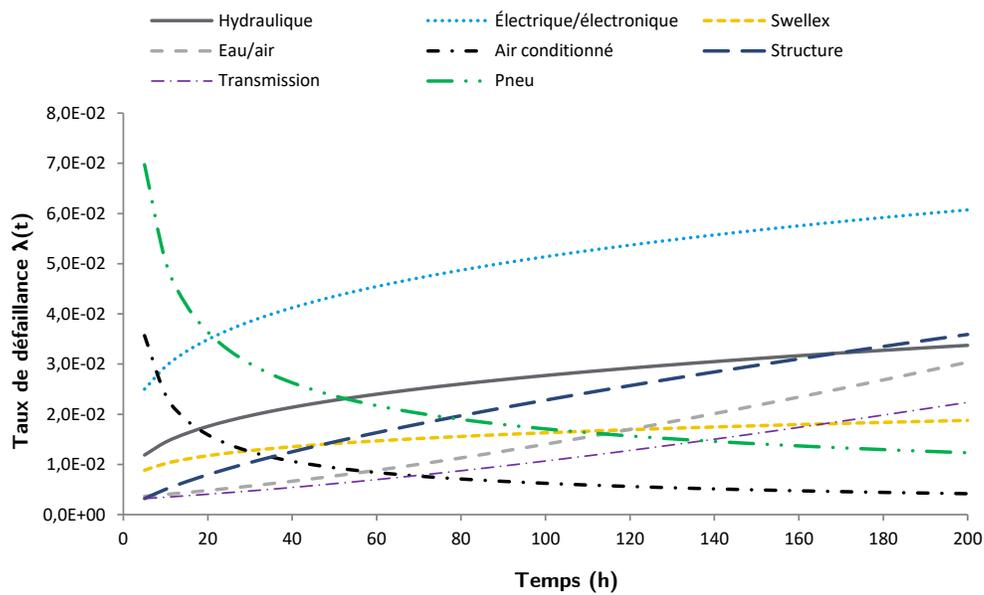


Figure 5.56: Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [BO1115]

5.8 Étude de la foreuse long trou (FO2103, FO2104, FO2106 et FO2107)

La flotte de foreuses long trou choisie pour l'étude se compose des équipements qui ont les numérotations suivantes : FO2103, FO2104, FO2106 et FO2107. Ce modèle de machine (dit foreuse Solo) est conçu pour être en fonction sous terre lors des activités de forage de production telles que l'exécution des trous de dynamitage (inclinés ou verticaux). Afin de faciliter la prise en main, les commandes sont séparées de la machine et cette dernière est contrôlable à distance. La figure 5.57 montre la vue d'ensemble et la figure 5.58 illustre ce type de foreuse de production en opération.

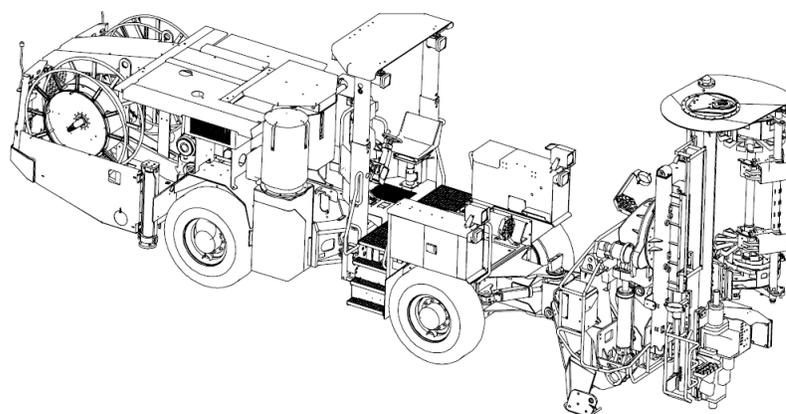


Figure 5.57: Vue d'ensemble de la foreuse long trou (fournie par AEM)

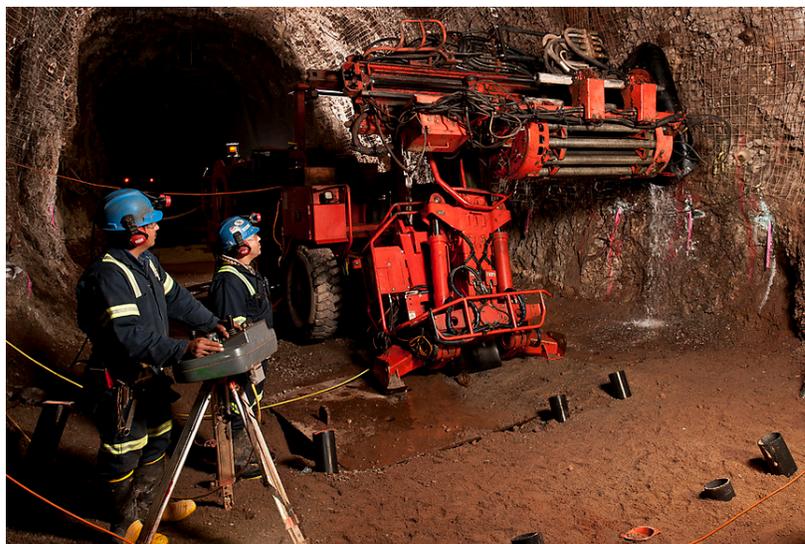


Figure 5.58: Vue de la foreuse long trou en opération (fournie par AEM)

La foreuse long trou de cette étude se divise en deux sections : le chariot et le module de forage. La figure 5.59 et la figure 5.60 présentent respectivement la vue en élévation et la vue en plan du module arrière avec canopée, qui est compris dans la section du chariot de la foreuse long trou.

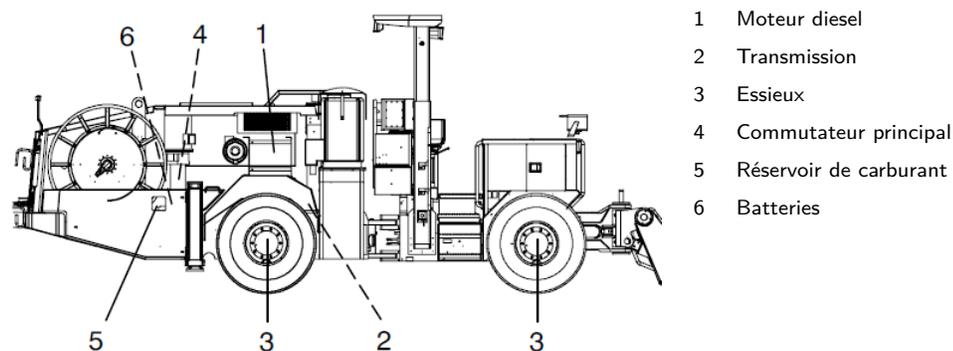


Figure 5.59: Vue en élévation du module arrière de la foreuse long trou (fournie par AEM)

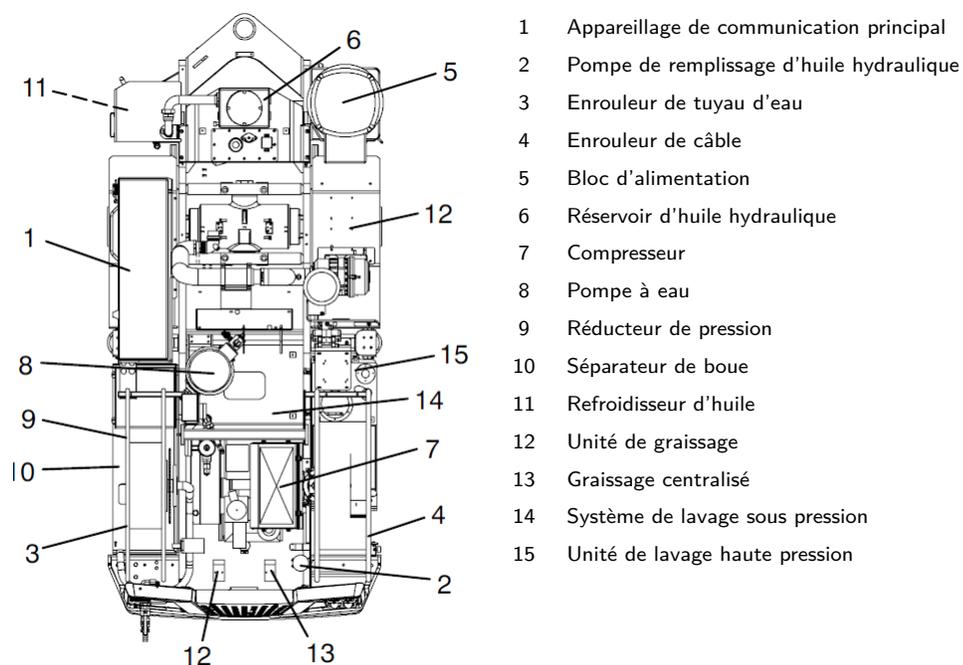


Figure 5.60: Vue en plan du module arrière de la foreuse long trou (fournie par AEM)

Le module de forage est formé des sous-systèmes suivants : la flèche (intègre le cadre avant), le changeur de tige, l'avance et le marteau perforateur. La figure 5.61 illustre le module de forage.

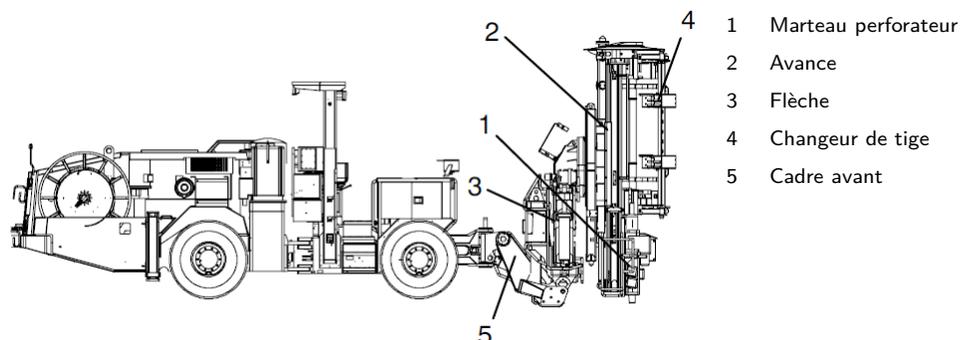


Figure 5.61: Module de forage (fournie par AEM)

Pour assurer une fragmentation adéquate de la roche lors de l'explosion, il est important que ses trous aient une longueur et une direction adéquates. De ce fait, l'équipement doit être en mesure de pivoter facilement sa flèche de forage dans différentes positions afin de maintenir le bon alignement des trous et de minimiser la déviation par rapport à l'emplacement approprié (Darling, 2011). Équipée d'une seule flèche, la machine dispose d'une longue couverture unidirectionnelle et d'une rotation complète avec des angles d'inclinaison de rallonge avant et arrière. La figure 5.62 décrit les sections qui composent la flèche de ce modèle de foreuse long trou.

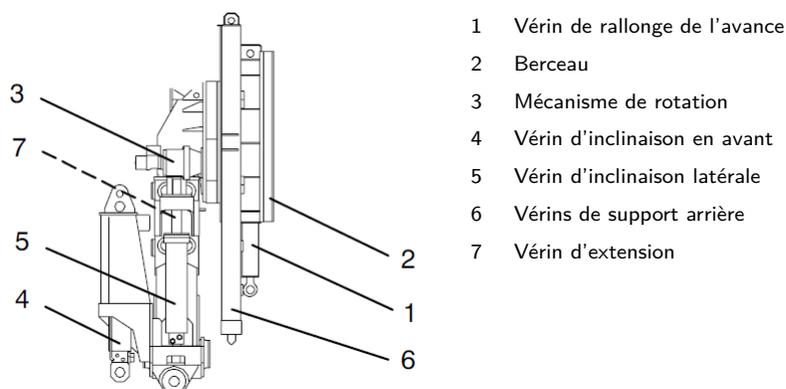


Figure 5.62: Flèche (fournie par AEM)

Le changeur de tige (dit carrousel) permet de tourner et d'insérer les barres de forage de façon automatisée avec un système de transfert et de mâchoires permettant de les retenir. Ce mécanisme évite ainsi à l'opérateur d'effectuer cette tâche délicate. La figure 5.63 montre le changeur de tige.

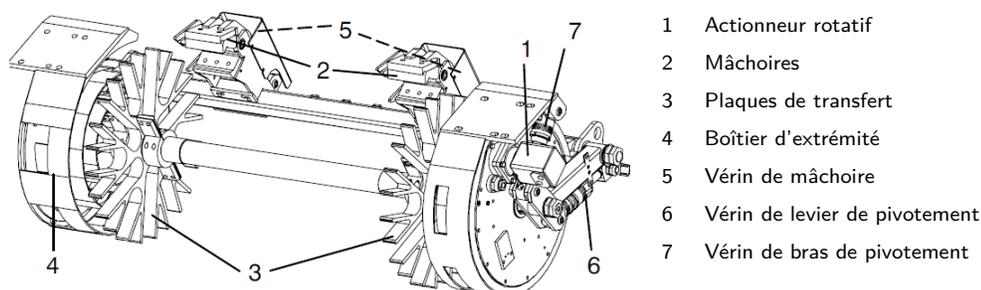


Figure 5.63: Changeur de tige (fournie par AEM)

L'avance de la foreuse, alimentée par un moteur hydraulique, se déplace par le mouvement d'un vérin permettant de faire glisser la table du marteau perforateur (dit chariot) sur les plaques de guidage à l'aide d'un système de câble. Pour assurer que le forage des trous soit parallèle, l'alignement de l'avance est basé sur un mécanisme de parallélogramme mobile avec des liaisons hydrauliques et muni d'un centreur de retenue à l'extrémité. Des mécanismes sont disponibles pour arrêter le forage lorsque le trou est terminé et pour revenir à sa position d'origine de façon automatique (Tatiya, 2005). Les composants de l'avance sont présentés à la figure 5.64.

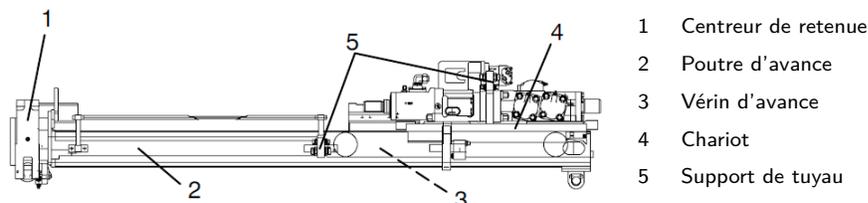


Figure 5.64: Avance de la foreuse (fournie par AEM)

Le marteau perforateur hydraulique (dit foreuse) et ses principaux composants installés dans ce modèle de foreuse long trou sont définis à la figure 5.65. Comme pour la boulonneuse, le marteau perforateur de la foreuse long trou exerce les actions de percussion et de rotation.

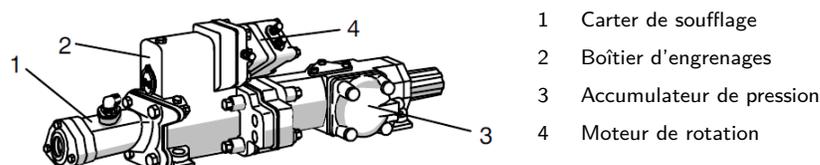


Figure 5.65: Marteau perforateur ou foreuse (fournie par AEM)

Le tableau 5.30 présente les informations techniques de l'équipement et la division des sous-systèmes pour la foreuse long trou (FO2103-FO2107).

Tableau 5.30: Informations techniques et classement des sous-systèmes de la foreuse long trou

Information	Section	Sous-système
Dimensions : 8,70 m (long.) × 2,24 m (larg.) × 2,70 m (haut.)	Module de forage	Flèche
		Avance
Masse : 21 000 kg	Chariot (cabine et module arrière)	Changeur de tige
		Marteau perforateur
Moteur diesel : 66 kW (90 hp)	Chariot (cabine et module arrière)	Hydraulique
		Électrique/électronique
Moteur électrique : 75 kW (101 hp)	Chariot (cabine et module arrière)	Lubrification
		Eau/air
		Structure
		Transmission
		Moteur diesel
		Pneus

5.8.1 Modes de défaillance spécifiques

Les informations suivantes considèrent les défaillances les plus récurrentes pour les sous-systèmes mentionnés dans le tableau ci-dessus. Les défauts des vérins hydrauliques représentent essentiellement les défaillances apparues sur la flèche des foreuses long trou. Les trois types de vérins hydrauliques défaillants sont le vérin du support arrière, le vérin d'extension et le vérin d'inclinaison latérale. Les défaillances récurrentes de l'avance de la foreuse comprennent les défauts du centreur de retenue, l'ajustement et le bris du système de câble pour l'alimentation, ainsi que la défaillance du moteur d'alimentation. Pour le changeur de tige, les problèmes se concentrent sur les défauts du système de mâchoire, des bras d'inclinaison et du carrousel. Les pannes récurrentes de la foreuse (composant) sont provoquées par les bris des joints d'étanchéité, des joints toriques, des accumulateurs de pression et de l'emmanchement. Les principales faiblesses du système électrique/électronique sont l'usure du câble d'alimentation 600 V, les troubles électroniques, les bris physiques du panneau de commande, et les défauts de la caméra et de l'inclinomètre. Les défauts du système de lubrification englobent différents composants tels que les raccords et les boyaux à graisse, la pompe à graisse et le fusil à graisse. Le tableau 5.31 expose les modes de défaillance des composants représentant les principales maintenances de la foreuse long trou.

Tableau 5.31: Modes de défaillance récurrents des composants de la foreuse long trou

Sous-système	Composant	Mode de défaillance
Flèche	<ul style="list-style-type: none"> ◆ vérin du support arrière ◆ vérin d'extension ◆ vérin d'inclinaison latérale 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ fuites, déformation ◆ fuites ◆ fuites, déformation
Avance	<ul style="list-style-type: none"> ◆ centreur de retenue ◆ vérin de l'avance ◆ câble de l'avance ◆ moteur d'alimentation ◆ plaques de guidage 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ fuites (vérin des mâchoires) /usure (mâchoires) /desserrage, rupture (boulon) ◆ fuites ◆ rupture /relâchement ◆ défaillance en fonctionnement (général) ◆ usure
Changeur de tige	<ul style="list-style-type: none"> ◆ mors de serrage ◆ bras d'inclinaison ◆ carrousel 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ fuites (vérins des mâchoires) /usure (mâchoires) /desserrage (support de mâchoires) ◆ fuites (vérins des bras d'inclinaison) ◆ déformation, rupture
Foreuse (composant)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ marteau perforateur ◆ accumulateurs de pression ◆ emmanchement ◆ joint d'étanchéité ◆ joint torique ◆ diaphragme 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ défaillance en fonctionnement (général) /desserrage, rupture (boulon) ◆ défaillance en fonctionnement (général) /gaz insuffisant /desserrage, rupture (boulon) ◆ usure ◆ usure ◆ usure ◆ usure
Électrique/électronique	<ul style="list-style-type: none"> ◆ câble d'alimentation 600 V ◆ panneau de commande ◆ fils électriques ◆ lumières ◆ caméra ◆ inclinomètre 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ usure, bris ◆ trouble électronique, bris ◆ rupture ◆ trouble électrique, bris ◆ trouble électrique, bris ◆ trouble électrique, bris
Lubrification	<ul style="list-style-type: none"> ◆ pompe à graisse ◆ fusil à graisse ◆ raccords à graisse ◆ boyaux 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ défaillance en fonctionnement (général) ◆ bris ◆ bris, blocage ◆ bris, blocage

5.8.2 Analyse avec approche non paramétrique : résultats et discussion

Les diagrammes de la fréquence d'interventions pour les foreuses long trou de numérotation FO2103, FO2104, FO2106 et FO2107 sont présentés respectivement aux figures 5.66, 5.68, 5.70 et 5.72. À quelques exceptions près, il est remarqué que la proportion des interventions sur les sous-systèmes défailants est similaire entre les quatre foreuses long trou et, collectivement, la criticité des types d'intervention est cohérente entre les équipements étudiés. Une fois de plus, la maintenance préventive est le type d'intervention qui génère le plus grand nombre de créations de bon de travail (respectivement de 20 % pour la foreuse long trou FO2103, 22 % pour la foreuse long trou FO2104, 22 % pour la foreuse long trou FO2106 et 26 % pour la foreuse long trou FO2107). Selon la numérotation respective des équipements, les sous-systèmes nécessitant le plus de maintenance sont les suivants : le marteau perforateur (19 % ; 20 % ; 17 % ; 24 %), le système électrique/électronique (14 % ; 5 % ; 13 % ; 8 %), le système hydraulique (12 % ; 11 % ; 11 % ; 10 %), l'avance (12 % ; 11 % ; 12 % ; 14 %), le changeur de tige (8 % ; 7 % ; 6 % ; 7 %), le système eau/air (5 % ; 5 % ; 5 % ; 14 %), la flèche (3 % ; 2 % ; 3 % ; 1 %) et le système de lubrification (3 % ; 4 % ; 6 % ; 4 %). Les autres sous-systèmes représentent 2 % et moins de la répartition totale des maintenances effectuées. Pour les quatre foreuses long trou, le marteau perforateur est le sous-système ayant le plus grand nombre de pannes. De ce fait, le marteau perforateur est un composant critique et il est pertinent d'enquêter plus en détail sa politique de maintenance (*voir* chap. 6). Les figures 5.67, 5.69, 5.71 et 5.73 exposent les diagrammes de Pareto pour les foreuses long trou. En examinant plus en détail ces diagrammes, il est constaté, à l'exception de la foreuse long trou FO2106, que les cinq sous-systèmes formés par le marteau perforateur, le système électrique/électronique, l'avance, le système hydraulique et le changeur de tige symbolisent plus de 80 % des défailances pour l'ensemble des foreuses long trou. Pour l'équipement FO2106, il faut additionner les défailances du système de lubrification aux autres sous-systèmes mentionnés pour dépasser le seuil de 80 % de la répartition cumulative totale.

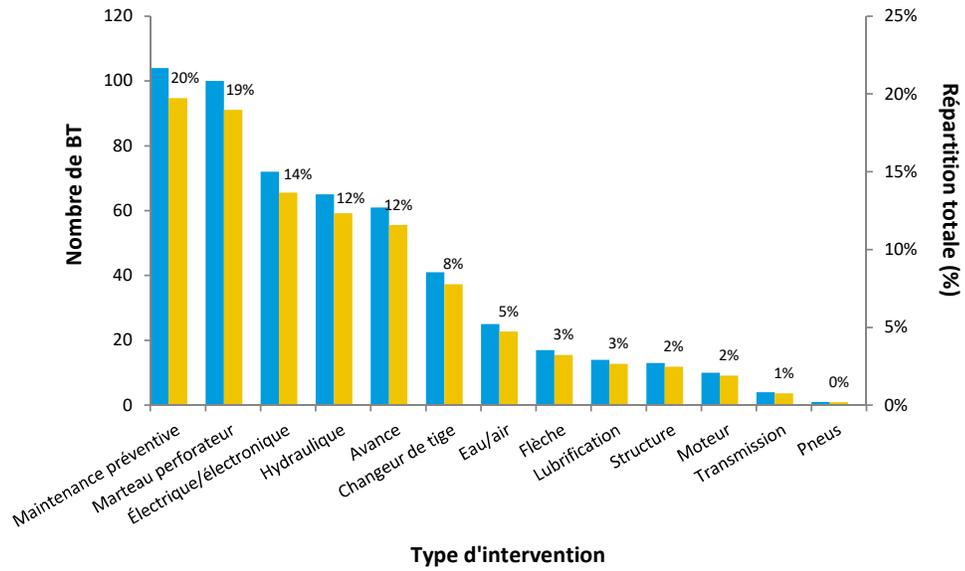


Figure 5.66: Diagramme de la fréquence d'interventions [FO2103]

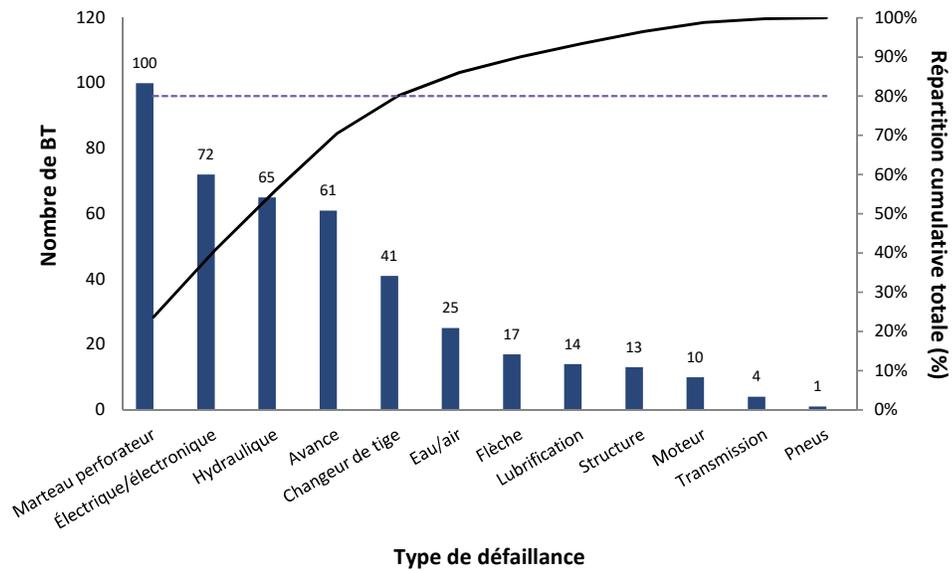


Figure 5.67: Diagramme de Pareto [FO2103]

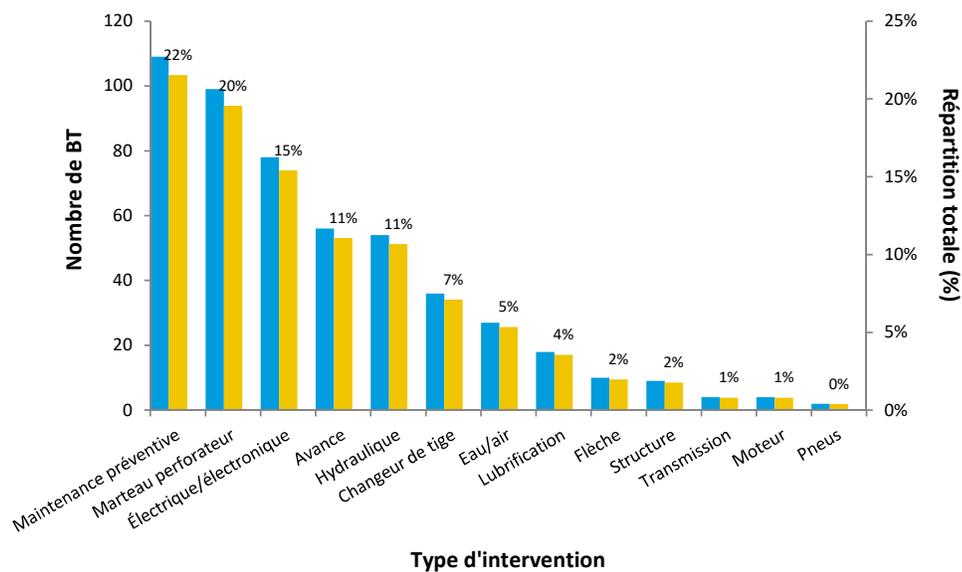


Figure 5.68: Diagramme de la fréquence d'interventions [FO2104]

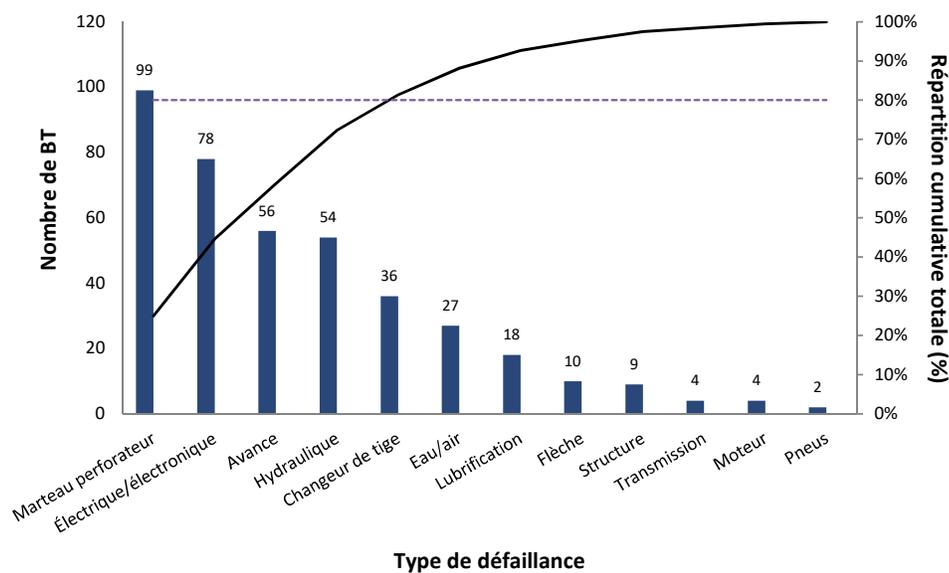


Figure 5.69: Diagramme de Pareto [FO2104]

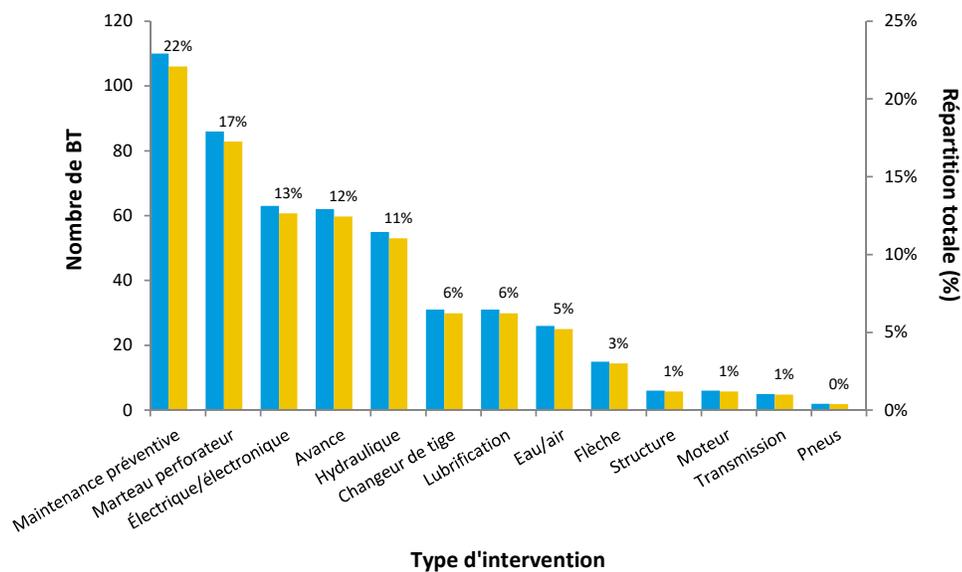


Figure 5.70: Diagramme de la fréquence d'interventions [FO2106]

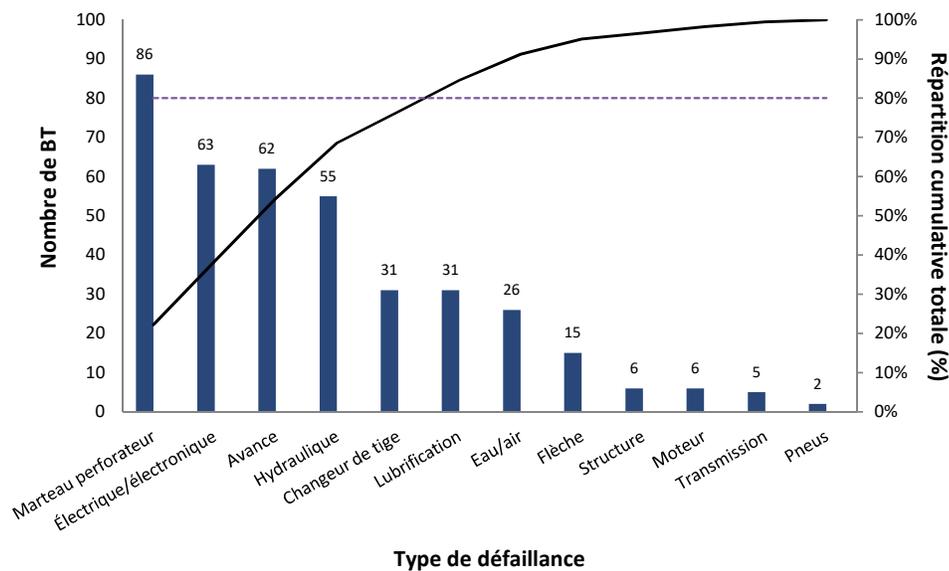


Figure 5.71: Diagramme de Pareto [FO2106]

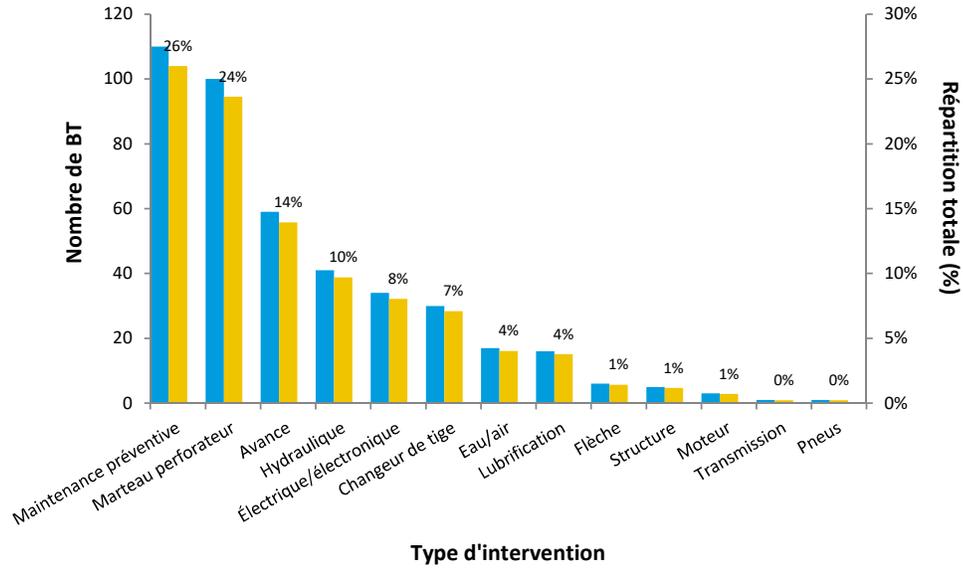


Figure 5.72: Diagramme de la fréquence d'interventions [FO2107]

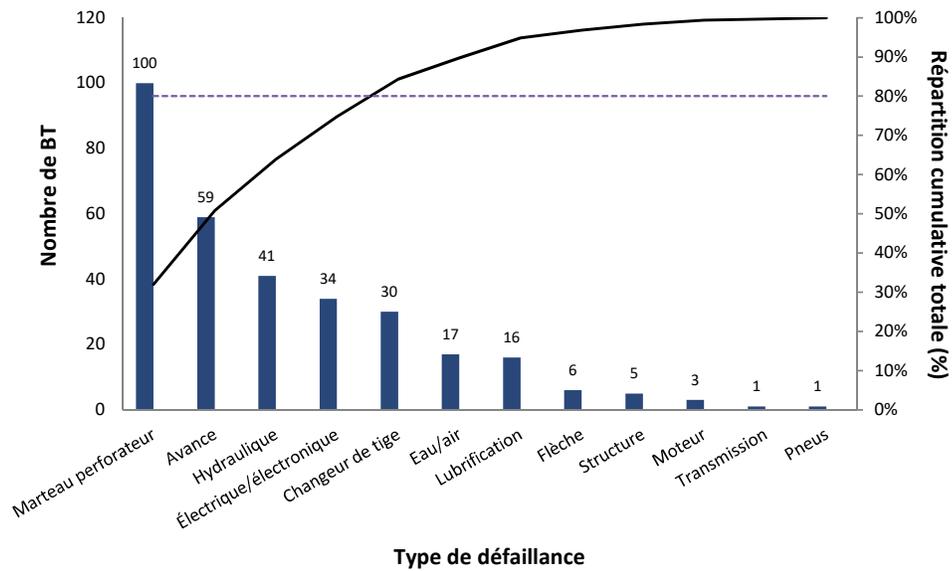


Figure 5.73: Diagramme de Pareto [FO2107]

5.8.3 Analyse avec approche fiabiliste : résultats et discussion

La validation de l'hypothèse initiale s'effectue avec les valeurs calculées pour les tests de tendances numériques. Dans le cadre de l'étude, ces résultats sont observables entre les tableaux 5.32 et 5.35. Parmi ces informations, il est possible de conclure que les hypothèses statistiques admettent que les pannes engendrées au sein de la flèche de la foreuse long trou FO2104 ne sont pas identiquement distribuées. Par conséquent, l'évolution de l'intensité de défaillance est visible et le processus stochastique de Poisson non homogène s'applique. Les autres sous-systèmes des foreuses long trou ne montrent aucune présence de tendance particulière parmi les données de défaillance recensées. La deuxième validation concerne l'analyse de la corrélation et les résultats pour le test de dépendance sont accessibles entre les tableaux 5.36 et 5.39. Le test de dépendance employé sur les données recueillies du système électrique/électronique de la foreuse long trou FO2103 démontre une dépendance entre elles et, en conséquence, celles-ci suivent un processus de branchement de Poisson. Les résultats calculés sont fonction des paramètres estimés pour ce modèle stochastique, où le processus subsidiaire est modélisé par la distribution exponentielle. À l'exception des sous-systèmes mentionnés, tous les sous-systèmes des quatre équipements critiques sélectionnés ont des données de défaillances qui sont indépendantes et identiquement distribuées. De manière respectueuse, le sommaire des résultats en fonction des sous-systèmes des foreuses long trou de numérotation FO2103, FO2104, FO2106 et FO2107, incluant les lois de probabilité, les estimations des paramètres et les moyennes de temps de bon fonctionnement est compris dans les tableaux 5.40 à 5.43. En considérant la distribution antérieure non informative de Jeffreys pour les interventions, l'approche bayésienne est adoptée dans l'étude de la fiabilité du moteur diesel des équipements de numérotation FO2104 et FO2107. Après l'examen des données recueillies, la transmission et les pneus ne sont pas pris en compte dans cette étude fiabiliste en raison de la présence d'échantillons qui contiennent très peu d'interventions dans l'ensemble de la flotte.

Tableau 5.32: Calcul numérique du test de tendance [FO2103]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification				
	Laplace		MIL-HDBK-189		Cramér-von Mises
Flèche (n = 17)	rejetée : NHPP (-2,49 < -1,96)	valeur-p 0,034	non rejetée : RP/HPP (48,60 > 41,87 > 21,66)	valeur-p 0,763	rejetée : RP/HPP (0,216 < 0,351)
Avance (n = 61)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,19 > -1,96)	valeur-p 0,850	non rejetée : RP/HPP (148,78 > 113,28 > 97,49)	valeur-p 0,298	-
Changeur de tige (n = 41)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,34 > -1,96)	valeur-p 0,178	non rejetée : RP/HPP (104,14 > 97,30 > 62,13)	valeur-p 0,881	-
Marteau perforateur (n = 100)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,81 > -1,96)	valeur-p 0,416	non rejetée : RP/HPP (233,99 > 183,20 > 168,28)	valeur-p 0,203	-
Hydraulique (n = 65)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,12 > -1,96)	valeur-p 0,262	non rejetée : RP/HPP (157,61 > 136,62 > 104,66)	valeur-p 0,672	-
Électrique/électronique (n = 72)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,86 > -1,96)	valeur-p 0,387	non rejetée : RP/HPP (173,00 > 148,38 > 117,27)	valeur-p 0,616	-
Lubrification (n = 14)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,36 > -1,96)	valeur-p 0,716	non rejetée : RP/HPP (41,64 > 27,06 > 16,83)	valeur-p 0,485	-
Eau/air (n = 25)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,40 > -1,96)	valeur-p 0,692	non rejetée : RP/HPP (67,50 > 37,01 > 34,76)	valeur-p 0,086	-
Structure (n = 13)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,18 > -1,96)	valeur-p 0,859	non rejetée : RP/HPP (38,89 > 18,75 > 15,38)	valeur-p 0,153	-
Moteur (n = 10)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,95 > -1,96)	valeur-p 0,340	non rejetée : RP/HPP (31,41 > 19,11 > 10,85)	valeur-p 0,485	-

Tableau 5.33: Calcul numérique du test de tendance [FO2104]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification				
	Laplace		MIL-HDBK-189		Cramér-von Mises
Flèche (n = 10)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,70 > -1,96)	valeur-p 0,089	rejetée : NHPP (7,72 < 10,85)	valeur-p 0,006	non rejetée : NHPP (0,212 > 0,129)
Avance (n = 56)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,14 > -1,96)	valeur-p 0,256	non rejetée : RP/HPP (137,70 > 92,80 > 88,57)	valeur-p 0,094	-
Changeur de tige (n = 36)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,51 > -1,96)	valeur-p 0,609	non rejetée : RP/HPP (92,81 > 67,80 > 53,46)	valeur-p 0,382	-
Marteau perforateur (n = 99)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,46 > -1,96)	valeur-p 0,646	non rejetée : RP/HPP (231,83 > 209,02 > 166,44)	valeur-p 0,718	-
Hydraulique (n = 54)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,96 > -1,96)	valeur-p 0,335	non rejetée : RP/HPP (133,26 > 94,88 > 85,01)	valeur-p 0,188	-
Électrique/électronique (n = 78)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,84 > -1,96)	valeur-p 0,402	non rejetée : RP/HPP (186,15 > 145,26 > 128,13)	valeur-p 0,279	-
Lubrification (n = 18)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,99 > -1,96)	valeur-p 0,322	non rejetée : RP/HPP (51,00 > 24,00 > 23,27)	valeur-p 0,063	-
Eau/air (n = 27)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,91 > -1,96)	valeur-p 0,056	non rejetée : RP/HPP (72,15 > 38,87 > 38,12)	valeur-p 0,060	-
Structure (n = 9)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,72 > -1,96)	valeur-p 0,474	non rejetée : RP/HPP (28,87 > 9,47 > 9,39)	valeur-p 0,052	-
Moteur (n = 4)	-	-	-	-	-

Tableau 5.34: Calcul numérique du test de tendance [FO2106]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification				
	Laplace		MIL-HDBK-189		Cramér-von Mises
Flèche (n = 15)	rejetée : NHPP (-2,01 < -1,96)	valeur-p 0,044	non rejetée : RP/HPP (43,77 > 35,71 > 18,49)	valeur-p 0,782	rejetée : RP/HPP (0,214 < 0,259)
Avance (n = 62)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,91 > -1,96)	valeur-p 0,363	non rejetée : RP/HPP (150,99 > 133,29 > 99,28)	valeur-p 0,732	-
Changeur de tige (n = 31)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,28 > -1,96)	valeur-p 0,202	non rejetée : RP/HPP (81,38 > 73,27 > 44,89)	valeur-p 0,845	-
Marteau perforateur (n = 86)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,48 > -1,96)	valeur-p 0,634	non rejetée : RP/HPP (203,60 > 171,51 > 142,67)	valeur-p 0,504	-
Hydraulique (n = 55)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 1,46 > -1,96)	valeur-p 0,143	non rejetée : RP/HPP (135,48 > 103,00 > 86,79)	valeur-p 0,331	-
Électrique/électronique (n = 63)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,60 > -1,96)	valeur-p 0,109	non rejetée : RP/HPP (152,20 > 138,82 > 101,07)	valeur-p 0,795	-
Lubrification (n = 31)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,73 > -1,96)	valeur-p 0,463	non rejetée : RP/HPP (81,38 > 55,43 > 44,89)	valeur-p 0,291	-
Eau/air (n = 26)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,95 > -1,96)	valeur-p 0,051	non rejetée : RP/HPP (69,83 > 62,81 > 36,44)	valeur-p 0,855	-
Structure (n = 6)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,41 > -1,96)	valeur-p 0,680	non rejetée : RP/HPP (21,03 > 5,41 > 5,23)	valeur-p 0,057	-
Moteur (n = 6)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,78 > -1,96)	valeur-p 0,859	non rejetée : RP/HPP (21,03 > 6,10 > 5,23)	valeur-p 0,089	-

Tableau 5.35: Calcul numérique du test de tendance [FO2107]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification				
	Laplace		MIL-HDBK-189		Cramér-von Mises
Flèche (n = 6)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > 0,42 > -1,96)	valeur-p 0,670	rejetée : NHPP (4,54 < 5,23)	valeur-p 0,028	rejetée : RP/HPP (0,199 < 0,290)
Avance (n = 59)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,56 > -1,96)	valeur-p 0,574	non rejetée : RP/HPP (144,35 > 111,84 > 93,92)	valeur-p 0,358	-
Changeur de tige (n = 30)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,83 > -1,96)	valeur-p 0,067	non rejetée : RP/HPP (79,08 > 59,41 > 43,19)	valeur-p 0,503	-
Marteau perforateur (n = 100)	rejetée : NHPP (-2,07 < -1,96)	valeur-p 0,038	non rejetée : RP/HPP (233,99 > 215,62 > 168,28)	valeur-p 0,787	rejetée : RP/HPP (0,220 < 0,315)
Hydraulique (n = 41)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,31 > -1,96)	valeur-p 0,753	non rejetée : RP/HPP (104,14 > 95,23 > 62,13)	valeur-p 0,849	-
Électrique/électronique (n = 34)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -1,21 > -1,96)	valeur-p 0,828	non rejetée : RP/HPP (88,25 > 60,92 > 50,02)	valeur-p 0,284	-
Lubrification (n = 16)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,67 > -1,96)	valeur-p 0,500	non rejetée : RP/HPP (46,19 > 30,16 > 20,07)	valeur-p 0,440	-
Eau/air (n = 17)	non rejetée : RP/HPP (1,96 > -0,01 > -1,96)	valeur-p 0,922	non rejetée : RP/HPP (48,60 > 29,73 > 21,66)	valeur-p 0,323	-
Structure (n = 5)	non rejetée : RP/HP (1,96 > -0,81 > -1,96)	P valeur-p 0,071	non rejetée : RP/HPP (18,31 > 13,20 > 3,94)	valeur-p 0,788	-
Moteur (n = 3)	-	-	-	-	-

Tableau 5.36: Calcul numérique du test de dépendance [FO2103]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification		
	r_1	valeur-p	Pearson
Flèche (n = 17)	-0,41	0,101	non rejetée : RP/HPP (1,75 < 2,13)
Avance (n = 61)	0,18	0,156	non rejetée : RP/HPP (1,44 < 2,00)
Changeur de tige (n = 41)	-0,11	0,492	non rejetée : RP/HPP (1,69 < 2,02)
Marteau perforateur (n = 100)	-0,06	0,570	non rejetée : RP/HPP (0,57 < 1,98)
Hydraulique (n = 65)	-0,01	0,958	non rejetée : RP/HPP (0,05 < 1,99)
Électrique/électronique (n = 72)	0,27	0,022	rejetée : BPP (2,34 > 1,99)
Lubrification (n = 14)	0,09	0,751	non rejetée : RP/HPP (0,32 < 2,18)
Eau/air (n = 25)	-0,07	0,750	non rejetée : RP/HPP (0,32 < 2,07)
Structure (n = 13)	-0,36	0,223	non rejetée : RP/HPP (1,29 < 2,20)
Moteur (n = 10)	-0,06	0,873	non rejetée : RP/HPP (0,17 < 2,31)

Tableau 5.37: Calcul numérique du test de dépendance [FO2104]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification		
	r_1	valeur-p	Pearson
Flèche (n = 10)	-	-	-
Avance (n = 56)	-0,05	0,684	non rejetée : RP/HPP (0,41 < 2,00)
Changeur de tige (n = 36)	-0,03	0,840	non rejetée : RP/HPP (0,20 < 2,03)
Marteau perforateur (n = 99)	0,01	0,916	non rejetée : RP/HPP (0,11 < 1,98)
Hydraulique (n = 54)	0,06	0,685	non rejetée : RP/HPP (0,40 < 2,00)
Électrique/électronique (n = 78)	0,08	0,473	non rejetée : RP/HPP (0,72 < 1,99)
Lubrification (n = 18)	-0,17	0,495	non rejetée : RP/HPP (0,70 < 2,12)
Eau/air (n = 27)	0,08	0,686	non rejetée : RP/HPP (0,41 < 2,06)
Structure (n = 9)	-0,10	0,794	non rejetée : RP/HPP (0,27 < 2,36)
Moteur (n = 4)	-	-	-

Tableau 5.38: Calcul numérique du test de dépendance [FO2106]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification		
	r_1	valeur-p	Pearson
Flèche (n = 15)	-0,18	0,512	non rejetée : RP/HPP (0,67 < 2,16)
Avance (n = 62)	0,03	0,796	non rejetée : RP/HPP (0,26 < 2,00)
Changeur de tige (n = 31)	0,20	0,280	non rejetée : RP/HPP (1,10 < 2,05)
Marteau perforateur (n = 86)	0,21	0,051	non rejetée : RP/HPP (1,98 < 1,99)
Hydraulique (n = 55)	0,13	0,341	non rejetée : RP/HPP (0,96 < 2,01)
Électrique/électronique (n = 63)	-0,12	0,341	non rejetée : RP/HPP (0,96 < 1,99)
Lubrification (n = 31)	-0,01	0,956	non rejetée : RP/HPP (0,06 < 2,05)
Eau/air (n = 26)	-0,01	0,965	non rejetée : RP/HPP (0,04 < 2,06)
Structure (n = 6)	-0,23	0,660	non rejetée : RP/HPP (0,47 < 2,78)
Moteur (n = 6)	-0,36	0,480	non rejetée : RP/HPP (0,78 < 2,78)

Tableau 5.39: Calcul numérique du test de dépendance [FO2107]

Sous-système	Rejet de l'hypothèse nulle H_0 à 5 % du seuil de signification		
	r_1	valeur-p	Pearson
Flèche (n = 6)	0,01	0,981	non rejetée : RP/HPP (0,03 < 2,78)
Avance (n = 59)	-0,05	0,713	non rejetée : RP/HPP (0,37 < 2,00)
Changeur de tige (n = 30)	0,05	0,804	non rejetée : RP/HPP (0,25 < 2,05)
Marteau perforateur (n = 100)	-0,01	0,931	non rejetée : RP/HPP (0,09 < 1,98)
Hydraulique (n = 41)	-0,02	0,926	non rejetée : RP/HPP (0,09 < 2,02)
Électrique/électronique (n = 34)	-0,17	0,326	non rejetée : RP/HPP (1,00 < 2,04)
Lubrification (n = 16)	-0,19	0,470	non rejetée : RP/HPP (0,74 < 2,14)
Eau/air (n = 17)	-0,21	0,413	non rejetée : RP/HPP (0,84 < 2,13)
Structure (n = 5)	-0,50	0,388	non rejetée : RP/HPP (1,01 < 3,18)
Moteur (n = 3)	-	-	-

Tableau 5.40: Loi, estimation des paramètres et MTBF [FO2103]

Sous-système	Modélisation		
	Loi	Paramètre	MTBF (h)
Flèche (n = 17)	Weibull	$\alpha = 130,09$ $\beta = 1,28$	121
Avance (n = 61)	Weibull	$\alpha = 38,41$ $\beta = 1,26$	36
Changeur de tige (n = 41)	Weibull	$\alpha = 58,04$ $\beta = 1,14$	55
Marteau perforateur (n = 100)	Weibull	$\alpha = 23,58$ $\beta = 1,36$	22
Hydraulique (n = 65)	Weibull	$\alpha = 33,42$ $\beta = 1,32$	31
Électrique/électronique (n = 72)	non i.i.d. branchement de Poisson (BPP)	$\lambda = 0,0347$ a = 0,07 b = 0,21	29
Lubrification (n = 14)	log-normale	$\mu = 4,32$ $\sigma = 1,24$	161
Eau/air (n = 25)	log-normale	$\mu = 3,91$ $\sigma = 0,94$	78
Structure (n = 13)	log-normale	$\mu = 5,17$ $\sigma = 0,66$	218
Moteur (n = 10)	Weibull	$\alpha = 274,52$ $\beta = 1,32$	253

Tableau 5.41: Loi, estimation des paramètres et MTBF [FO2104]

Sous-système	Modélisation		
	Loi	Paramètre	MTBF (h)
Flèche (n = 10)	non i.i.d.	$\alpha = 1,49 \times 10^{-6}$	100
	loi de puissance (NHPP)	$\beta = 2,07$	
Avance (n = 56)	log-normale	$\mu = 3,16$	37
		$\sigma = 1,09$	
Changeur de tige (n = 36)	Weibull	$\alpha = 67,38$	69
		$\beta = 0,94$	
Marteau perforateur (n = 99)	Weibull	$\alpha = 24,28$	22
		$\beta = 1,37$	
Hydraulique (n = 54)	log-normale	$\mu = 3,29$	40
		$\sigma = 0,99$	
Électrique/électronique (n = 78)	Weibull	$\alpha = 30,15$	29
		$\beta = 1,06$	
Lubrification (n = 18)	log-normale	$\mu = 3,92$	152
		$\sigma = 1,48$	
Eau/air (n = 27)	log-normale	$\mu = 3,97$	108
		$\sigma = 0,94$	
Structure (n = 9)	Weibull	$\alpha = 254,24$	273
		$\beta = 0,87$	
Moteur (n = 4)	approche bayésienne	$\lambda = 0,002$	422

Tableau 5.42: Loi, estimation des paramètres et MTBF [FO2106]

Sous-système	Modélisation		
	Loi	Paramètre	MTBF (h)
Flèche (n = 15)	Weibull	$\alpha = 158,40$ $\beta = 0,85$	172
Avance (n = 62)	Weibull	$\alpha = 44,56$ $\beta = 1,20$	42
Changeur de tige (n = 31)	Weibull	$\alpha = 88,93$ $\beta = 1,13$	85
Marteau perforateur (n = 86)	Weibull	$\alpha = 31,92$ $\beta = 1,15$	30
Hydraulique (n = 55)	log-normale	$\mu = 3,34$ $\sigma = 1,16$	48
Électrique/électronique (n = 63)	log-normale	$\mu = 3,11$ $\sigma = 1,06$	40
Lubrification (n = 31)	Weibull	$\alpha = 67,06$ $\beta = 0,80$	76
Eau/air (n = 26)	log-normale	$\mu = 4,06$ $\sigma = 1,12$	109
Structure (n = 6)	log-normale	$\mu = 5,88$ $\sigma = 0,32$	377
Moteur (n = 6)	Weibull	$\alpha = 527,95$ $\beta = 0,96$	538

Tableau 5.43: Loi, estimation des paramètres et MTBF [FO2107]

Sous-système	Modélisation		
	Loi	Paramètre	MTBF (h)
Flèche (n = 6)	Weibull	$\alpha = 408,65$ $\beta = 0,86$	442
Avance (n = 59)	Weibull	$\alpha = 40,94$ $\beta = 1,26$	38
Changeur de tige (n = 30)	log-normale	$\mu = 4,00$ $\sigma = 0,99$	89
Marteau perforateur (n = 100)	Weibull	$\alpha = 25,84$ $\beta = 1,30$	24
Hydraulique (n = 41)	Weibull	$\alpha = 54,22$ $\beta = 0,93$	56
Électrique/électronique (n = 34)	Weibull	$\alpha = 68,15$ $\beta = 1,01$	68
Lubrification (n = 16)	Weibull	$\alpha = 119,85$ $\beta = 0,74$	144
Eau/air (n = 17)	log-normale	$\mu = 4,43$ $\sigma = 1,19$	172
Structure (n = 5)	Weibull	$\alpha = 310,76$ $\beta = 0,47$	717
Moteur (n = 3)	approche bayésienne	$\lambda = 0,001$	901

En décortiquant attentivement les distributions qui s'adaptent aux données enregistrées, il est remarqué que les deux lois de probabilité qui admettent le meilleur ajustement des défaillances de la flotte de foreuses long trou sont, une fois de plus, la loi de Weibull (6 sous-systèmes pour la foreuse long trou FO2103, 4 sous-systèmes pour la foreuse long trou FO2104, 6 sous-systèmes pour la foreuse long trou FO2106 et 7 sous-systèmes pour la foreuse long trou FO2107) et la loi log-normale (3 sous-systèmes pour la foreuse long trou FO2103, 4 sous-systèmes pour la foreuse long trou FO2104, 4 sous-systèmes pour la foreuse long trou FO2106 et 2 sous-systèmes pour la foreuse long trou FO2107). En regardant les cas où la loi de Weibull offre l'ajustement adéquat, il est pertinent d'analyser la valeur du paramètre de forme β . Lorsque le paramètre de forme β est inférieur à 1, le sous-système est dans sa période où le taux de défaillance est décroissant et il est possible que les procédures d'entretien des composants soient inappropriées. Ce constat est vrai pour certains sous-systèmes tels que la structure ($\beta = 0,87$) de la foreuse long trou FO2104; la flèche ($\beta = 0,85$) et le système de lubrification ($\beta = 0,80$) de la foreuse long trou FO2106; la flèche ($\beta = 0,88$), le système de lubrification ($\beta = 0,74$) et la structure ($\beta = 0,47$) de la foreuse long trou FO2107. Ensuite, si le paramètre de forme β est égal ou proche de 1, alors la distribution de probabilité a une allure quasi exponentielle. C'est le cas pour le changeur de tige ($\beta = 0,94$) et le système électrique/électronique ($\beta = 1,06$) de la foreuse long trou FO2104; le moteur ($\beta = 0,96$) de la foreuse long trou FO2106; la flèche ($\beta = 0,97$), le système hydraulique ($\beta = 0,93$) et le système électrique/électronique ($\beta = 1,01$) de la foreuse long trou FO2107. Dans la caractérisation du sous-système électrique/électronique des foreuses long trou FO2104 et FO2107, la valeur du paramètre β est proche de 1, indiquant une caractéristique d'usure de la loi exponentielle, typique des systèmes électroniques. Pour un paramètre de forme β compris entre 1 et 3, cela indique que l'état caractéristique du sous-système est compris entre la période de vie utile et la période de vieillesse. Cette situation est réelle pour la flèche ($\beta = 1,28$), l'avance ($\beta = 1,26$), le changeur de tige ($\beta = 1,14$), le marteau perforateur ($\beta = 1,36$), le système hydraulique ($\beta = 1,32$) et le moteur ($\beta = 1,32$) de la foreuse long trou FO2103; le marteau perforateur ($\beta = 1,37$) de la foreuse long trou FO2104; l'avance ($\beta = 1,20$), le changeur de tige ($\beta = 1,13$), le marteau perforateur ($\beta = 1,15$) de la foreuse long trou FO2106; l'avance ($\beta = 1,26$) et le marteau perforateur ($\beta = 1,30$) de la foreuse long trou FO2107. En analysant le cas particulier de la flèche de la foreuse long trou FO2104 suivant un processus de Poisson non homogène, ce dernier est modélisé par un paramètre de forme élevé ($\beta = 2,07$) et cela indique une détérioration continue du sous-système. Il est observé que le marteau perforateur des foreuses long trou analysées est caractérisé par la même loi statistique (Weibull) avec des paramètres très similaires ($\beta = 1,32$; $\beta = 1,37$; $\beta = 1,15$; $\beta = 1,30$).

Par la suite, une analyse des moyennes de temps de bon fonctionnement (MTBF) apporte quelques faits pertinents. La MTBF de la flèche diffère pour les quatre équipements : respectivement, 121 pour la foreuse long trou FO2103, 100 pour la foreuse long trou FO2104, 172 pour la foreuse long trou FO2106 et 442 pour la foreuse long trou FO2107. Le constat est similaire pour la structure, puisqu'elles se distinguent toutes les quatre : 218, 273, 377 et 717. Il est possible de diviser la MTBF du changeur de tige en deux groupes distincts : un premier groupe qui tient compte d'une MTBF divergente, soit de 55 pour la foreuse long trou FO2103 et de 69 pour la foreuse long trou FO2104 ; et un deuxième groupe qui possède une MTBF semblable, soit de 85 pour la foreuse long trou FO2106 et de 89 pour la foreuse long trou FO2107. Il en va de même pour le système hydraulique : un premier équipement distinct avec une MTBF de 31 pour la foreuse long trou FO2103 ; et un deuxième groupe qui contient une MTBF de 40 pour la foreuse long trou FO2104, de 48 pour la foreuse long trou FO2106 et de 56 pour la foreuse long trou FO2107. La MTBF est plus élevée pour le système électrique/électronique de la foreuse long trou FO2107 (MTBF égale à 68 contre 29, 29 et 40) que les autres équipements de la même catégorie. Au contraire, la MTBF est plus faible pour le système de lubrification de la foreuse long trou FO2106 (MTBF égale à 76 contre 161, 152 et 144) et pour le système eau/air de la foreuse long trou FO2103 (MTBF égale à 78 contre 108, 109 et 172). Le marteau perforateur (22 ; 22 ; 30 ; 24) et l'avance (36 ; 37 ; 42 ; 38) affichent une MTBF relativement similaire entre les diverses foreuses long trou et ce fait indique que les sous-systèmes possèdent à peu près la même performance. En examinant la MTBF des moteurs diesels, elle diffère entre les équipements (253 ; 422 ; 538 ; 901).

D'ailleurs, il est pertinent de vérifier les sous-systèmes ayant de grands écarts dans leur moyenne de survie en comparaison avec les autres équipements du même type. Les sous-systèmes suivants peuvent être cités : la flèche de la foreuse long trou FO2107 ; le système de lubrification des foreuses long trou FO2103, FO2104 et FO2107 ; la structure et le moteur de la foreuse long trou FO2107. La valeur élevée pour la MTBF de la flèche de l'équipement FO2107 s'explique, en partie, par le fait que la défaillance du vérin du support arrière est moins fréquente que les autres foreuses long trou. Par l'observation de la structure, du moteur et du système de lubrification, il n'y a pas un mode de défaillance qui est plus récurrent qu'un autre. Le nombre de défaillances est simplement plus élevé pour certains équipements et cette conséquence influence la durée de vie moyenne des sous-systèmes.

Les graphiques qui représentent la fiabilité en fonction des modules des foreuses long trou sont disponibles entre les figures 5.74 et 5.81. En relation avec ces courbes de fiabilité, le marteau perforateur est le sous-système le plus faible du module de forage pour l'ensemble de la flotte. Il est suivi de façon croissante par l'avance, le changeur de tige et la flèche. Dans le chariot, les systèmes électrique/électronique et hydraulique sont les deux sous-systèmes dont la défaillance survient le plus rapidement. Ils sont suivis par le système eau/air, le système de lubrification, la structure et le moteur. À partir du tableau 5.44, il est visible, après 50 heures d'opération, que les foreuses long trou FO2106 et FO2107 offrent une meilleure fiabilité. Cette constatation peut être attribuée à leur date de mise en fonction qui est plus récente. La fiabilité des équipements est respectivement de $3,65 \times 10^{-5}$, $3,95 \times 10^{-5}$, $3,93 \times 10^{-4}$ et $5,41 \times 10^{-4}$. L'observation des résultats par le diagramme de Pareto, en relation avec les graphiques de fiabilité, confirme que la détérioration des sous-systèmes exprimée par l'approche fiabiliste est conséquente aux défaillances recensées par la méthode non paramétrique.

En continuité avec l'analyse des graphiques des modules des foreuses long trou, il est pertinent d'observer les courbes du taux de défaillance accessibles entre les figures 5.82 et 5.89. Si les interventions suivent une loi log-normale, le taux de défaillance augmente légèrement au début de l'intervalle de temps, mais diminue pour atteindre une valeur pratiquement constante. Pour la distribution de Weibull, le taux de défaillance est principalement fonction du paramètre de forme β . Les valeurs voisines de 1 se comportent comme une loi exponentielle et il est possible de remarquer que le taux de défaillance est constant ou qu'il a tendance à se stabiliser. Cette caractéristique décrit la période de durée de vie utile ou la période de maturité. Une valeur un peu plus grande que 1 pour β entraîne une légère augmentation du taux de défaillance au fil du temps.

Tableau 5.44: Résumé de la fiabilité de la flotte de foreuses long trou

Sous-système	Estimation fiabilité R(50 h)			
	FO2103	FO2104	FO2106	FO2107
Flèche	0,745	0,607	0,687	0,848
Avance	0,248	0,244	0,317	0,276
Changeur de tige	0,430	0,469	0,594	0,536
Marteau perforateur	0,060	0,068	0,188	0,095
Hydraulique	0,182	0,264	0,314	0,396
Électrique/électronique	0,153	0,181	0,228	0,481
Lubrification	0,627	0,503	0,453	0,593
Eau/air	0,501	0,519	0,553	0,669
Structure	0,971	0,784	1,00	0,652
Moteur	0,900	0,856	0,901	0,921
R_{total} (50 h)	$3,65 \times 10^{-5}$	$3,95 \times 10^{-5}$	$3,93 \times 10^{-4}$	$5,41 \times 10^{-4}$

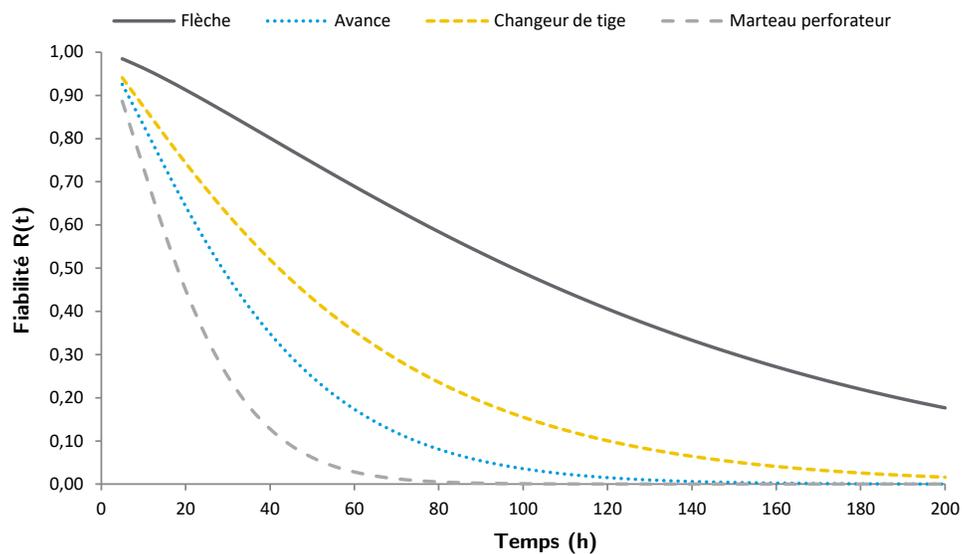


Figure 5.74: Fiabilité des sous-systèmes du module de forage [FO2103]

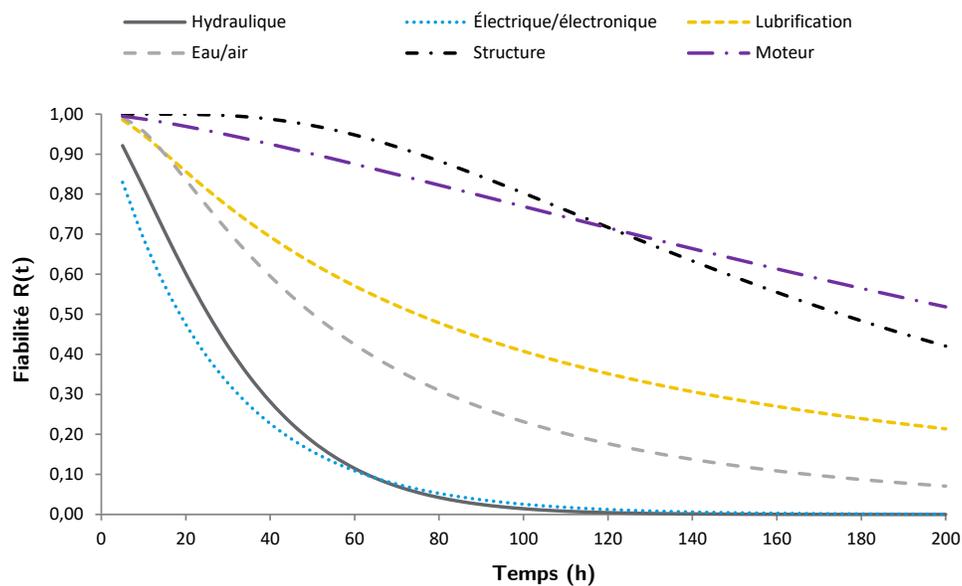


Figure 5.75: Fiabilité des sous-systèmes du chariot [FO2103]

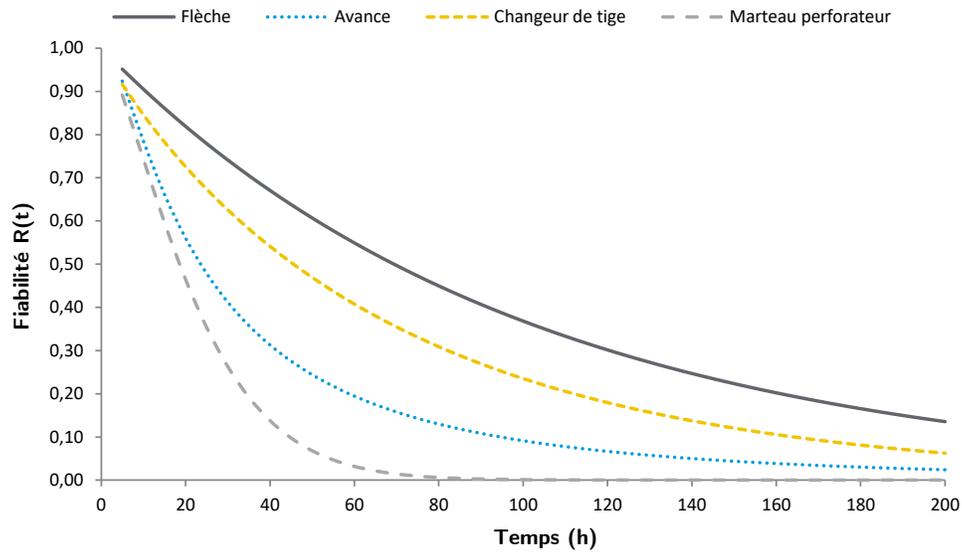


Figure 5.76: Fiabilité des sous-systèmes du module de forage [FO2104]

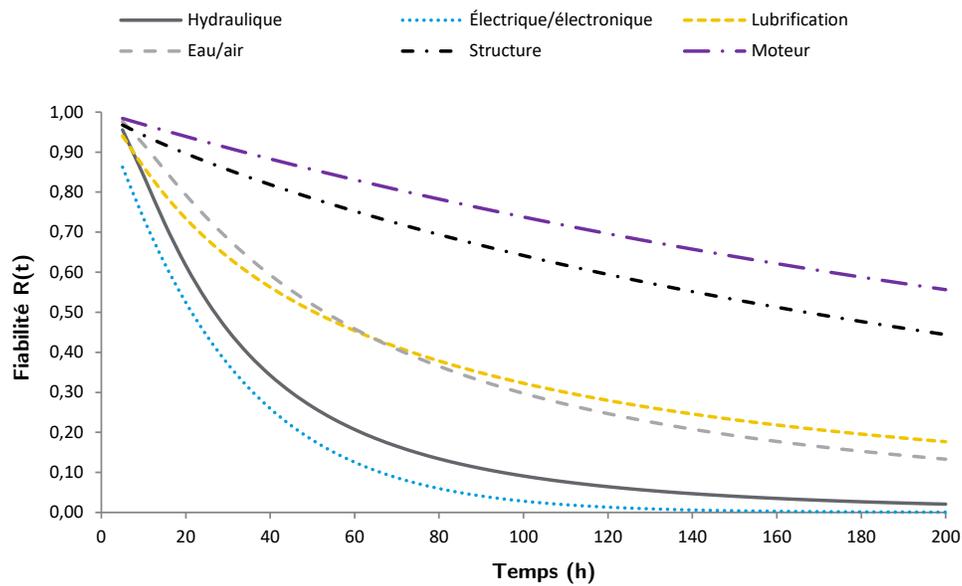


Figure 5.77: Fiabilité des sous-systèmes du chariot [FO2104]

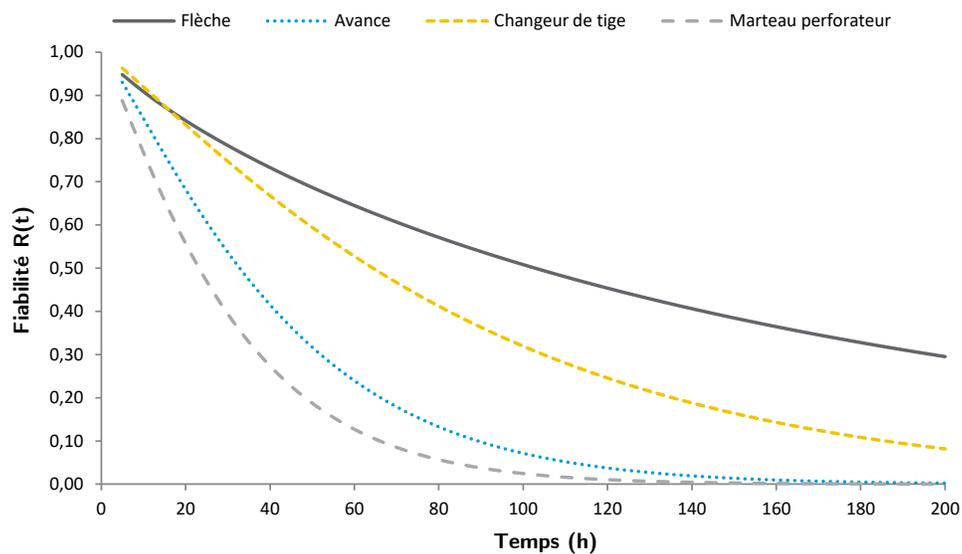


Figure 5.78: Fiabilité des sous-systèmes du module de forage [FO2106]

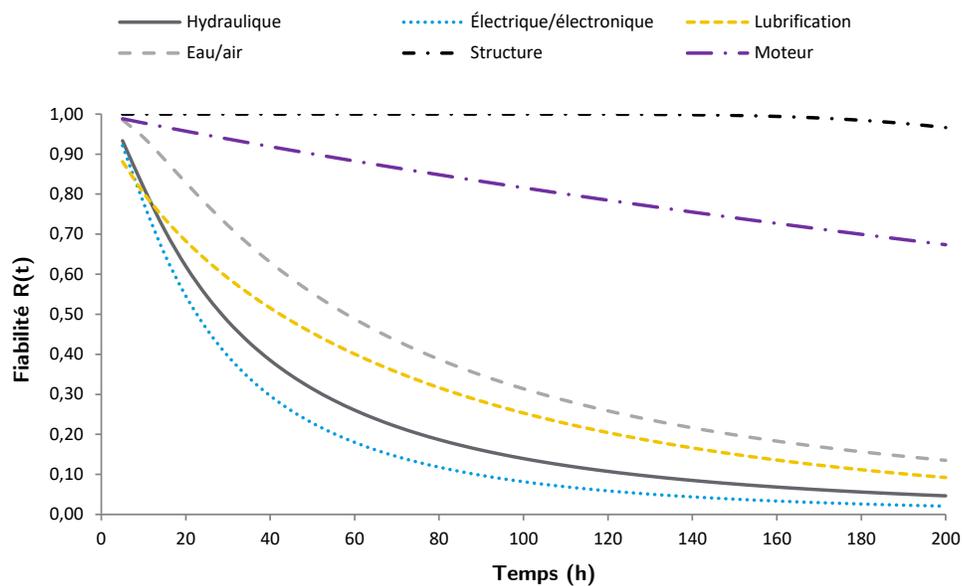


Figure 5.79: Fiabilité des sous-systèmes du chariot [FO2106]

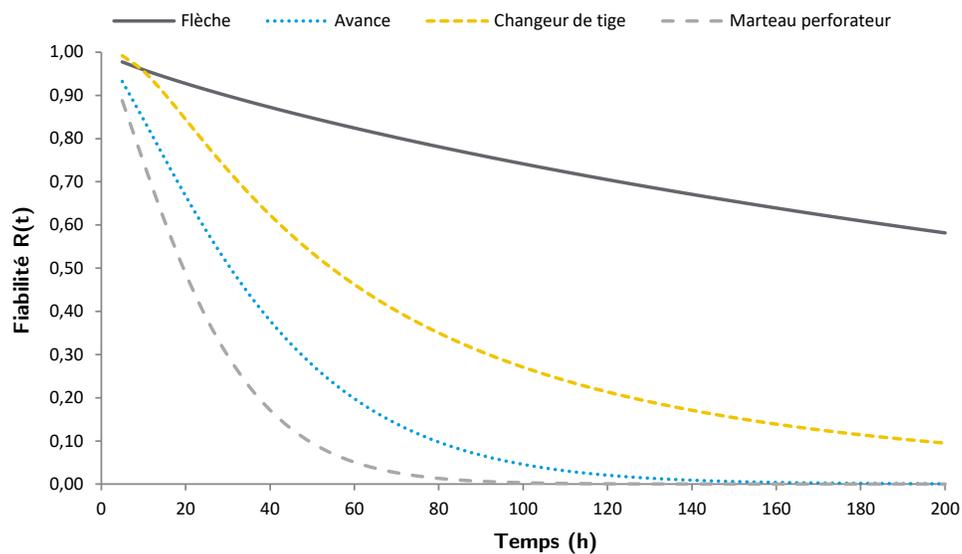


Figure 5.80: Fiabilité des sous-systèmes du module de forage [FO2107]

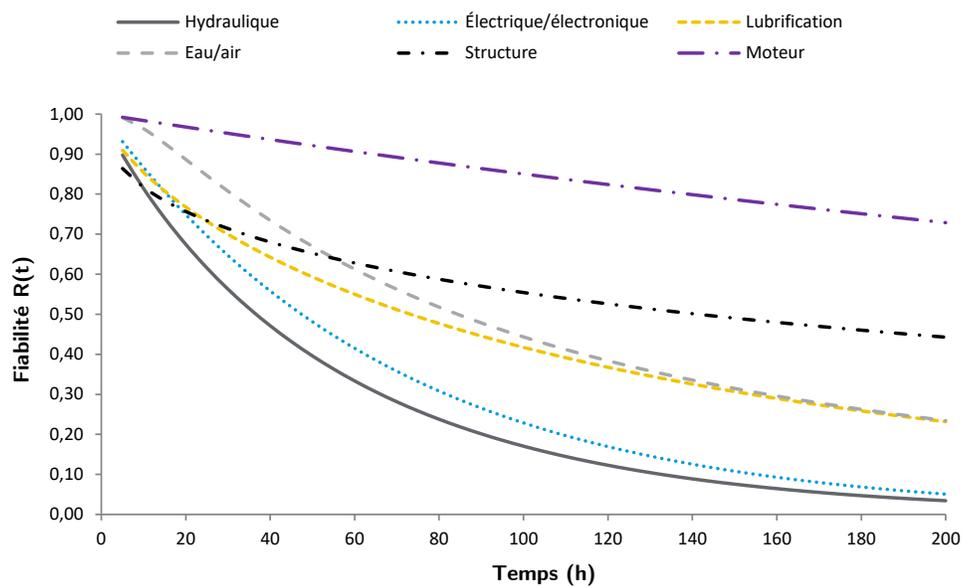


Figure 5.81: Fiabilité des sous-systèmes du chariot [FO2107]

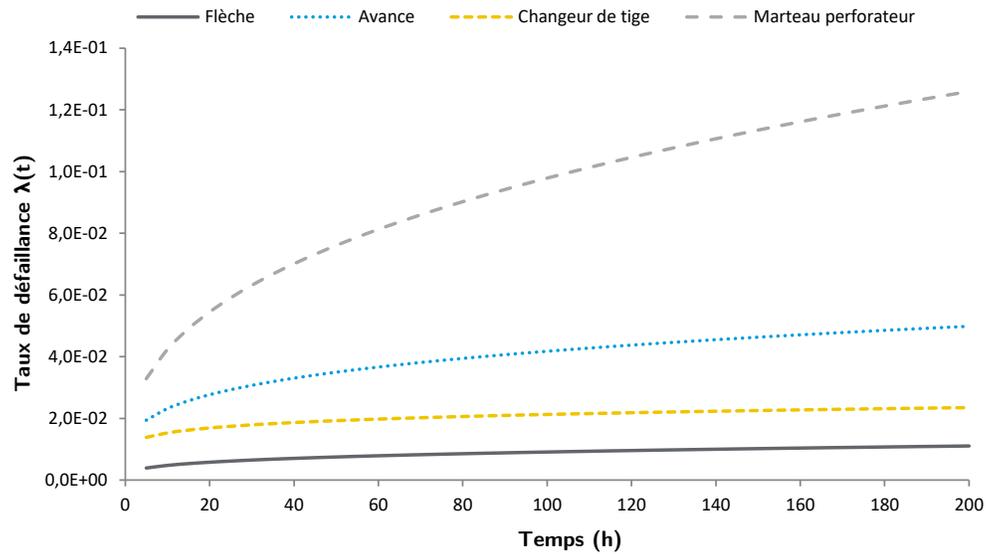


Figure 5.82: Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage [FO2103]

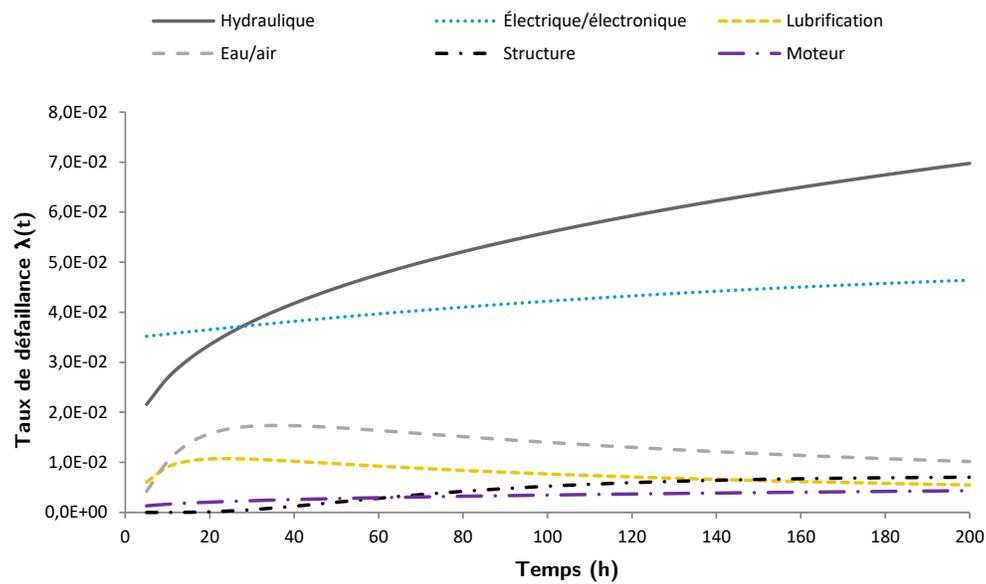


Figure 5.83: Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [FO2103]

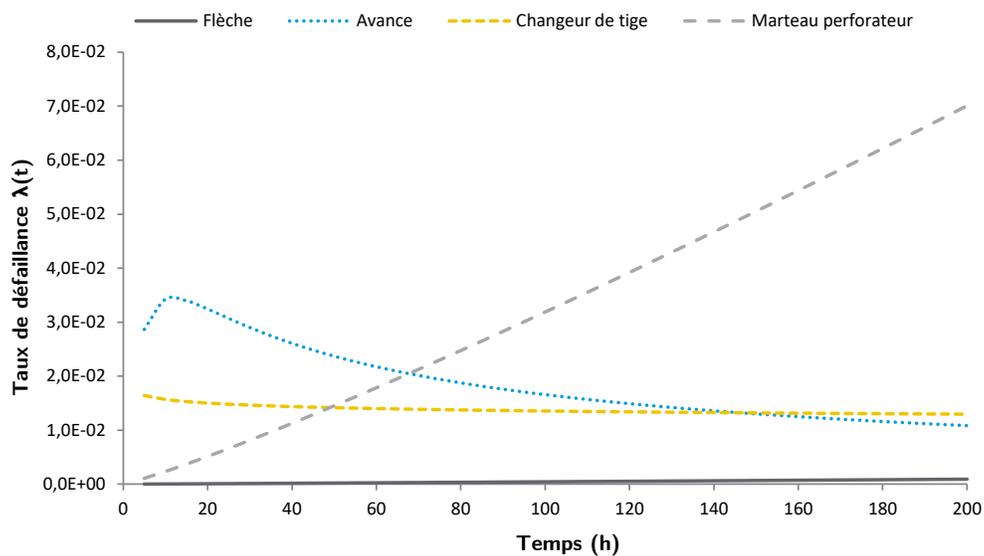


Figure 5.84: Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage [FO2104]

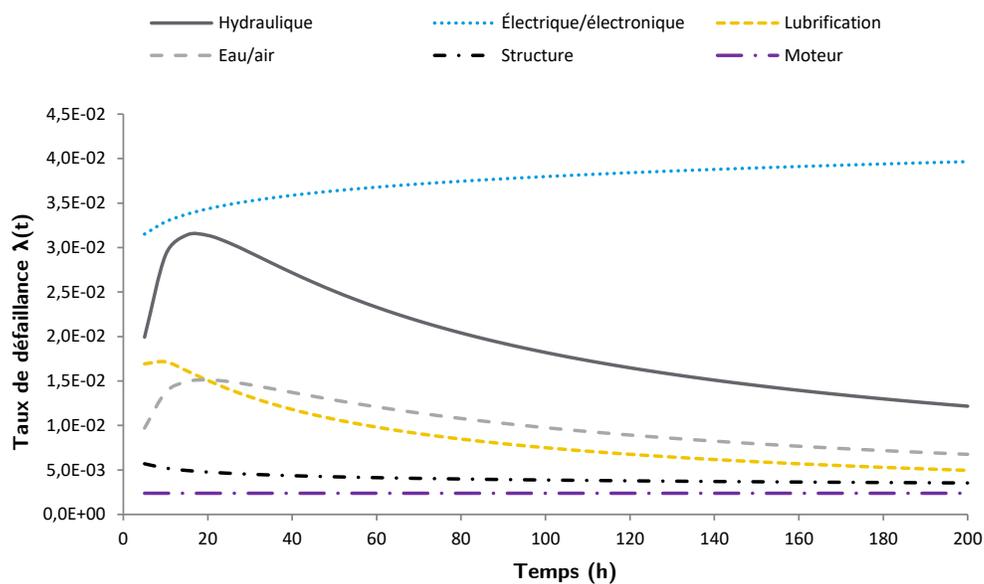


Figure 5.85: Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [FO2104]

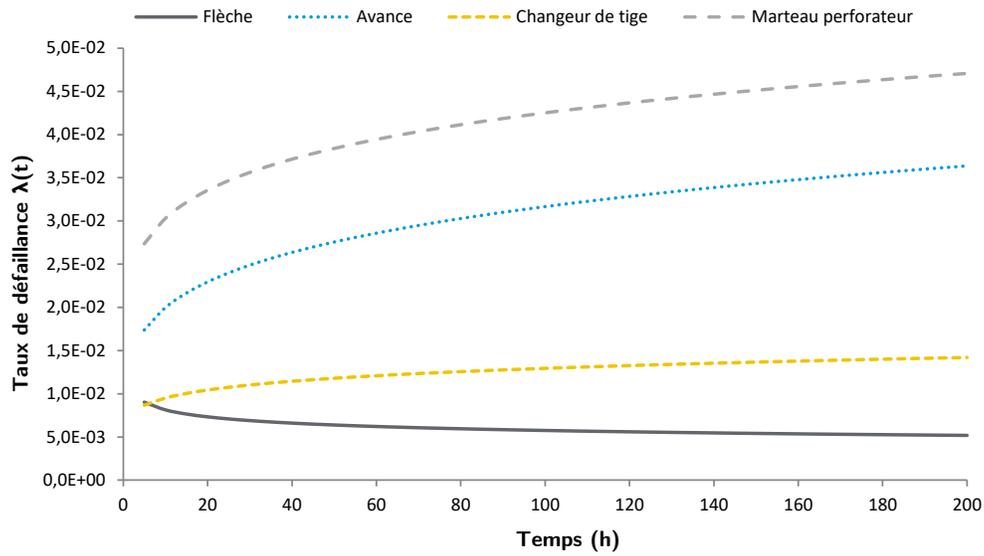


Figure 5.86: Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage [FO2106]

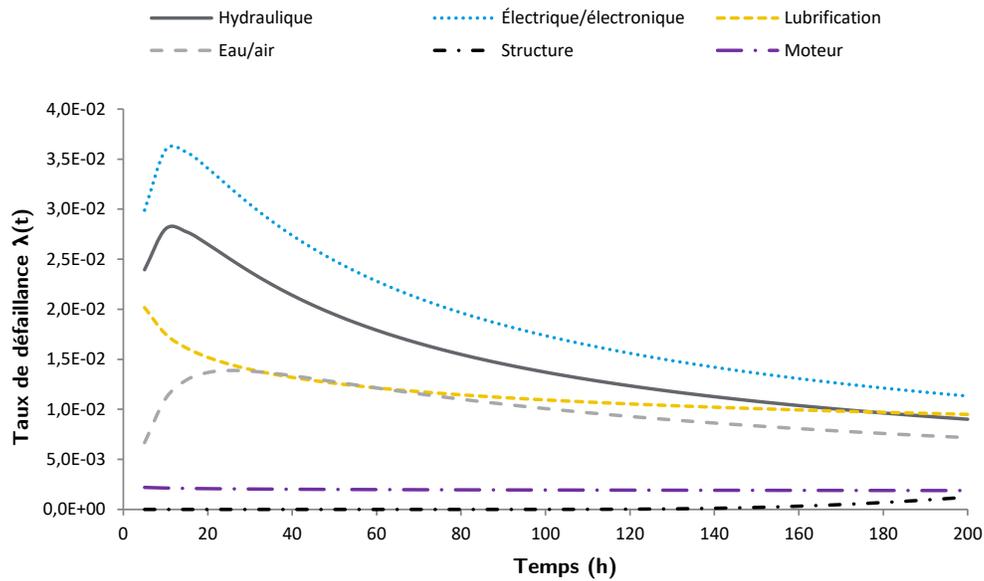


Figure 5.87: Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [FO2106]

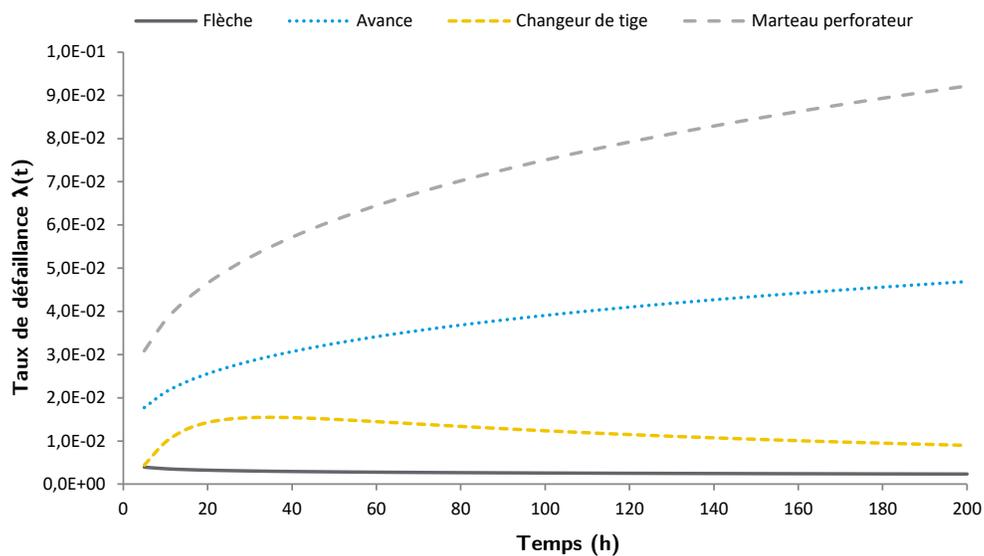


Figure 5.88: Taux de défaillance des sous-systèmes du module de forage [FO2107]

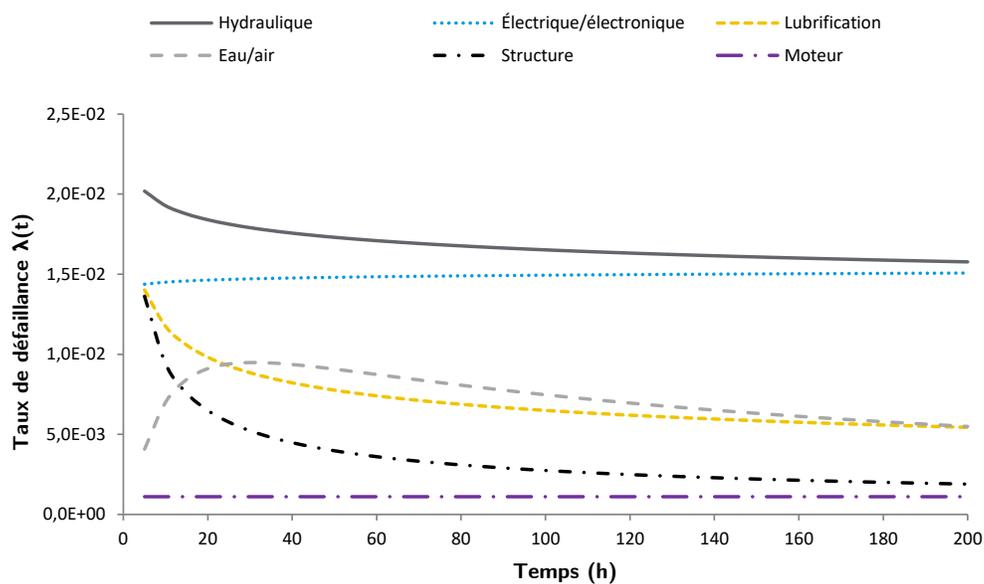


Figure 5.89: Taux de défaillance des sous-systèmes du chariot [FO2107]

5.9 Synthèse des résultats

Les analyses avec l'approche non paramétrique et l'approche fiabiliste sont les deux types d'introspection employés pour ces études de cas. Les points saillants de ces résultats se divisent comme suit :

- Le diagramme de Pareto des données de défaillance est utile pour identifier les problèmes récurrents dans le processus de maintenance. Selon cette analyse, 80 % de la répartition des défaillances significatives pour la boulonneuse BO2102 est atteinte par la tête de boulonnage, le système électrique/électronique, le système hydraulique, la foreuse, le manipulateur de treillis, la structure et l'avance de foration. Cette répartition est identique pour la boulonneuse BO2103, sauf qu'il faut ajouter les deux sous-systèmes suivants à la liste afin d'atteindre 80 % des défaillances significatives : le système Swellex® et l'avance de boulon ;
- À partir des résultats de l'analyse de Pareto pour les boulonneuses à plateforme BO1111-15, l'avance de boulon représente le plus grand défaillant parmi les sous-systèmes. Pour les équipements BO1111 à BO1114, les trois systèmes les plus défaillants après l'avance de boulon sont le système hydraulique, le système électrique/électronique et la flèche. Pour l'équipement BO1115 l'ordre d'importance en termes de défaillance est le suivant : l'avance de boulon, le système électrique/électronique, l'avance de foration et la flèche ;
- Dans le cadre de l'analyse de Pareto des foreuses long trou FO2103-07, 80 % de la répartition totale des défaillances est décrite par les sous-systèmes suivants : le marteau perforateur, le système électrique/électronique, le système hydraulique, l'avance, le changeur de tige, le système eau/air, la flèche et le système de lubrification ;
- Les défaillances des sous-systèmes électrique/électronique et hydraulique représentent des temps d'arrêt non négligeables dans la résolution de la fiabilité des équipements étudiés ;
- Selon la courbe de fiabilité, la tête de boulonnage, l'avance de boulon et le marteau perforateur sont, respectivement, les sous-systèmes les plus défaillants du module de forage pour les équipements BO2102-03, BO1111-15 et FO2103-07 ;

- Outre la notion de fiabilité, les valeurs moyennes de bon fonctionnement calculées peuvent attirer l'attention. Il est remarqué entre autres que pour chacune des flottes de machines approfondies, la durée de bon fonctionnement en heure entre les interventions du marteau perforateur (foreuse) montre une certaine régularité entre les équipements, ce qui pourrait indiquer que ce composant critique a des performances similaires par son mode opératoire ;

- À part quelques exceptions parmi les flottes d'équipements ciblées, les lois de probabilité de Weibull et log-normale offrent le meilleur ajustement entre les données empiriques et théoriques. Pour les échantillons caractérisés par la distribution de Weibull, le paramètre de forme est majoritairement compris entre $1 < \beta < 3$ et ils ont ainsi des particularités similaires, respectivement à une distribution quasi exponentielle et une distribution log-normale, où la durée de vie se situe entre la période de maturité et de vieillesse (croissance/décroissance du taux de défaillance). Ce fait est pertinent puisque la loi log-normale permet, entre autres, de modéliser le comportement de survie des composants mécaniques où les défaillances sont dues aux contraintes en fatigue du matériau ;

- Après une simulation de 50 heures adaptée aux modèles stochastiques, la boulonneuse BO2102, les boulonneuses à plateforme BO1112 et BO1114, et les foreuses long trou FO2106 et FO2107 donnent la meilleure fiabilité de leur flotte ;

- En comparant les sous-systèmes identiques des deux types de flottes de boulonneuses (excluant le manipulateur de treillis, la tête de boulonnage et la transmission), il est discernable qu'après 50 h d'opération, les deux boulonneuses BO2102 et BO2103 offrent une meilleure fiabilité sur certains sous-systèmes que les boulonneuses à plateforme BO1111 à BO1115, comme la flèche et l'avance de boulon. Autre point important : selon le temps d'observation de l'étude, la boulonneuse (composant) est affectée par un nombre d'interventions non négligeable pour les équipements BO1111 à BO1115, alors que pour les équipements BO2102 et BO2103, le recensement d'interventions est trop faible pour en tenir compte dans cette étude. Il est à noter que la fiabilité de la foreuse (composant) installée pour l'opération de forage est équivalente entre les deux types de flottes de boulonneuses.

CHAPITRE 6

OPTIMISATION DU REMPLACEMENT DE COMPOSANTS CRITIQUES

Sommaire : L'objectif de ce chapitre est de valider le modèle optimisant le remplacement des composants critiques avec un programme de maintenance préventive établi. La sélection de ces composants relève des équipements étudiés au chapitre précédent. Les intervalles de temps préventifs confrontés sont le temps de remplacement actuellement instauré dans le système de maintenance de la mine, le temps de remplacement des modèles basés sur les stratégies de type âge et de type bloc, et le temps de remplacement moyen de survie basé sur le modèle fiabiliste. L'observation des résultats permet de déterminer l'intervalle de remplacement optimal.

6.1 Optimisation de la maintenance

Il a été mentionné que lorsqu'une entité a soudainement une défaillance, il est parfois impératif d'effectuer un remplacement immédiat ou une réparation par le biais d'une maintenance corrective, puisque le bris compromet le bon fonctionnement de l'équipement. Cependant, l'exécution d'une maintenance corrective peut entraîner des retards d'opération et, parfois, des dommages collatéraux. *A contrario*, une maintenance préventive est un entretien prévu dans le calendrier de travail et des dispositions sont prises pour exécuter les activités sans retard inutile. Le défi consiste à trouver l'intervalle de temps qui minimise le coût de l'entretien, tout en ayant un bon équilibre entre les coûts alloués aux maintenances préventives et correctives, ainsi que les bénéfices apportés. D'ailleurs, si l'intervalle de la maintenance préventive est trop long, bien qu'il puisse diminuer les opérations de maintenance, cela a pour contre-coup de diminuer la fiabilité, puisque les défaillances se produisent de façon plus récurrente. Cela a également pour effet d'élever le coût des maintenances correctives étant donné l'arrêt d'équipement dans le cadre des activités de production. Dans la situation inverse, si l'intervalle de l'entretien préventif est trop court, bien que l'équipement reste en bon état de fonctionnement, le coût de maintenance est plus élevé en raison, entre autres, de l'augmentation des remplacements ou des réparations de composants (Liao et al., 2010). Le conflit des coûts engendrés par les diverses stratégies de maintenance est montré à la figure 6.1.

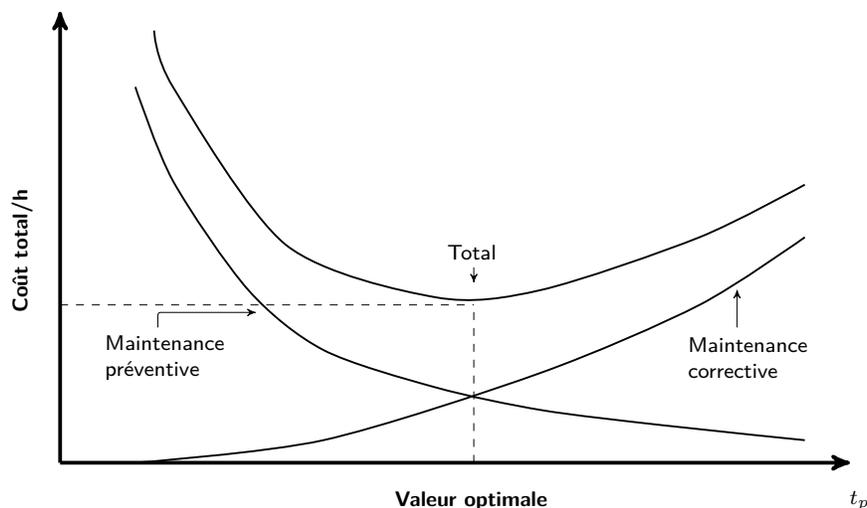


Figure 6.1: Temps optimal de remplacement (tirée de [Dodson, 1994](#))

6.2 Maintenance préventive périodique

Plusieurs recherches publiées sont dédiées à l'optimisation de la maintenance préventive périodique et elles font référence aux théories émises initialement par [Barlow et Hunter \(1960\)](#). Le modèle de maintenance préventive périodique repose sur la rentabilité des activités de maintenance en déterminant la fréquence optimale, tout en minimisant les coûts et en maximisant la disponibilité. Parmi les modèles préventifs systématiques, deux familles sont à différencier pour la détermination de l'intervalle optimal : la stratégie de maintenance de type âge et la stratégie de maintenance de type bloc.

6.2.1 Stratégie de maintenance de type âge

Le modèle de remplacement basé sur l'âge est l'un des plus communs parmi les applications de politique de maintenance ([Wang, 2002](#)). Il fait référence à la politique de remplacement préventif de type I, définie par [Barlow et Hunter \(1960\)](#), et est applicable pour un processus de renouvellement continu. Tel que vu par le cycle de la maintenance de type âge à la figure 6.2, le temps optimal de maintenance t_p permet d'effectuer un remplacement préventif avant le moment où l'entité risque de tomber en défaillance. Toutefois, si une anomalie survient, l'entité est remplacée par du neuf et la période t_p est réinitialisée. Les possibilités de cette politique de maintenance sont montrées à la figure 6.3.

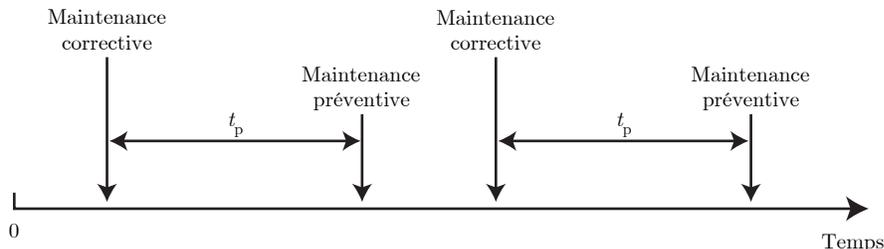


Figure 6.2: Cycle de la maintenance de type âge (tirée de Jardine et Tsang, 2013)

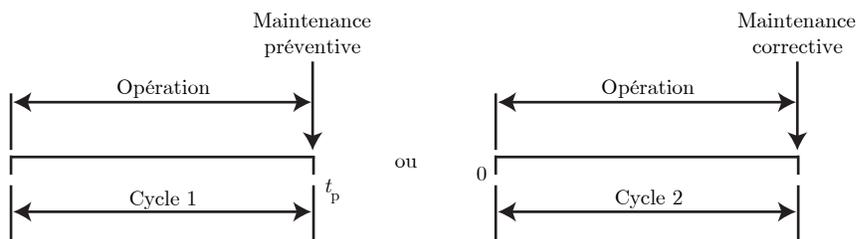


Figure 6.3: Possibilités du cycle de la maintenance de type âge (tirée de Jardine et Tsang, 2013)

Le modèle mathématique de la politique de remplacement de type I a été développé plus en profondeur par Barlow et Proschan (1965) et cette stratégie de maintenance préventive basée sur l'âge a été adoptée par la suite dans de nombreuses études de cas. Cette stratégie est définie par la détermination du temps optimal de remplacement préventif t_p , minimisant le coût total moyen par unité de temps sur un intervalle de temps infini. En d'autres mots, l'intervalle optimal de remplacement préventif t_p correspond à l'âge dont le ratio du coût moyen $C(t_p)$ est le minimum entre les maintenances correctives et préventives dans le temps. Il est essentiel que le coût total optimisé de cette stratégie soit inférieur au coût total de la maintenance corrective. Le ratio $C(t_p)$ s'exprime comme suit (Dodson, 1994) :

$$C(t_p) = \frac{C_p \int_{t_p}^{\infty} f(t)dt + C_f \int_0^{t_p} f(t)dt}{t_p \int_{t_p}^{\infty} f(t)dt + \int_0^{t_p} t f(t)dt} \tag{6.1}$$

où C_p est le coût total de la maintenance préventive, C_f est le coût total de la maintenance corrective, $f(t)$ est la densité de probabilité et t_p est le temps de remplacement préventif.

La simplification de l'équation (6.1) donne :

$$C(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + \int_0^{t_p} t f(t) dt} \quad (6.2)$$

L'équation (6.2) s'écrit également sous cette forme (Abernethy 2004) :

$$C(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{\int_0^{t_p} R(t) dt} \quad (6.3)$$

L'estimation de la moyenne pour le temps de remplacement préventif t_p est donné par :

$$M(t_p) = \frac{\int_0^{t_p} t f(t) dt}{1 - R(t_p)} \quad (6.4)$$

Selon Jardine et Tsang (2013), le ratio $C(t_p)$ équivalent de l'équation (6.2) est alors :

$$C(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + M(t_p) [1 - R(t_p)]} \quad (6.5)$$

6.2.2 Stratégie de maintenance de type bloc

La stratégie de maintenance de type bloc, qui s'applique aussi à un groupe d'entité, correspond à la politique de remplacement de type II, telle que définie par Barlow et Hunter (1960). Cette stratégie suggère d'effectuer une maintenance préventive de l'entité après une période de temps t_p prédéterminée et fixe. Cette période optimale est indépendante de l'âge et du nombre de maintenances correctives. Le cycle de la maintenance de type bloc est illustré à la figure 6.4.

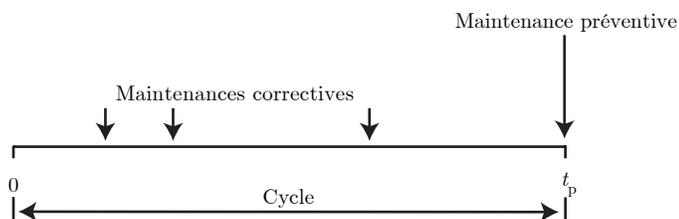


Figure 6.4: Cycle de la maintenance de type bloc (tirée de Jardine et Tsang, 2013)

Ce type de stratégie de maintenance est plus aisé à administrer, puisque les remplacements ont lieu à intervalle régulier et sont facilement planifiables (Barlow et Proschan, 1964). Néanmoins, à l'opposé de la maintenance basée sur l'âge, cette stratégie a parfois un effet de gaspillage, puisqu'une entité peut être remplacée même si elle est neuve. Le ratio $C(t_p)$ sur un horizon infini de temps est donné par Barlow et Hunter (1960) :

$$C(t_p) = \frac{C_f \int_0^{t_p} \lambda(t) dt + C_p}{t_p} \quad (6.6)$$

où C_p est le coût total de la maintenance préventive, C_f est le coût total de la maintenance corrective, $\lambda(t)$ est la fonction du taux de défaillance et t_p est le temps de remplacement préventif. Il est à rappeler que le modèle le plus fréquemment adopté pour la maintenance dite « minimale » est un processus de Poisson non homogène avec la fonction d'intensité suivant une loi de puissance (voir art. 2.8.5). D'ailleurs, il est raisonnable de comparer un processus de réparation minimale avec un processus similaire où la stratégie maintenance de type bloc a lieu (Block et al., 1990). De ce fait, le modèle de la politique de remplacement de type II admet l'hypothèse de la réparation minimale pour une entité réparable. La politique de remplacement considère l'entité réparable caractérisée par le processus de Poisson non homogène avec une intensité de défaillance croissante sujette à deux types de maintenance : soit une réparation minimale affectée après chaque défaillance pour rétablir l'état comme il était avant l'entretien, soit un remplacement préventif pour rétablir l'entité à l'état « comme neuf » à chaque instant prédéterminé t_p . Le coût total par unité de temps sur un horizon infini de temps est alors le suivant :

$$C(t_p) = \frac{C_m \int_0^{t_p} \lambda(t) dt + C_p}{t_p} \quad (6.7)$$

où C_m est le coût total de la réparation minimale entre les instants de remplacement préventif t_p . Le ratio $C(t_p)$ de l'équation (6.7) se reformule comme suit :

$$C(t_p) = \frac{1}{t_p} [C_p + C_m M(t)] = \frac{1}{t_p} \left[C_p + C_m \int_0^{t_p} \lambda(u) du \right] \quad (6.8)$$

En appliquant la dérivée à l'équation (6.8) par rapport à t_p et en égalisant à zéro, la relation pour le temps optimal t_p qui minimise $C(t_p)$ est (Gilardoni et Colosimo, 2007) :

$$\frac{dC(t_p)}{dt_p} = \frac{C_m}{t_p^2} \left[t_p \lambda(t_p) - \int_0^{t_p} \lambda(u) du - \frac{C_p}{C_m} \right] = 0 \quad (6.9)$$

D'après la méthode de l'intégration par parties :

$$\frac{C_p}{C_m} = t_p \lambda(t_p) - \int_0^{t_p} \lambda(u) du = \int_0^{t_p} u \lambda'(u) du \quad (6.10)$$

Alors, le temps de remplacement t_p dans le cadre d'un processus de Poisson non homogène basé sur la loi de puissance est proposé par Coetzee (1997) :

$$t_p = \left[\frac{C_p}{\alpha(\beta - 1)C_m} \right]^{1/\beta} \quad (6.11)$$

Il est important de mentionner qu'aucune solution n'existe si l'intensité de défaillance $\lambda(t)$ est constante ou de type monotone décroissante (Barlow et Hunter, 1960). En conséquence, le temps optimal de remplacement dans une situation de réparation minimale est vrai si et seulement si le paramètre de forme β est supérieur à 1.

6.3 Maintenance préventive séquentielle

Dans le contexte de la stratégie de maintenance séquentielle, l'âge pour lequel la maintenance préventive est programmée n'est plus le même après les maintenances préventives successives, puisqu'il dépend du temps restant de la maintenance (Wang, 2002). En d'autres mots, l'intensité de défaillance évolue entre chaque maintenance préventive et l'intervalle préventif suivant est calculé pour minimiser le coût attendu selon le temps restant. De ce fait, la stratégie de maintenance séquentielle s'applique, en partie, à des entités réparables ayant un processus de maintenance qui ne restaure pas parfaitement l'entité, comme la maintenance minimale ou la maintenance imparfaite (Nakagawa 1986, 1988). La maintenance imparfaite est une maintenance intermédiaire entre la maintenance parfaite et la maintenance minimale (Procaccia et al., 2011).

Les chercheurs [D. Nguyen et Murthy \(1981\)](#) ont introduit une théorie pour la politique de maintenance séquentielle qui impose une maintenance préventive si une défaillance ne s'est pas produite dans le temps de référence t_i , où cette référence temporelle est le temps maximum qu'une entité peut rester sans maintenance après la $(i - 1)^e$ réparation. Le modèle de ces auteurs suit les mêmes généralisations que les politiques de maintenance de type I et de type II provenant de [Barlow et Hunter \(1960\)](#), mais la modélisation considère que l'intensité de défaillance augmente avec le nombre de réparations effectuées. Pour la politique de maintenance séquentielle de type I, l'entité est remplacée après la $(k - 1)^e$ réparation, où k est la variable de décision du remplacement préventif. Dans la première éventualité, l'entité est réparée (ou remplacée si $i = k$) au moment de la panne ou à l'âge t_i . Le ratio optimal du coût attendu par unité de temps pour la politique de maintenance séquentielle de type I est :

$$C(k, t_i) = \frac{(k - 1)C_o + C_r + C_b \sum_{i=1}^k F_i(t_i)}{\sum_{i=1}^k \int_0^{t_i} R_i(t) dt} \quad (6.12)$$

où $R_i(t_i)$ et $F_i(t_i)$ sont respectivement la fonction de fiabilité et la fonction de répartition au temps t_i , t_i est le temps depuis la dernière réparation ou le dernier remplacement, C_o est le coût de réparation, C_r est le coût de remplacement et C_b est le coût de la panne. Le coût C_b représente tous les coûts supplémentaires causés par une défaillance et est généralement le même pour la réparation et le remplacement. En appliquant la dérivée en fonction du temps t_i à l'équation (6.12) et en égalisant à zéro, la condition nécessaire minimisant le ratio est donnée par [D. Nguyen et Murthy \(1981\)](#) :

$$\lambda_i(t_i) = \frac{C(k, t_i)}{C_b} \quad 1 < i \leq k \quad (6.13)$$

où $\lambda_i(t_i)$ est le taux de défaillance au temps t_i sujet à la $(i - 1)^e$ réparation. En tenant compte des équations (6.12) et (6.13), les conditions nécessaires pour obtenir le coût minimum attendu par unité de temps sont :

$$\lambda_i(t_i) = \lambda_1(t_1) \quad (6.14)$$

$$\sum_{i=1}^k \left\{ \lambda_1(t_1) \int_0^{t_i} R_i(t) dt - F_i(t_i) \right\} = \frac{(k - 1)C_o + C_r}{C_b} \quad (6.15)$$

Pour continuer avec la politique de maintenance séquentielle de type II, l'entité est toujours réparée (ou remplacée si $i = k$) à l'âge t_i . En cas de panne, une réparation minimale est effectuée. La minimisation du coût prévu par unité de temps de la politique de maintenance séquentielle de type II est donnée par l'équation suivante :

$$C(k, t_i) = \frac{(k-1)C_o + C_r + C_m \sum_{i=1}^k \int_0^{t_i} \lambda_i(t) dt}{\sum_{i=1}^k t_i} \quad (6.16)$$

où C_m est le coût de la réparation minimale entre les instants t_i . En appliquant la même logique que la politique de maintenance de type I à l'équation (6.16), les conditions nécessaires pour optimiser le modèle de la politique de maintenance de type II sont :

$$\lambda_i(t_i) = \frac{C(k, t_i)}{C_m} \quad 1 < i \leq k \quad (6.17)$$

$$\lambda_i(t_i) = \lambda_1(t_1) \quad (6.18)$$

$$\sum_{i=1}^k \left\{ t_i \lambda_1(t_1) - \int_0^{t_i} \lambda_i(t) dt \right\} = \frac{(k-1)C_o + C_r}{C_m} \quad (6.19)$$

L'un des inconvénients de la stratégie de maintenance séquentielle est que les intervalles de temps entre les maintenances ne sont pas égaux et, en conséquence, il est improductif de la mettre en œuvre de façon systématique (Wang, 2002).

6.4 Étude des composants critiques réparables

La sélection des composants critiques de cette étude prend en considération la criticité et les actions préventives existantes. Un examen est effectué sur un échantillon qui comporte trois modèles de foreuse (composant) et un modèle de boulonneuse (composant). Ces derniers sont considérés comme réparables et il faut tenir compte de tous les processus stochastiques dans la résolution du modèle. Les composants critiques, ainsi que leur temps de maintenance préventive actuellement programmé dans le système JDE sont disponibles au tableau 6.1. Les détails des calculs réalisés pour les ratios des maintenances C_f/C_p présents dans ce tableau sont relatés à la section 6.6. Il est à noter que l'intervalle de remplacement préventif programmé dans le système de maintenance de la mine se base sur un temps maximal auquel il est rentable d'effectuer une réparation du composant.

De manière explicite, au-delà de 500 heures de percussion (intervalle de la maintenance préventive), la réparation du composant chez le fabricant a de fortes probabilités d'être plus dispendieuse que d'acquérir une nouvelle foreuse. Donc, la réparation n'est pas rentable lorsque ce temps prescrit est dépassé. Ensuite, pour le mécanisme de rotation/percussion de boulons, soit la boulonneuse (composant), l'intégration de compteur d'heures de percussion n'est pas installable pour ce modèle et la maintenance préventive systématique de ce composant critique est programmée en nombre de jours. Cet intervalle de maintenance est de 243 jours et correspond approximativement à 500 heures de percussion pour un équipement de type boulonneuse.

Tableau 6.1: Maintenance préventive actuelle et ratio des coûts des composants critiques

Composant critique	Équipement	MP actuelle	Ratio C_f/C_p
Foreuse RDXXX	BO2102-03	500 h	1,39
Foreuse RDXXX	BO1111-15	500 h	1,54
Boulonneuse HBXXX	BO1111-15	≈ 500 h [†]	1,54
Foreuse HLXXX1	FO2103-04	500 h	1,52
Foreuse HLXXX2	FO2106-07	500 h	1,52

[†] Équivalent à 243 jours d'opération.

6.5 Choix des modèles

L'utilisation des stratégies de maintenance périodique introduites constitue une avenue intéressante pour minimiser les coûts en fonction d'un temps de remplacement préventif. Par une simulation économique, la présente étude analyse les modèles des stratégies de remplacement de type âge et de type bloc. Elle vérifie si ces stratégies sont applicables aux situations des composants critiques contenus dans l'échantillon sélectionné, tout en les comparant avec les autres temps de remplacement proposés. Outre les modèles des maintenances préventives périodiques, une attention particulière est accordée au temps moyen de remplacement provenant de l'analyse avec approche fiabiliste, qui tient compte de la connaissance de l'état de dégradation de l'entité. À partir des modèles stochastiques des interventions, les différents temps optimaux des stratégies de maintenance peuvent être obtenus à l'aide des algorithmes de résolution de l'outil automatisé. Dans le cas exceptionnel où il est remarqué que l'état du composant admet une évolution de l'intensité de défaillance de type monotone croissante ($\beta > 1$), la stratégie de la maintenance séquentielle peut être envisageable.

Afin de vérifier la cohérence des résultats et de trouver la meilleure stratégie de maintenance à adopter selon le temps optimal, ces estimations sont comparées entre elles, ainsi qu'avec le temps de remplacement actuellement défini par le département de maintenance de la mine. La stratégie d'optimisation de remplacement est visible à la figure 6.5.

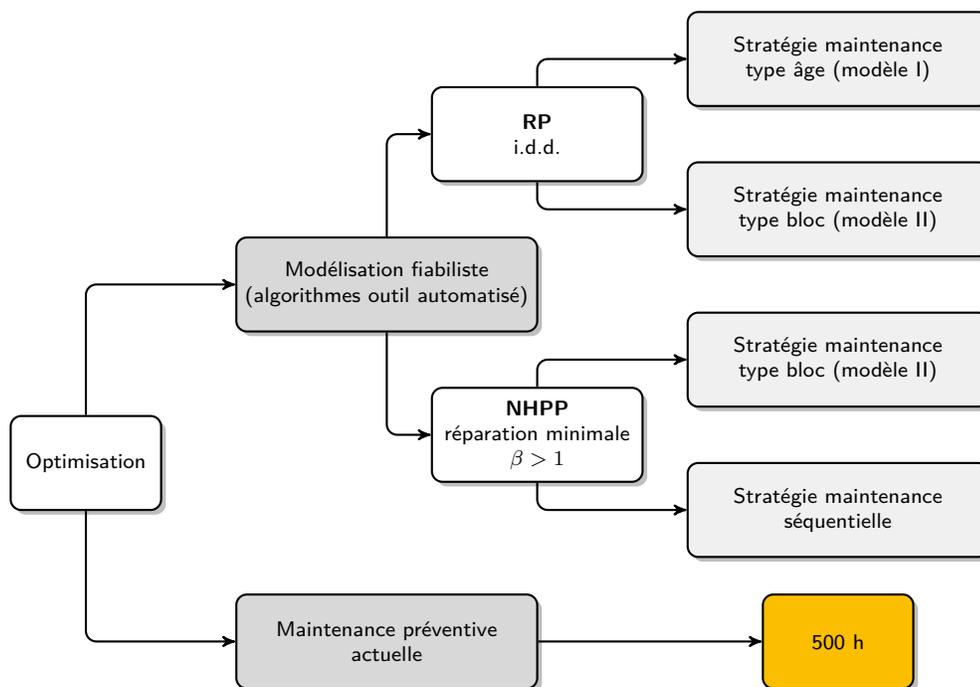


Figure 6.5: Stratégie d'optimisation de remplacement

6.6 Description des coûts

Deux types de coûts sont à distinguer pour les stratégies de type âge et de type bloc : les coûts directs et les coûts indirects, dont chacun comprend ses spécificités (Ben-Daya et al., 2016). Par ailleurs, il est raisonnable de supposer que la réalisation d'une maintenance corrective est plus dispendieuse que dans le cas d'une maintenance préventive dans la majorité des situations.

6.6.1 Coûts directs

Les coûts directs sont attribués autant pour la maintenance préventive que pour la maintenance corrective et sont caractérisés par des coûts physiques, tels que le matériel et la main-d'œuvre. Le coût du matériel, noté C_M , couvre l'achat de toutes les pièces de rechange nécessaires à la réalisation de la maintenance. Le coût de la main-d'œuvre, noté C_L , est le taux horaire du personnel d'entretien multiplié par le temps de la maintenance.

6.6.2 Coûts indirects

Les coûts indirects sont les conséquences économiques en raison des pertes de production liées à l'arrêt d'un équipement. La définition des coûts indirects est applicable pour la maintenance corrective. Il est important de ne pas sous-estimer ces coûts étant donné que dans certaines industries de production, ils peuvent dépasser les coûts directs (Gölbaşı, 2015). La première catégorie de coûts indirects tient compte de l'inaction des opérateurs. Le coût d'inaction prend en considération le taux horaire des opérateurs multiplié par le temps d'inaction et il est noté C_I . Le temps d'inaction tient pour acquis le délai d'attente par l'équipe de l'opération et, si requis, du temps pour échanger d'équipement. Puisque certains équipements en maintenance sont susceptibles d'affecter la production globale d'une mine, la deuxième catégorie des coûts indirects tient compte du déficit engendré par l'inaction de l'équipement. Il est défini par la perte de profit de la production minière par heure multipliée par le temps d'inaction et il est noté L_P .

6.6.3 Coûts totaux

À l'égard de la description des coûts directs, il est possible de déterminer le coût total pour la maintenance préventive, noté C_p . Ce coût total est la somme des coûts du matériel et des coûts de la main-d'œuvre :

$$C_p = C_M + C_L \quad (6.20)$$

Le coût total de la maintenance corrective, noté C_f , est la sommation des coûts directs et indirects :

$$C_f = [C_M + C_L] + [C_I + L_P] \quad (6.21)$$

Le sommaire des ratios des coûts totaux de la maintenance corrective par rapport aux coûts totaux de la maintenance préventive (C_f/C_p) de chaque composant de l'étude est intégré au tableau 6.1. Dans la situation de la mine partenaire, le coût moyen d'une maintenance corrective est de l'ordre de 39 % à 54 % plus dispendieux qu'une maintenance préventive pour les équipements miniers mobiles présents dans l'échantillon.

6.7 Résultats et discussion

Le tableau 6.2 montre les composants critiques avec leur modélisation par l'approche fiabiliste, ainsi que les temps de remplacement optimisés en fonction des stratégies de maintenance de type âge et de type bloc. Les graphiques des temps d'optimisation en fonction de la modélisation de ces stratégies pour les composants critiques sont disponibles à travers les figures 6.6 à 6.35. Pour les modèles de remplacement périodique, le point minimal d'optimisation repéré devient un intervalle de temps candidat afin de minimiser les coûts de maintenance. Pour valider ce point candidat, celui-ci doit être inférieur à la durée de vie moyenne du composant. Dans le but de démontrer les évolutions des courbes et des temps de remplacement en fonction de l'écart entre les totaux des coûts de la maintenance corrective C_f et de la maintenance préventive C_p , quatre ratios fictifs complémentaires ($C_f/C_p = 2$, $C_f/C_p = 3$, $C_f/C_p = 4$, $C_f/C_p = 5$) ont été ajoutés pour chaque composant, en plus des ratios réels définis au tableau 6.1. Parmi cette étude de cas, les graphiques des stratégies de maintenance de la foreuse RDXXX pour la boulonneuse à plateforme BO2102 ne sont pas représentés puisque le processus définissant les données recueillies est caractérisé par une intensité de défaillance monotone décroissante, ce qui ne permet pas de modéliser selon les stratégies de maintenance de type âge, de type bloc ou séquentielle.

À titre indicatif, quelques graphiques du temps de remplacement optimisé de type âge en fonction du ratio minimal (coût total par heure) sont ciblés, de manière respective, avec point d'optimisation aux figures 6.6 et 6.8, et sans point d'optimisation à la figure 6.10. Les graphiques des figures 6.6 et 6.8 montrent une modélisation convergeant vers un point d'optimisation par la stratégie de maintenance de type âge avec des ratios réels $C_f/C_p = 1,39$ et $C_f/C_p = 1,54$. Dans la situation de la figure 6.8, la courbe pointe vers un point candidat de minimisation, qui est davantage un point d'équilibre qu'un point d'optimisation, tel que démontré avec les ratios fictifs ($C_f/C_p = 2, 3, 4, 5$). Pour la courbe présentée à la figure 6.10, il est prouvé qu'il n'y a pas de temps optimal pour la maintenance préventive étant donné que le coût par unité d'âge diminue constamment dans le temps et que le modèle ne permet pas de converger vers un point minimal compris dans l'intervalle d'observation. Ensuite, dans le cadre des ratios fictifs complémentaires ajoutés aux courbes comprises entre la figure 6.6 et la figure 6.35, il est observable que plus le ratio du coût total de la maintenance corrective est grand par rapport au coût total de la maintenance préventive, plus l'optimum atteint un temps de remplacement préventif faible. Cependant, cela a pour inconvénient d'engendrer un ratio des coûts totaux par temps plus élevé.

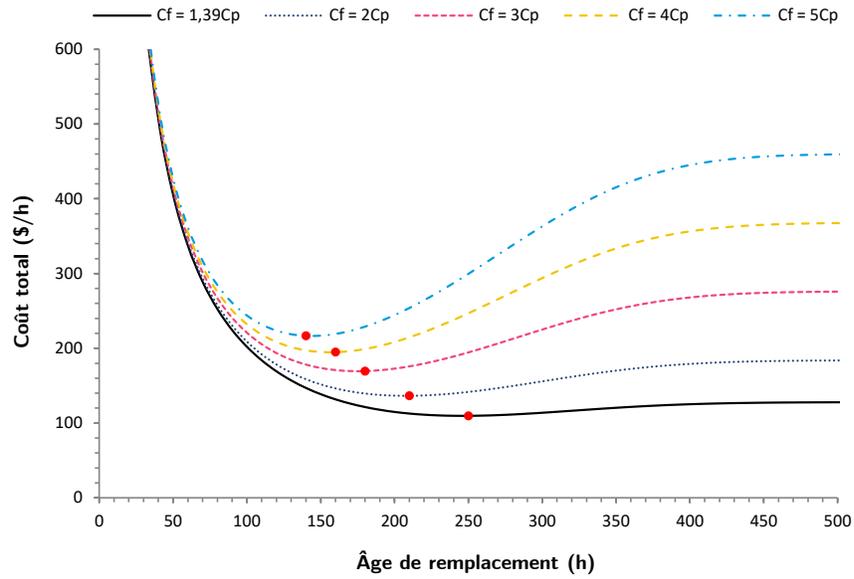


Figure 6.6: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO2103]

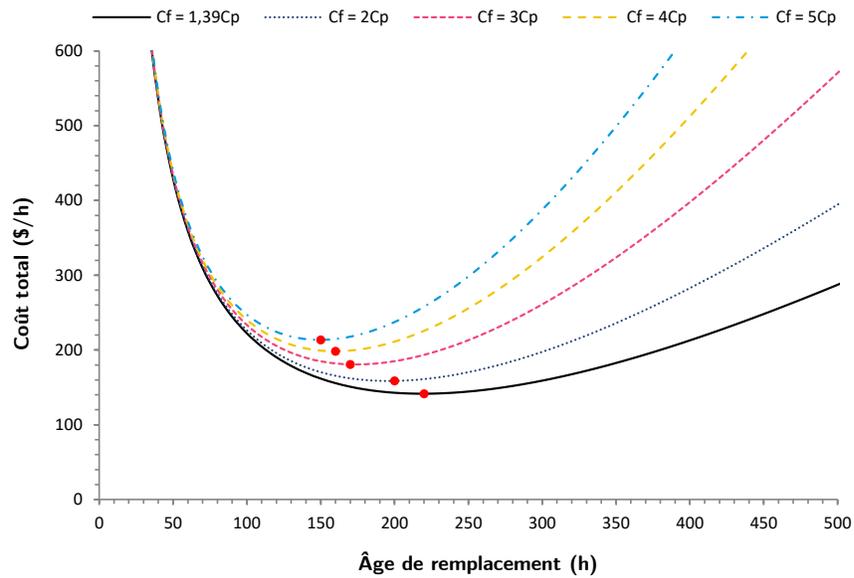


Figure 6.7: Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse RDXXX [BO2103]

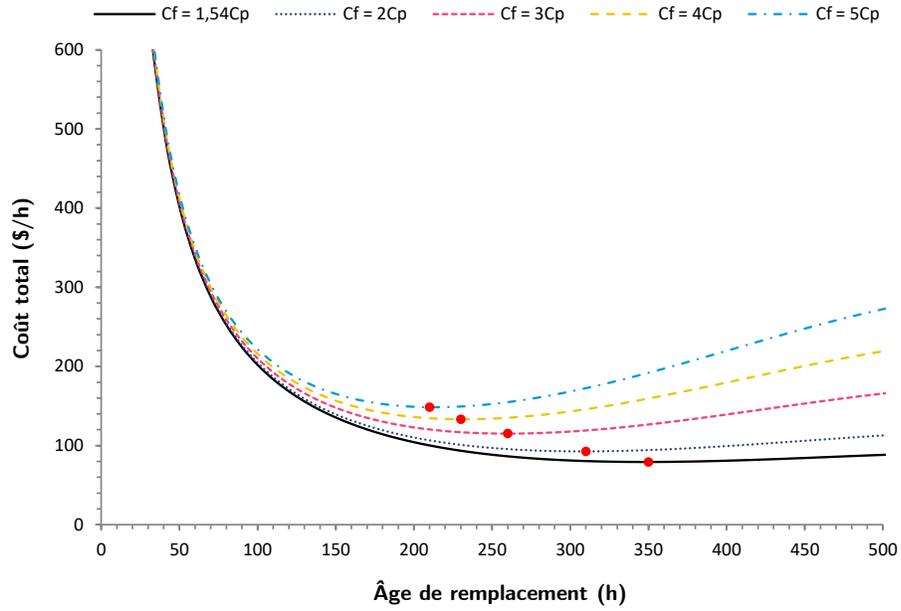


Figure 6.8: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1111]

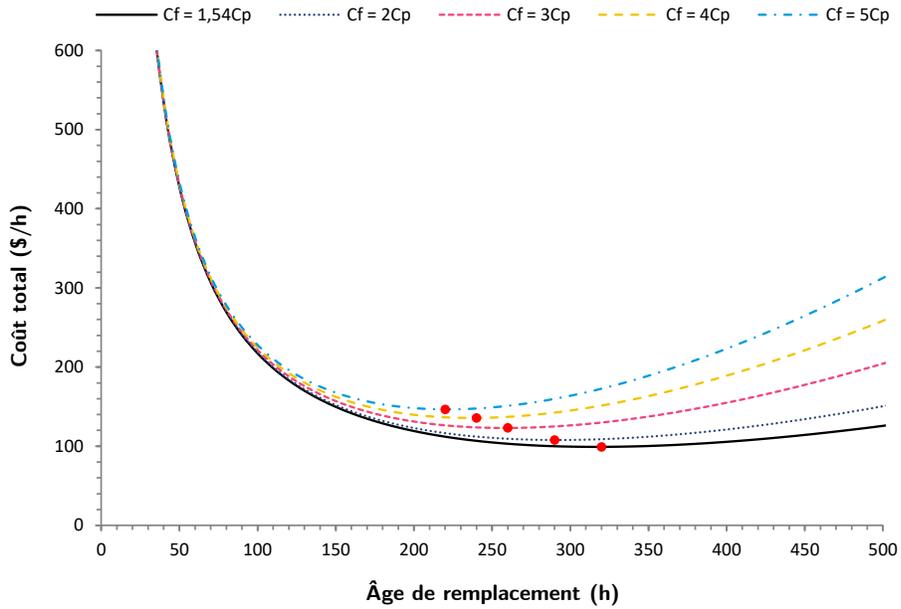


Figure 6.9: Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse RDXXX [BO1111]

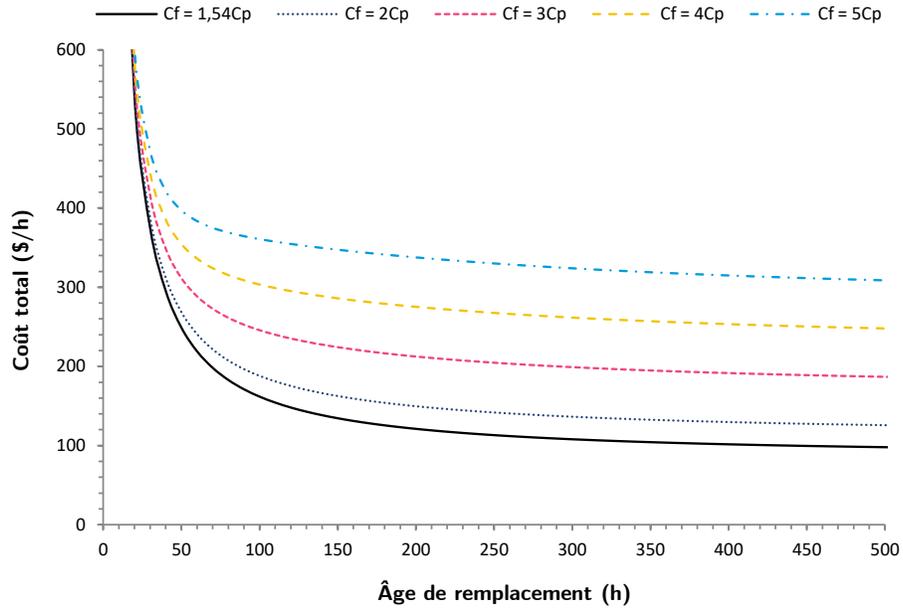


Figure 6.10: Temps de remplacement optimisé de type âge - boulonneuse HBXXX [BO1111]

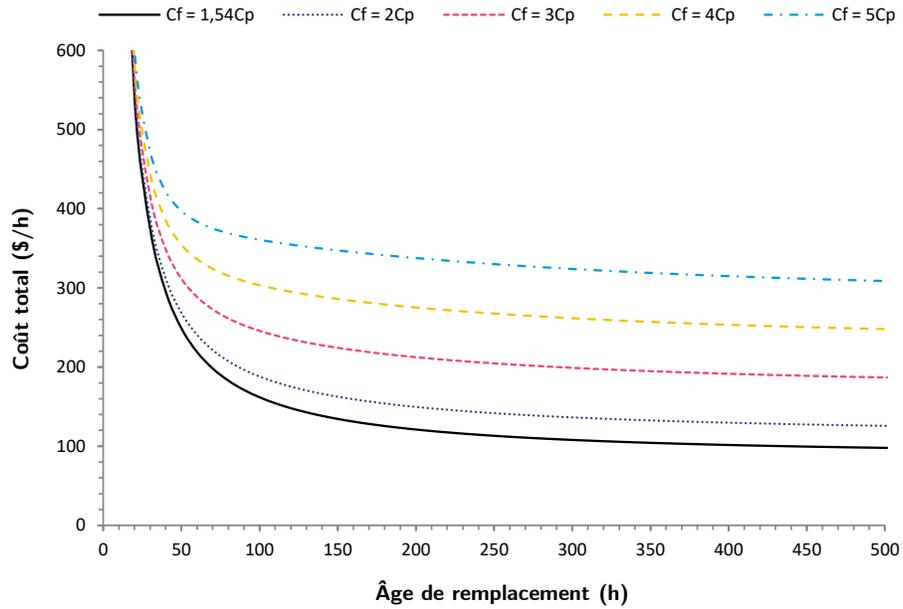


Figure 6.11: Temps de remplacement optimisé de type bloc - boulonneuse HBXXX [BO1111]

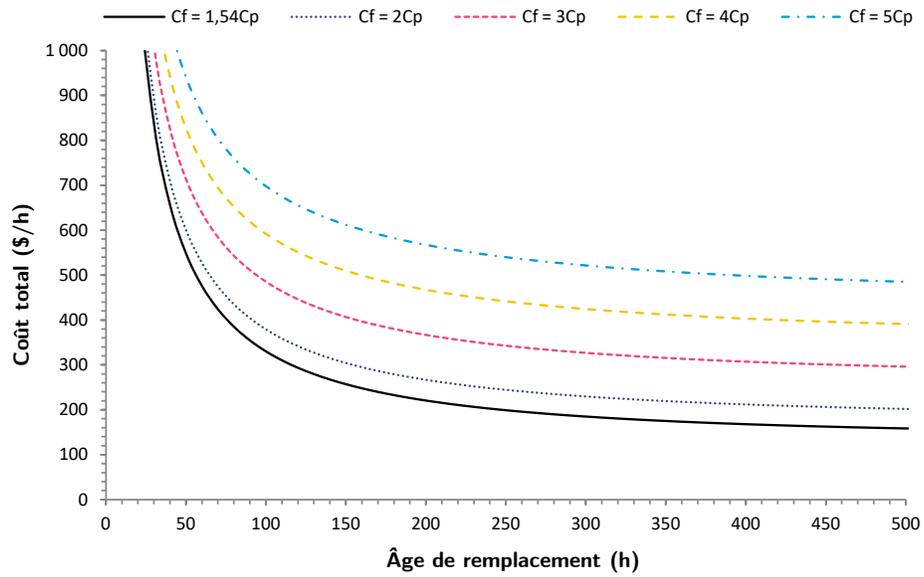


Figure 6.12: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1112]

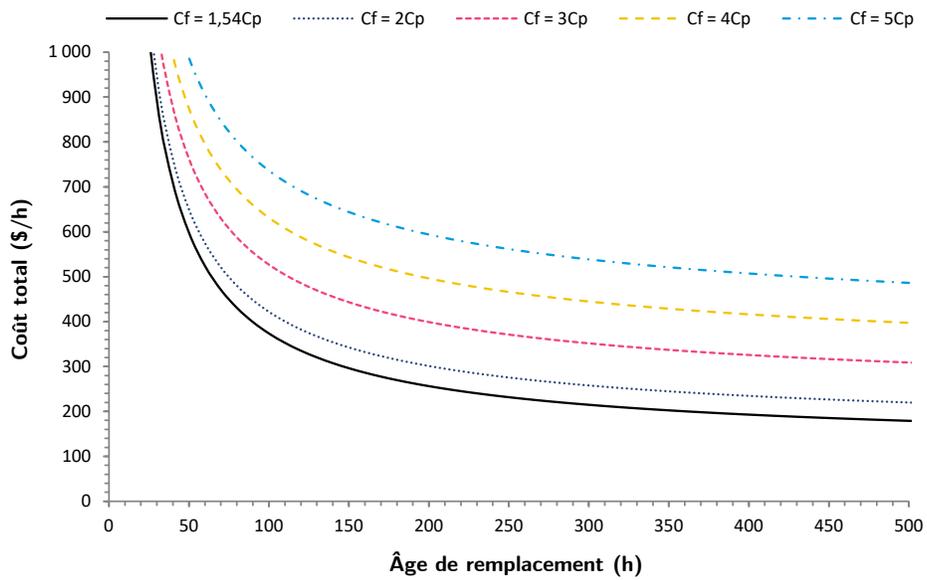


Figure 6.13: Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse RDXXX [BO1112]

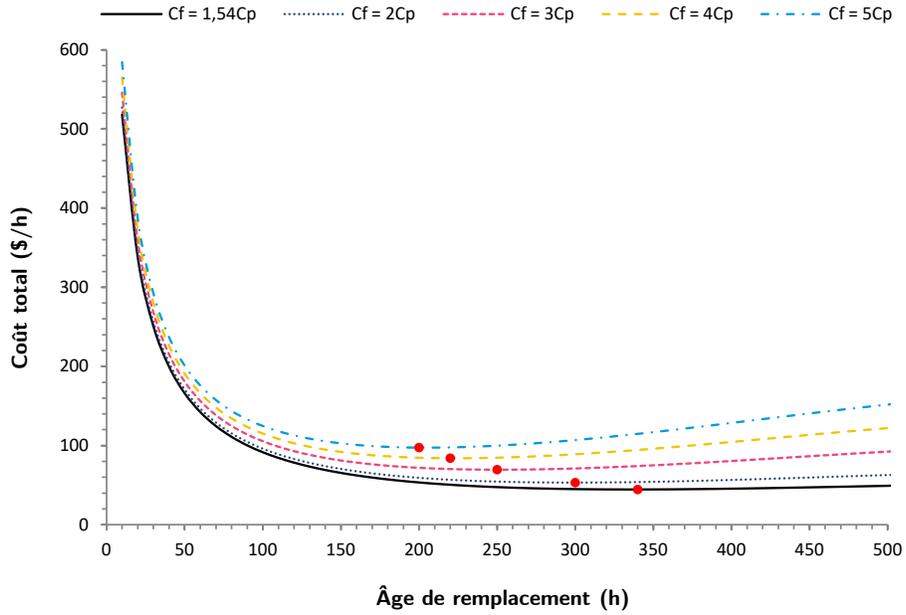


Figure 6.14: Temps de remplacement optimisé de type âge - boulonneuse HBXXX [BO1112]

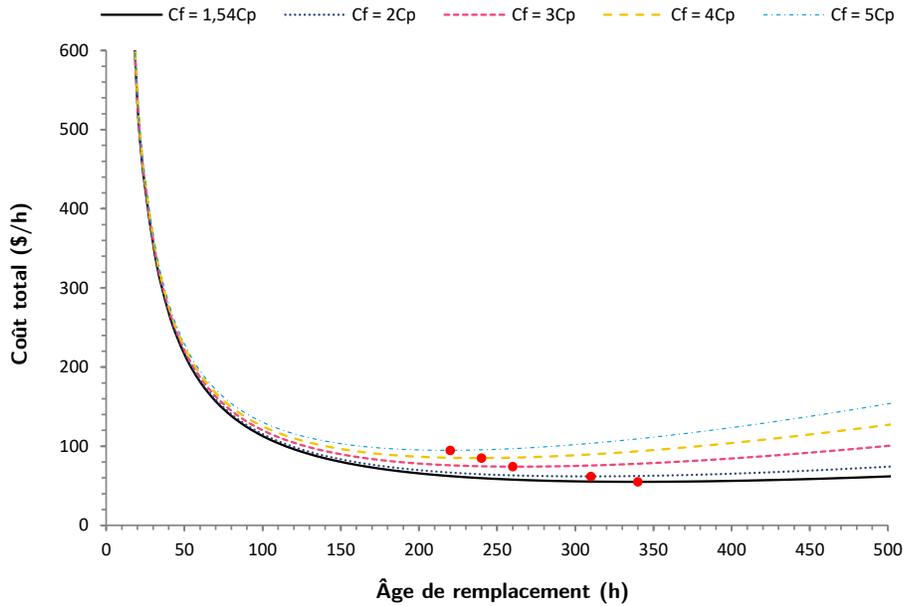


Figure 6.15: Temps de remplacement optimisé de type bloc - boulonneuse HBXXX [BO1112]

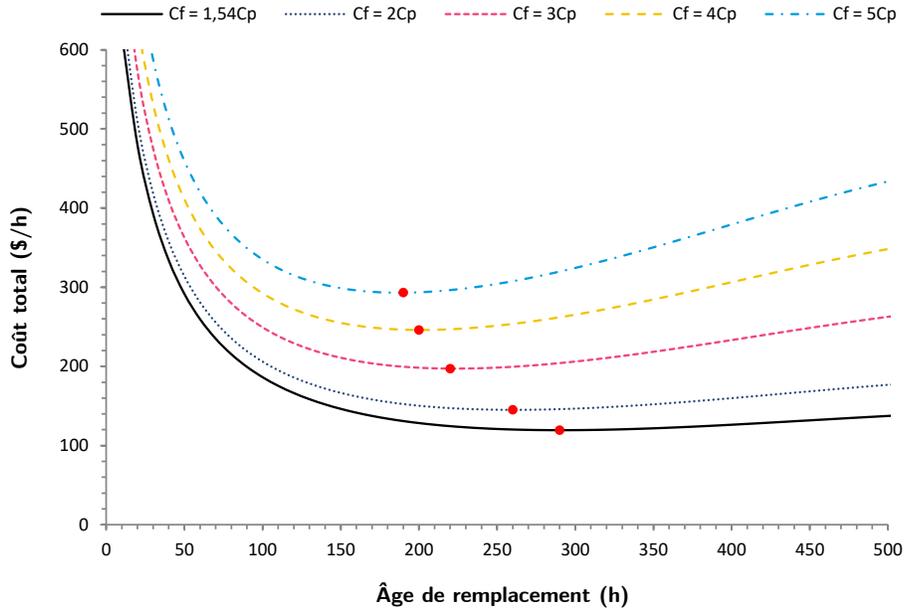


Figure 6.16: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1113]

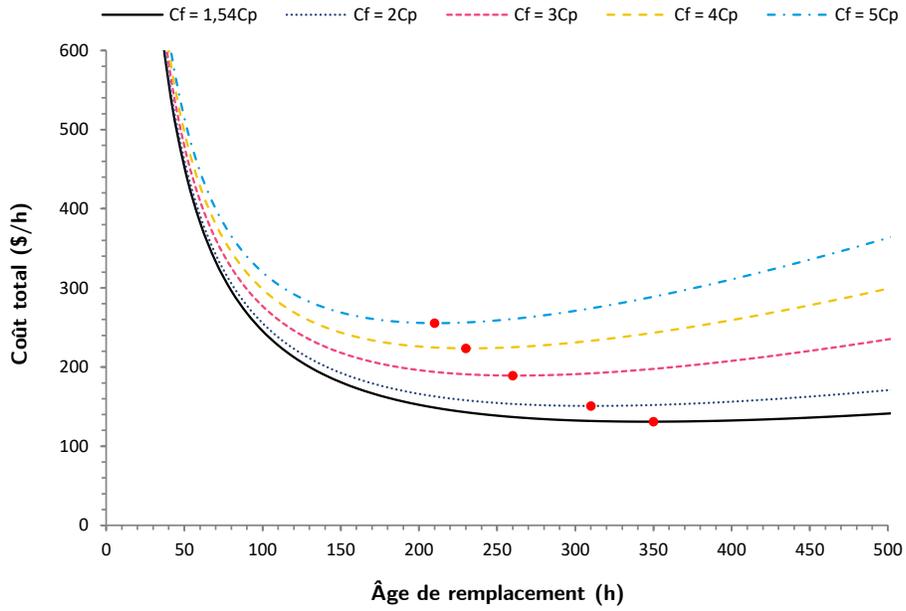


Figure 6.17: Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse RDXXX [BO1113]

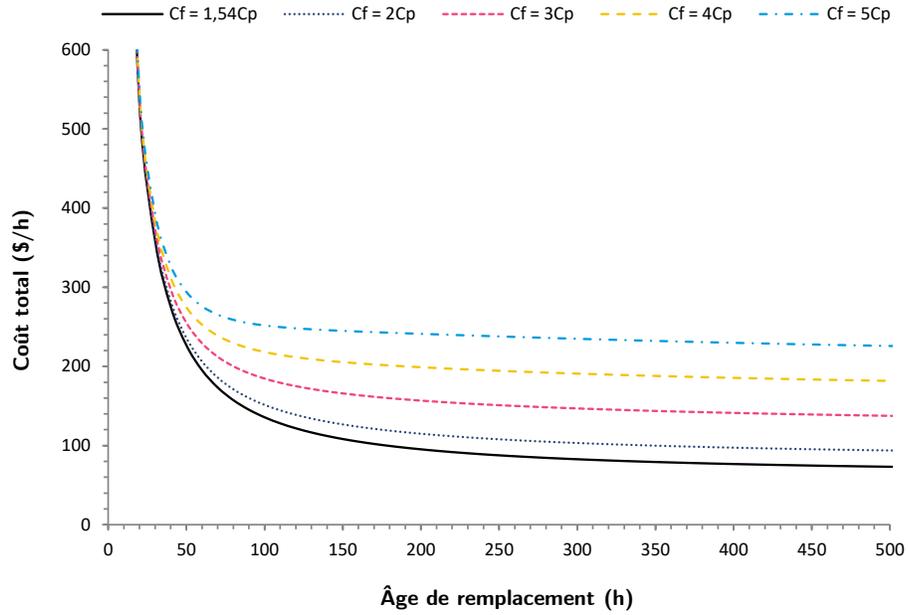


Figure 6.18: Temps de remplacement optimisé de type âge - boulonneuse HBXXX [BO1113]

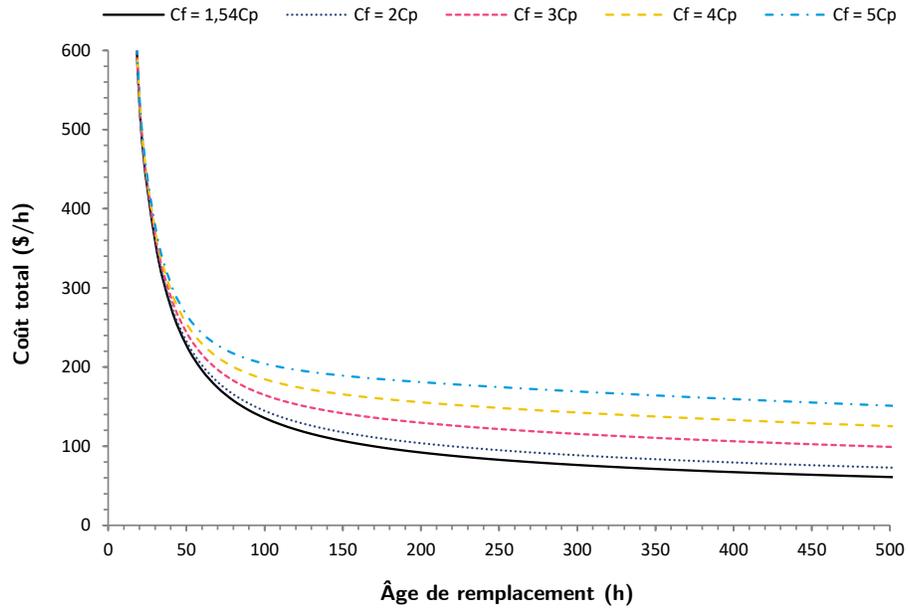


Figure 6.19: Temps de remplacement optimisé de type bloc - boulonneuse HBXXX [BO1113]

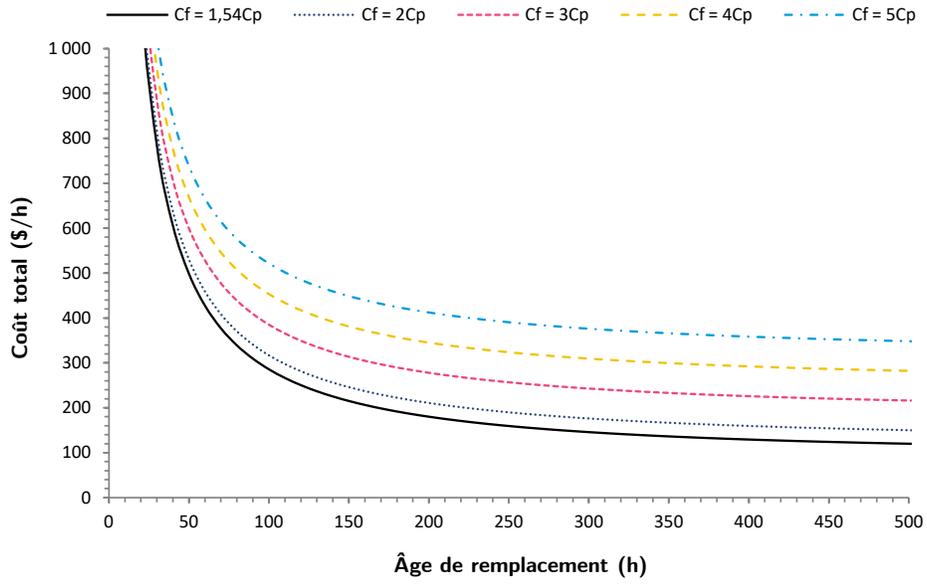


Figure 6.20: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1114]

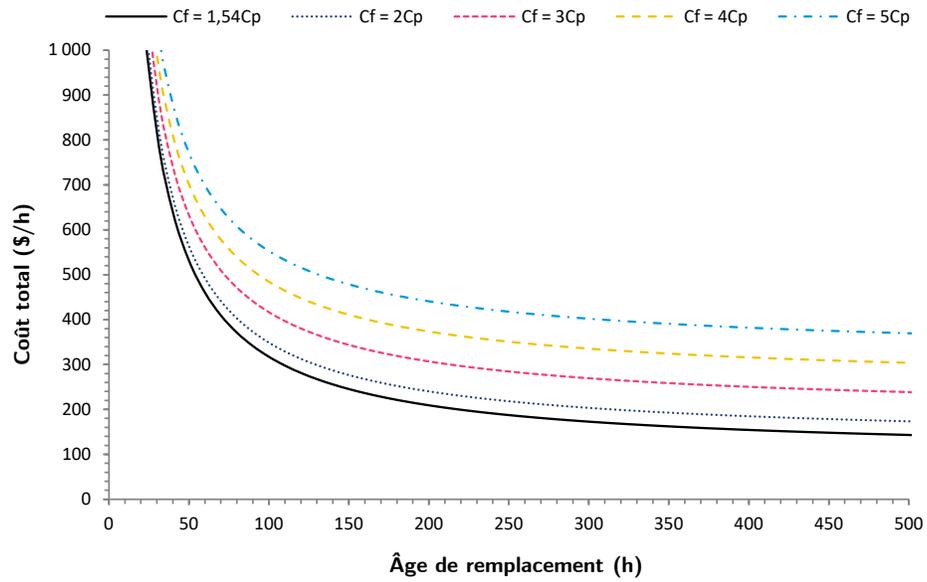


Figure 6.21: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1114]

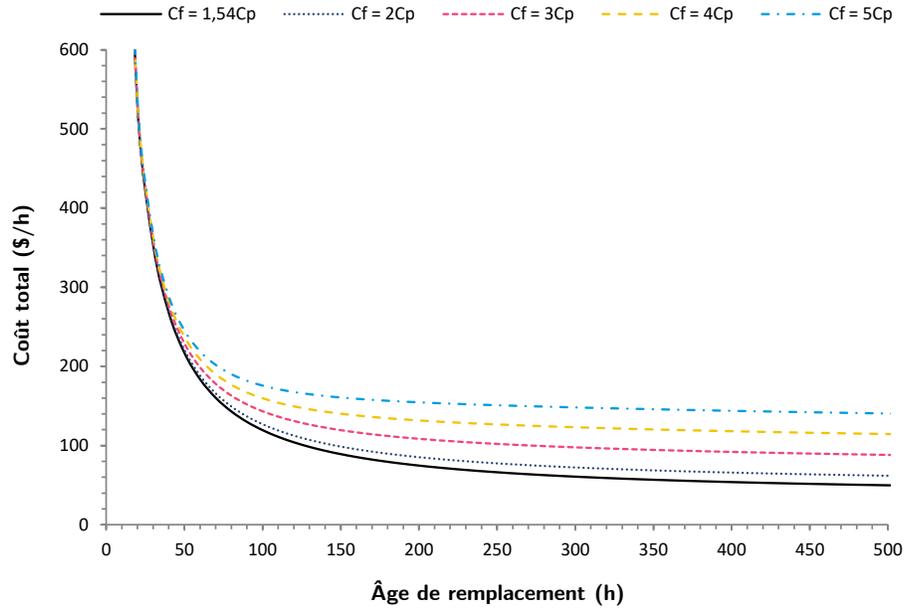


Figure 6.22: Temps de remplacement optimisé de type âge - boulonneuse HBXXX [BO1114]

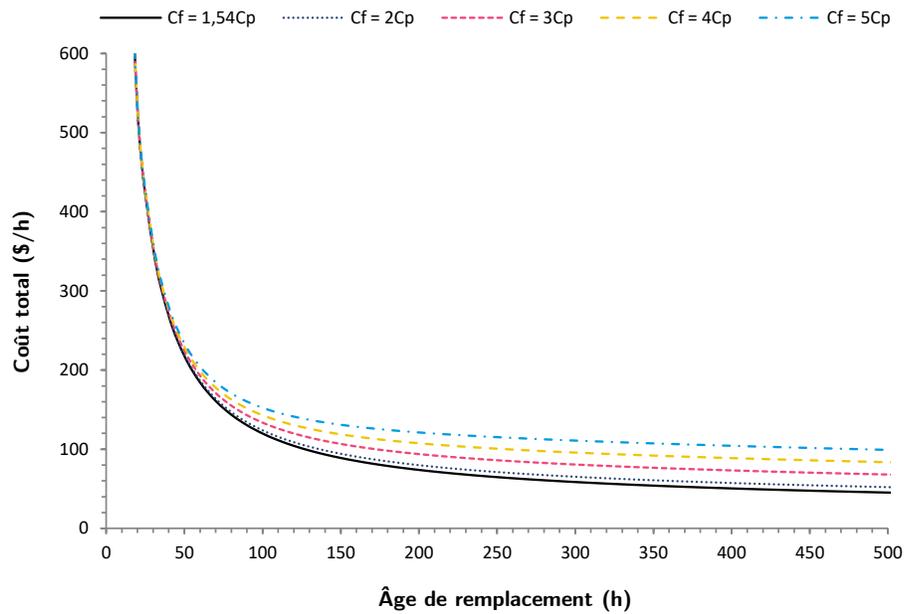


Figure 6.23: Temps de remplacement optimisé de type bloc - boulonneuse HBXXX [BO1114]

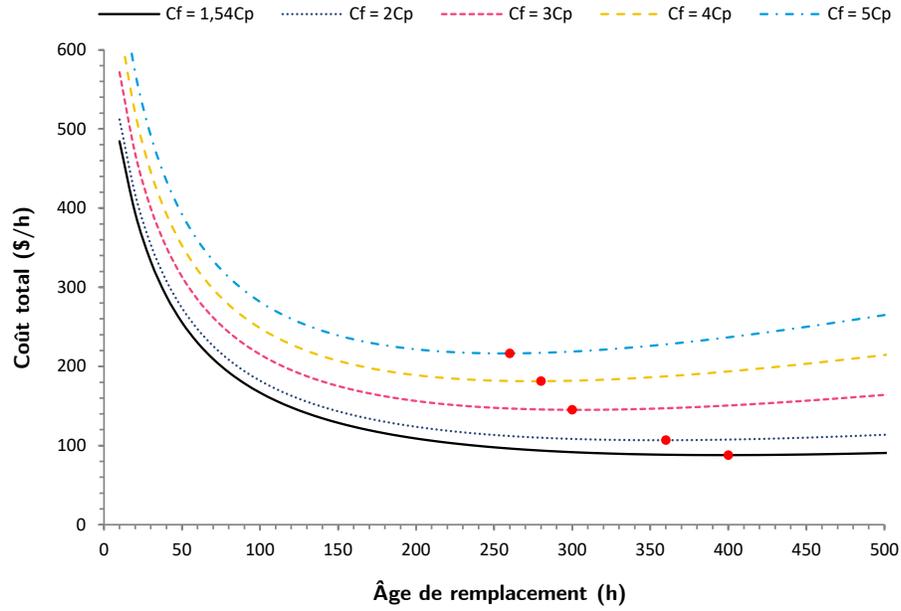


Figure 6.24: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1115]

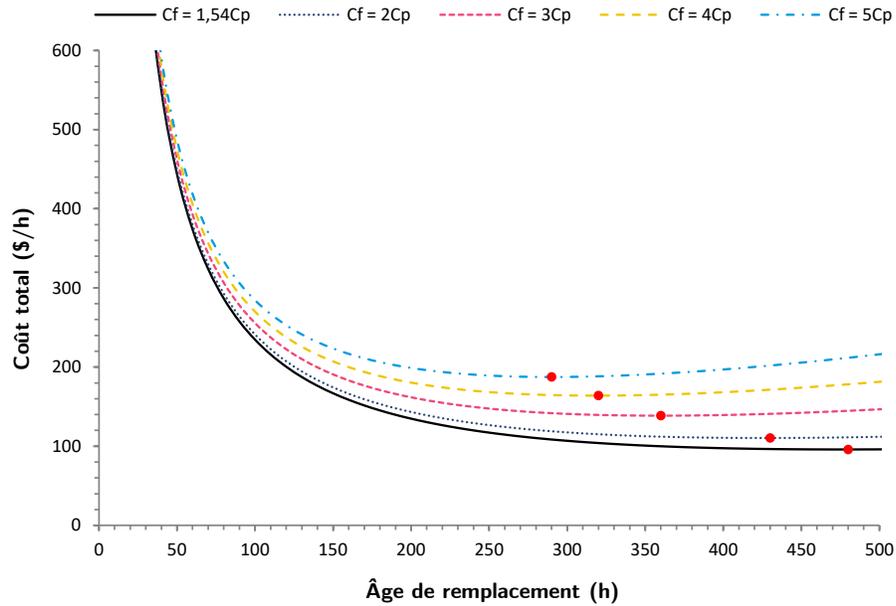


Figure 6.25: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse RDXXX [BO1115]

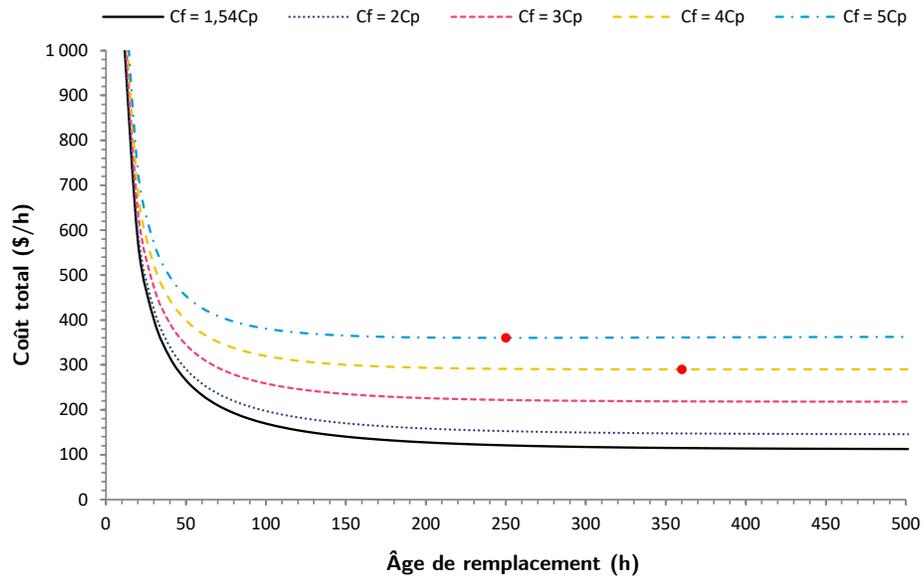


Figure 6.26: Temps de remplacement optimisé de type âge - boulonneuse HBXXX [BO1115]

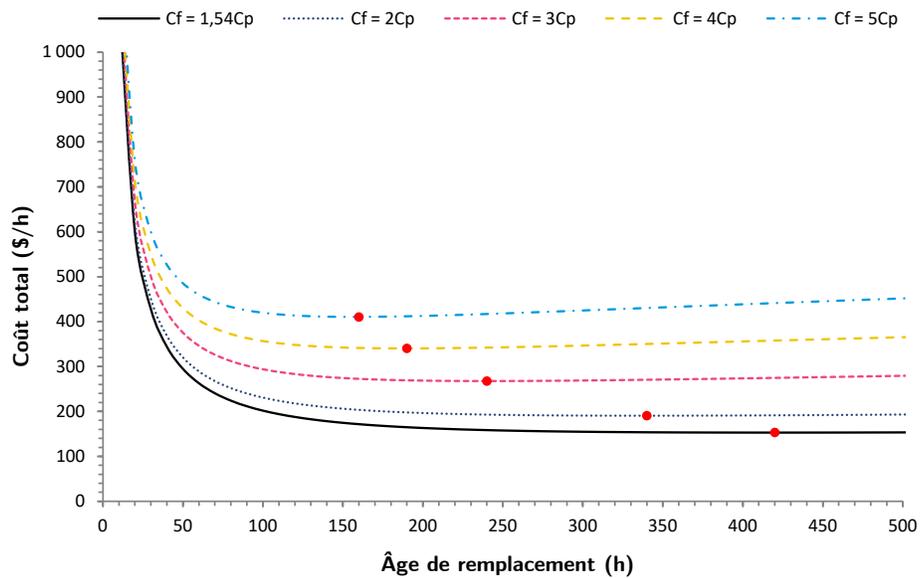


Figure 6.27: Temps de remplacement optimisé de type bloc - boulonneuse HBXXX [BO1115]

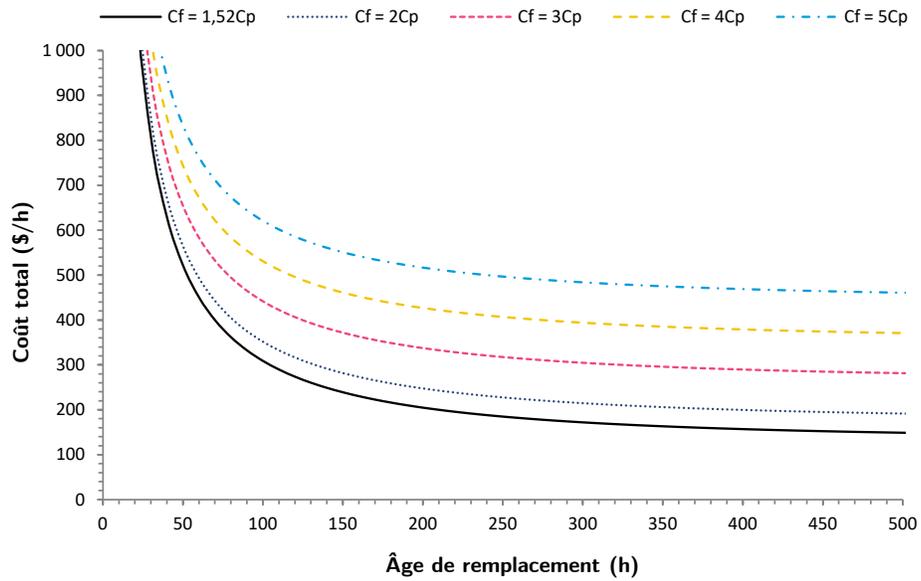


Figure 6.28: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse HLXXX1 [FO2103]

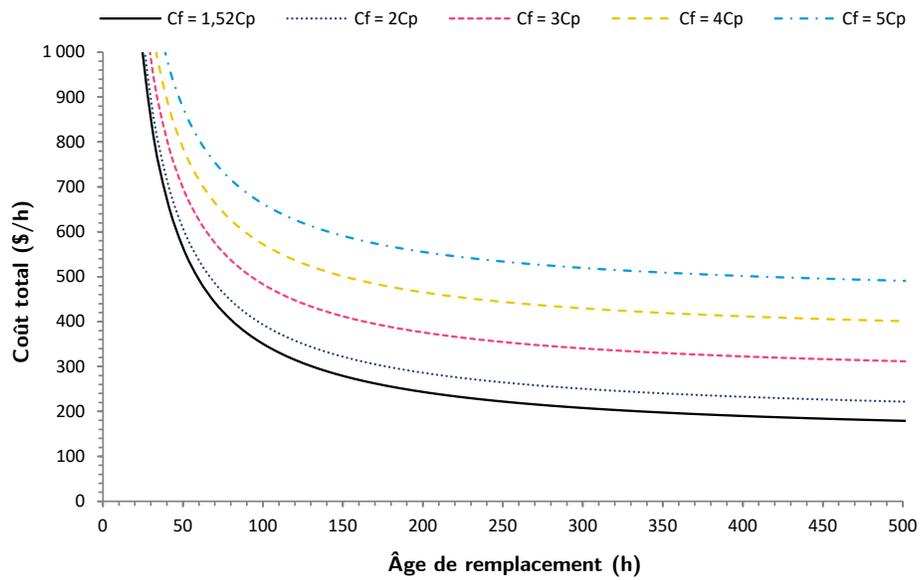


Figure 6.29: Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse HLXXX1 [FO2103]

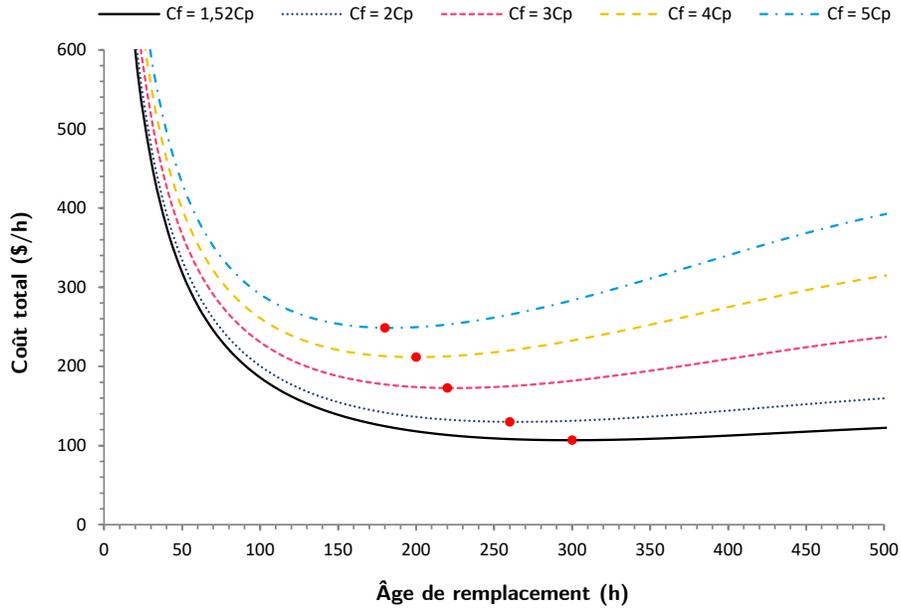


Figure 6.30: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse HLXXX1 [FO2104]

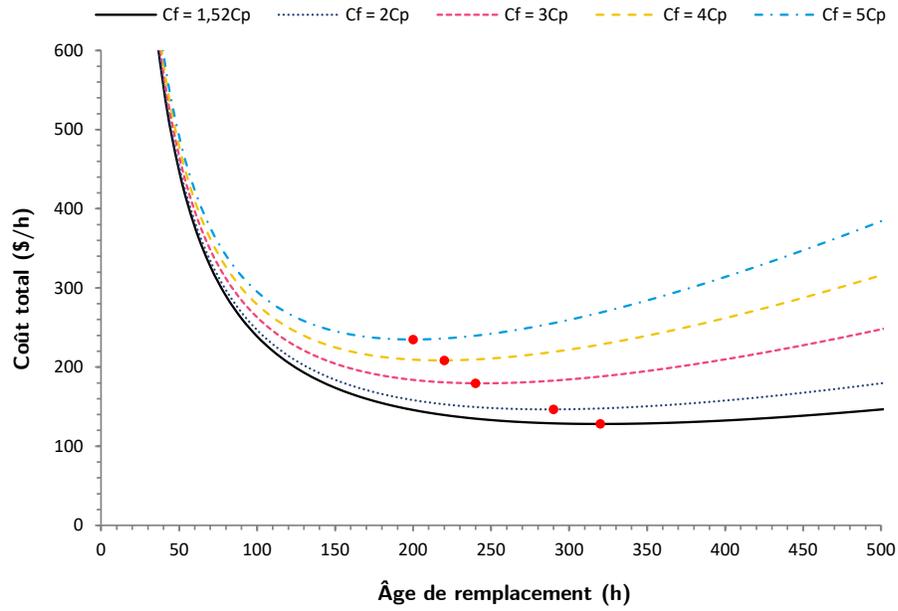


Figure 6.31: Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse HLXXX1 [FO2104]

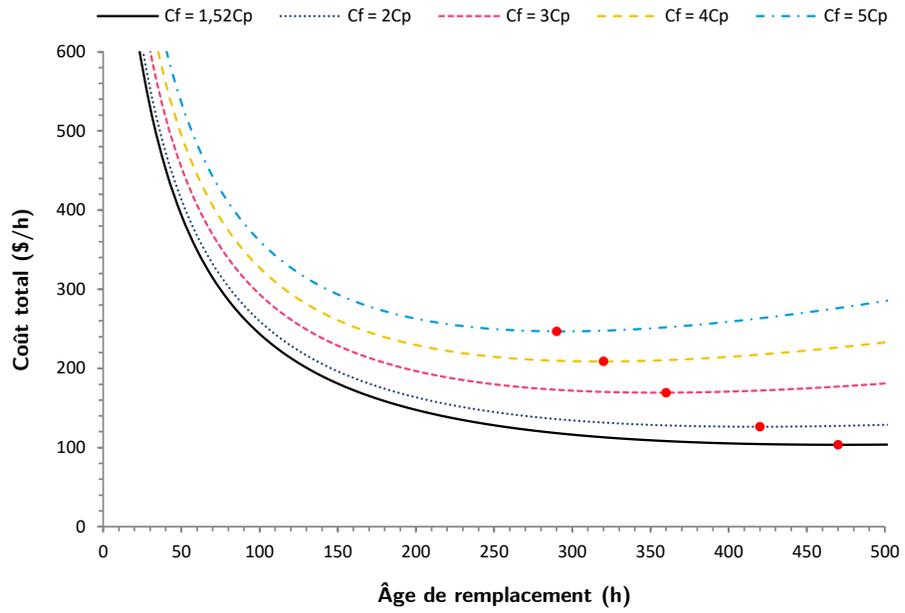


Figure 6.32: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse HLXXX2 [FO2106]

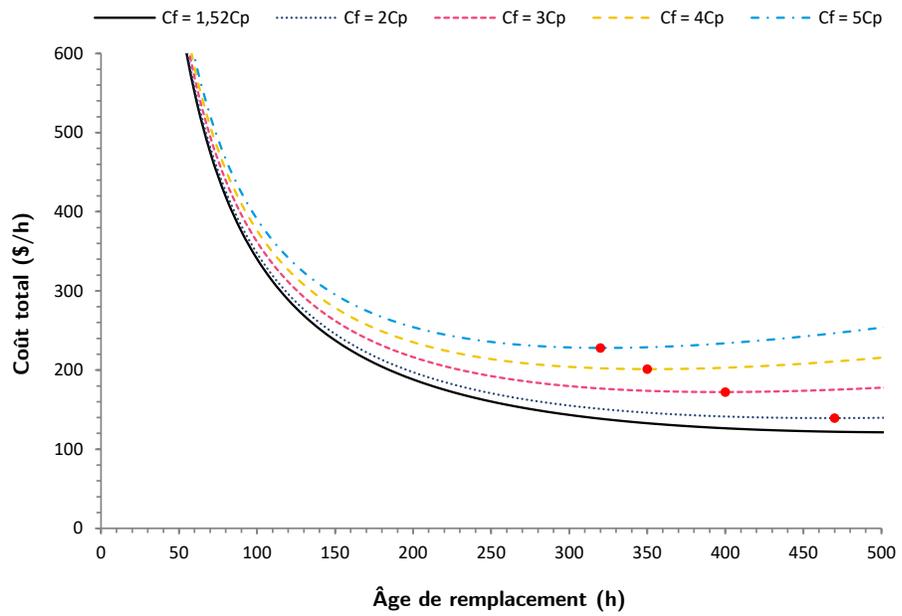


Figure 6.33: Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse HLXXX2 [FO2106]

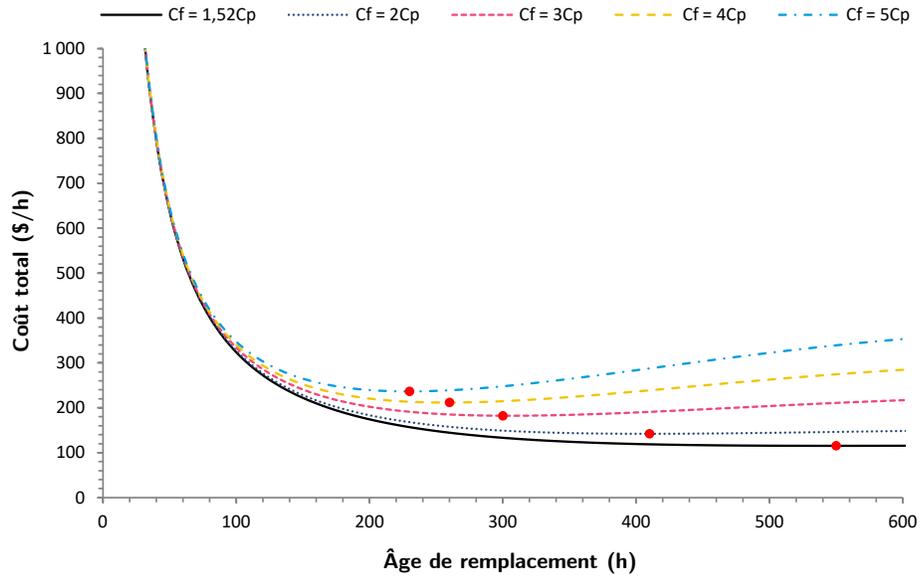


Figure 6.34: Temps de remplacement optimisé de type âge - foreuse HLXXX2 [FO2107]

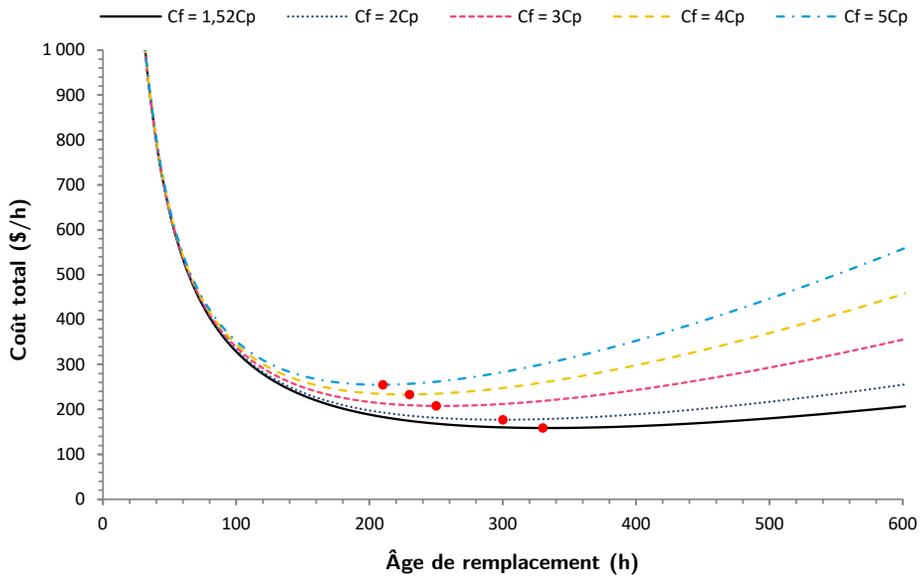


Figure 6.35: Temps de remplacement optimisé de type bloc - foreuse HLXXX2 [FO2107]

Tableau 6.2: Loi, estimation des paramètres et temps de remplacement

Équipement	Composant critique	Approche fiabiliste			MP actuelle (h)	Remplacement optimisé type âge (h)	Remplacement optimisé type bloc (h)
		Loi	Paramètres	MTBF (h)			
BO2102	Foreuse RDXXX (n = 15)	Non i.i.d. NHPP	$\alpha = 2,27 \times 10^{-1}$ $\beta = 0,51$	387	500	-	-
BO2103	Foreuse RDXXX (n = 6)	normale	$\mu = 230,80$ $\sigma = 83,64$	231	500	250	220
BO1111	Foreuse RDXXX (n = 9)	normale	$\mu = 340,75$ $\sigma = 126,83$	341	500	350	320
	Boulonneuse HBXXX (n = 18)	log-normale	$\mu = 4,75$ $\sigma = 0,95$	182	500	Pas de point minimal	Pas de point minimal
BO1112	Foreuse RDXXX (n = 12)	Weibull	$\alpha = 219,83$ $\beta = 0,90$	232	500	Pas de point minimal	Pas de point minimal
	Boulonneuse HBXXX (n = 8)	normale	$\mu = 296,86$ $\sigma = 161,24$	297	500	340	340
BO1113	Foreuse RDXXX (n = 14)	normale	$\mu = 215,77$ $\sigma = 183,43$	216	500	290	350
	Boulonneuse HBXXX (n = 12)	log-normale	$\mu = 5,12$ $\sigma = 0,90$	250	500	Pas de point minimal	Pas de point minimal
BO1114	Foreuse RDXXX (n = 10)	Weibull	$\alpha = 312,16$ $\beta = 0,98$	325	500	Pas de point minimal	Pas de point minimal
	Boulonneuse HBXXX (n = 7)	log-normale	$\mu = 5,62$ $\sigma = 0,96$	438	500	Pas de point minimal	Pas de point minimal
BO1115	Foreuse RDXXX (n = 8)	normale	$\mu = 292,57$ $\sigma = 252,43$	293	500	400	480
	Boulonneuse HBXXX (n = 17)	Weibull	$\alpha = 152,82$ $\beta = 1,20$	145	500	Pas de point minimal	420
FO2103	Foreuse HLXXX1 (n = 7)	exponentielle	$\lambda = 0,003$	365	500	Pas de point minimal	Pas de point minimal
FO2104	Foreuse HLXXX1 (n = 13)	normale	$\mu = 247,00$ $\sigma = 159,06$	247	500	300	320
FO2106	Foreuse HLXXX2 (n = 10)	normale	$\mu = 376,22$ $\sigma = 265,79$	376	500	470	470
FO2107	Foreuse HLXXX2 (n = 6)	Weibull	$\alpha = 464,91$ $\beta = 2,51$	413	500	550	330

Les stratégies de type âge et de type bloc apportent comme inconvénient le fait qu'il n'est pas possible d'obtenir un optimum de temps de remplacement préventif si les données de défaillances ne s'adaptent pas adéquatement aux modèles. Cette situation s'applique aux composants tels que la foreuse RDXXX de la boulonneuse BO2102, et des boulonneuses à plateforme BO1112 et BO1114 ; la boulonneuse HBXXX des boulonneuses à plateforme BO1111, BO1113, BO1114 et BO1115 ; et la foreuse HLXXX1 de la foreuse long trou FO2103. De cette liste, les composants ayant un modèle de survie caractérisé par la distribution exponentielle ne peuvent pas atteindre un point qui converge vers un intervalle minimisant le coût global. La foreuse HLXXX1 de la foreuse long trou FO2103 fait partie de cette réalité. Un des lemmes dans la théorie de la fiabilité stipule que si la loi exponentielle modélise les temps entre défaillances d'une entité, il n'existe alors pas de temps de remplacement préventif fini pour la politique de remplacement basée sur l'âge (Nakagawa et al., 2011). D'ailleurs, tel que démontré par Barlow et Proschan (1965), si le taux de défaillance est une fonction monotone croissante, alors il subsiste une stratégie optimale finie et unique définie par t_p . Or, le taux de défaillance d'une distribution exponentielle est constant dans le temps et il n'est pas réalisable d'appliquer les modèles de maintenance préventive périodique pour cette loi de probabilité. La foreuse RDXXX de la boulonneuse à plateforme BO1114, dont les données de défaillances sont caractérisées par une fonction de Weibull, peut s'inclure dans ce groupe puisque son paramètre de forme β est égal à 0,98 et représente une distribution quasi exponentielle. Il est observable qu'outre la distribution exponentielle, la distribution log-normale ne s'adapte pas à tous les composants de l'échantillon étudié et alors, ne fournit pas de temps optimal de remplacement. Les échecs de modélisation pour la distribution log-normale peuvent s'expliquer par l'évolution du taux de défaillance : elle est croissante jusqu'à un point maximal, puis elle commence à diminuer à partir de cet extremum. À travers la recherche doctorale de Gölbaşı (2015), dont la thèse comporte une étude de la fiabilité des pelles à benne traînante, le même constat est discernable dans les résultats de la stratégie de maintenance de type âge pour les systèmes modélisés par la loi log-normale.

Les données d'interventions de la foreuse RDXXX pour la boulonneuse à plateforme BO2102 suivent un processus de Poisson non homogène et la modélisation de la stratégie de maintenance avec réparation minimale ne peut se réaliser étant donné que l'intensité de défaillance est décroissante ($\beta < 1$). Cette situation indique que l'état de ce dernier s'améliore entre chaque maintenance. Pour ce cas particulier, il est préférable d'attendre d'autres interventions afin de valider que l'amélioration est visible et que le processus stochastique qui définit les pannes de ce composant est alors un processus de renouvellement dans lequel le processus « oublie son passé ».

Dans les situations où le modèle de simulation économique basé sur l'âge permet de converger vers un point minimum, il est visible, dans certains cas, que l'intervalle de remplacement est supérieur à la durée de vie moyenne du composant et il n'est pas possible d'attribuer cette valeur comme temps de remplacement optimal. Néanmoins, le modèle de la stratégie de type bloc peut être une alternative pour la foreuse RDXXX de boulonneuse BO2103 et de la boulonneuse à plateforme BO1111; et de foreuse HLXXX2 de la foreuse long trou FO2107. Un des facteurs qui influence la convergence d'un point minimal est le ratio des coûts existants entre la maintenance corrective et la maintenance préventive. À partir des entretiens réalisés à la mine partenaire, les coûts réels des maintenances correctives ne représentent pas un écart significatif par rapport aux coûts réels des maintenances préventives. Cela expliquerait, en partie, le fait que certaines modélisations de stratégie de maintenance ne fournissent aucun point minimal. Cette constatation est notamment visible à la figure 6.26 : ce graphique illustre le temps de remplacement optimisé de type âge pour la boulonneuse HBXXX de la boulonneuse à plateforme BO1115. Avec le ratio réel $C_f/C_p = 1,54$ et les ratios fictifs $C_f/C_p = 2$ et $C_f/C_p = 3$, le modèle ne réussit pas à converger vers un temps de remplacement optimal, mais ce dernier atteint un minimum pour les ratios fictifs $C_f/C_p = 4$ et $C_f/C_p = 5$. Ainsi, lorsqu'il est possible de faire converger les modèles vers un point minimal, les ratios idéaux C_f/C_p en vue d'un intervalle optimal de type âge ayant une valeur plus faible que la durée de survie moyenne sont respectivement de $C_f/C_p = 2$, $C_f/C_p = 2$, $C_f/C_p = 4$ et $C_f/C_p = 3$ pour la foreuse RDXXX de la boulonneuse BO2103 et des boulonneuses à plateforme BO1111, BO1113 et BO1115. Pour les autres composants modélisés par stratégie de maintenance de type âge, les ratios idéaux sont respectivement de $C_f/C_p = 2$ pour la boulonneuse HBXXX de la boulonneuse à plateforme BO1112; $C_f/C_p = 3$ pour la foreuse HLXXX1 de la foreuse long trou FO2104; et $C_f/C_p = 3$ et $C_f/C_p = 2$ pour la foreuse HLXXX2 des foreuses long trou FO2106 et FO2107. C'est le même raisonnement pour les composants modélisés par stratégie de maintenance de type bloc où les ratios idéaux des coûts sont respectivement de $C_f/C_p = 5$ pour la foreuse RDXXX des boulonneuses à plateforme BO1113 et BO1115; $C_f/C_p = 3$ et $C_f/C_p = 6$ pour la boulonneuse HBXXX des boulonneuses à plateforme BO1112 et BO1115; $C_f/C_p = 3$ pour la foreuse HLXXX1 de la foreuse long trou FO2104; et $C_f/C_p = 4$ pour la foreuse HLXXX2 de la foreuse long trou FO2106. À titre complémentaire, les représentations de l'évolution du temps de remplacement optimisé en fonction des ratios fictifs C_f/C_p sont accessibles aux figures annexées 6.36 et 6.37.

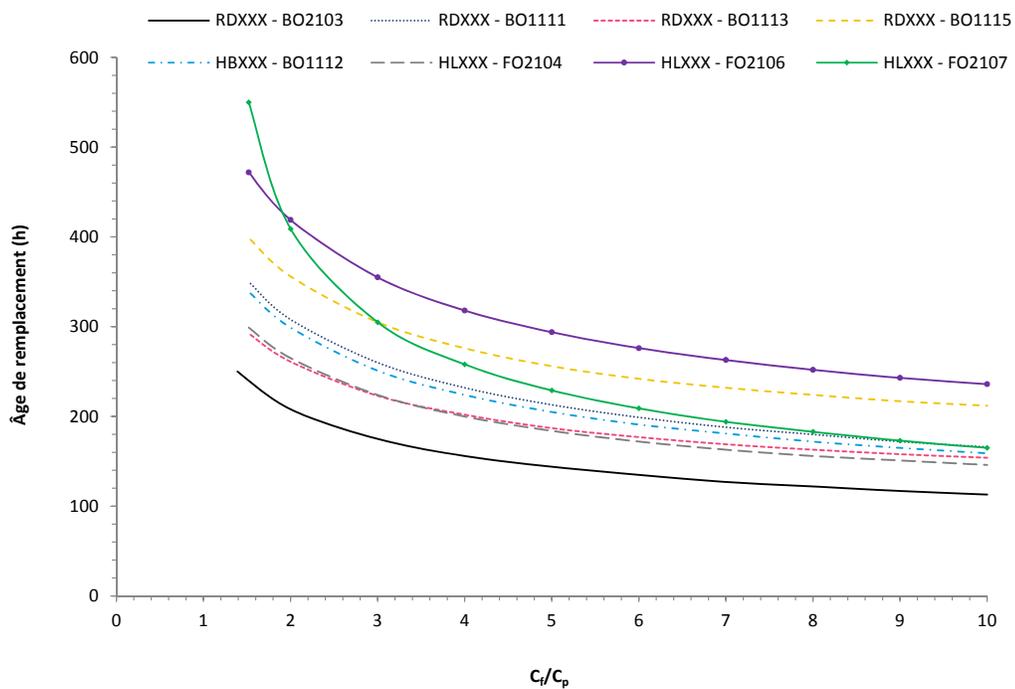


Figure 6.36: Temps de remplacement optimisé de type âge en fonction de différents ratios C_f/C_p

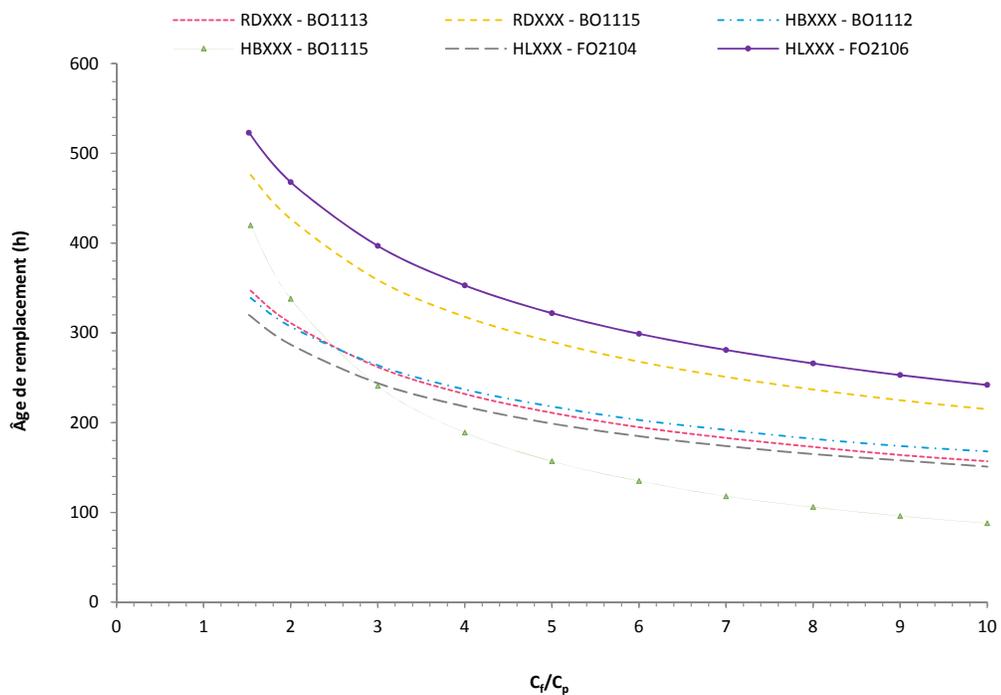


Figure 6.37: Temps de remplacement optimisé de type bloc en fonction de différents ratios C_f/C_p

Selon les moyennes des durées de vie actuelles des composants critiques, il est observable que les heures actuellement programmées par le département pour les maintenances préventives sont plus élevées que la réalité actuelle, à l'exception de la boulonneuse HBXXX de l'équipement BO1114 et de la foreuse HLXXX2 de l'équipement FO2107 avec une valeur moyenne relativement rapprochée de la maintenance préventive réalisée aux 500 heures. Dans plusieurs situations, un remplacement correctif doit être effectué avant même de planifier un remplacement préventif. Mis à part quelques composants critiques de l'échantillon vus au tableau résumé 6.3, les circonstances ne permettent pas d'appliquer systématiquement les stratégies de maintenance périodique introduites dans cette étude. Puisque les stratégies de maintenance de type âge et de type bloc ne fournissent pas des résultats nécessairement bénéfiques, la durée de vie moyenne calculée par la méthode avec l'approche fiabiliste est une alternative acceptable. Conséquemment, le personnel du département de maintenance peut s'orienter vers différentes actions. Dans un premier temps, il pourrait être pertinent de vérifier si la durée de vie de certains de ces composants critiques est conforme aux garanties du fabricant et si elle est acceptable par rapport à la performance globale au sein de la même flotte d'équipements. Dans un deuxième temps, il pourrait être pertinent de réviser, entre autres, les maintenances préventives déjà programmées dans le système de gestion de maintenance et de les ajuster selon les intervalles de remplacement des modèles qui les servent le mieux.

Tableau 6.3: Résumé du temps de remplacement optimal

Équipement	Composant critique	MP actuelle (h)	Remplacement optimisé approche fiabiliste (h)	Remplacement optimisé type âge (h)	Remplacement optimisé type bloc (h)
BO2102	Foreuse RDXXX	500	345	-	-
BO2103	Foreuse RDXXX	500	231	250	220
BO1111	Foreuse RDXXX	500	341	350	320
	Boulonneuse HBXXX	500	182	-	-
BO1112	Foreuse RDXXX	500	232	-	-
	Boulonneuse HBXXX	500	297	340	340
BO1113	Foreuse RDXXX	500	216	290	350
	Boulonneuse HBXXX	500	250	-	-
BO1114	Foreuse RDXXX	500	325	-	-
	Boulonneuse HBXXX	500	438	-	-
BO1115	Foreuse RDXXX	500	293	400	480
	Boulonneuse HBXXX	500	145	-	420
FO2103	Foreuse HLXXX1	500	365	-	-
FO2104	Foreuse HLXXX1	500	247	300	320
FO2106	Foreuse HLXXX2	500	376	470	470
FO2107	Foreuse HLXXX2	500	413	550	330

CHAPITRE 7

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

7.1 Conclusions

L'optimisation de la performance globale des équipements miniers dépend des méthodes et des stratégies de maintenance appliquées. Il faut ajouter les difficultés qui complexifient le processus de traitement des données et le suivi des maintenances en raison de l'administration d'un nombre élevé d'équipements nécessaires aux activités minières, du temps de recherche pour trouver les informations et, parfois, du manque de renseignements disponibles, tels que les statistiques des interventions en temps réel. Outre le fait d'avoir permis de trouver des réponses aux questions soulevées autour de la gestion de la maintenance, ces problématiques ont sollicité le développement d'un procédé qui met en application un outil de nature fiabiliste afin d'anticiper les prochaines maintenances des équipements.

La réalisation de cette recherche s'articulait autour de trois objectifs spécifiques, notamment : (1) l'étude du système de maintenance existant dans un environnement minier, ainsi que le répertoire des équipements critiques; (2) la conception et le développement de l'outil automatisé avec l'approche fiabiliste; (3) la définition des modes de défaillance, l'analyse de la fiabilité et l'optimisation des activités de maintenance à partir d'une sélection d'équipements miniers critiques. Le premier objectif a été couvert aux chapitres 2 et 3 : une rétrospective a permis de cibler adéquatement les besoins d'une entreprise minière et les réalisations possibles en fonction du processus de maintenance implanté et des limites existantes. De plus, la revue de littérature a éclairé les avenues pertinentes à explorer, tout en annonçant les prémisses du choix des équipements critiques. Le deuxième objectif, qui englobait la définition des théories et des méthodologies, ainsi que la conception et le développement de l'interface de ReportsNow® par les algorithmes de résolutions programmés avec Visual Basic, a été abordés aux chapitres 2, 3 et 4. Dans le but de créer un outil fiabiliste qui soit conforme, les processus de résolution présents dans la revue de littérature ont été identifiés de façon précise, avec les hypothèses et les équations prédéfinies. L'analyse des équipements miniers critiques et l'optimisation du temps de remplacement préventifs, qui forment le sujet du troisième objectif spécifique, ont été traitées aux chapitres 5 et 6. Ces approfondissements ont permis de faire le bilan de performance de la fiabilité de ces équipements et de leurs composants.

La contribution de cette recherche se distingue en deux volets : Le premier volet comporte la conception et le développement d'une interface automatisée pour les processus générant des statistiques de fiabilité dans le but de planifier les prochaines maintenances des équipements et leurs composants. Lors de la conception, plusieurs critères étaient primordiaux tels que l'accessibilité, la rapidité des requêtes et la simplification d'utilisation. La phase d'acquisition de données puise dans les informations disponibles dans le serveur ReportsNow® (données JDE) et un nettoyage de données s'ensuit afin d'éliminer les interventions non essentielles. La programmation des algorithmes avec Excel® est le choix le plus approprié pour les besoins demandés. Les processus stochastiques sont codés en tenant compte des tests de tendance (test de Laplace, test MIL-HDBK-189 et test de Cramér-von Mises); du processus de Poisson non homogène (modèle de Crow/AMSAA); du test de dépendance (coefficient de corrélation de Pearson); du processus de branchement de Poisson (modèle de Lewis); de l'estimation des paramètres des distributions de probabilité pour le processus de renouvellement (méthode des moindres carrés); du test d'ajustement entre les données empiriques et théoriques d'une distribution de probabilité (test de Kolmogorov-Smirnov); et de l'approche bayésienne pour de très faibles échantillons. À des fins de validation, les algorithmes intégrés dans Visual Basic sont confrontés et approuvés par des résultats provenant d'articles scientifiques et d'ouvrages de référence. Avec l'historique des interventions provenant de la mine partenaire, l'aboutissement de cette recherche permet de disposer d'un nouvel outil avec une approche fiabiliste. Ainsi, le département de maintenance peut prendre de meilleures décisions et optimiser les maintenances prévisionnelles des équipements miniers.

En promouvant les calculs de l'outil automatisé, le deuxième volet propose des études de cas qui apportent de nouvelles informations sur la performance globale de certains équipements mobiles critiques dans les opérations minières et non documentés dans la revue de littérature. Parmi les équipements mobiles en opération sous terre, la sélection s'est effectuée en fonction du niveau de criticité, tout en choisissant de nouvelles machines pertinentes pour la recherche. Trois flottes d'équipements ont été ciblées : les boulonneuses standards BO2102 à BO2103, les boulonneuses à plateforme BO1111 à BO1115 et les foreuses long trou FO2103 à FO2107. L'analyse de la fiabilité par les défaillances a pour but de déterminer quels types de problèmes engendrent les temps d'arrêt des sous-systèmes. Des composants critiques qui contribuent à ces temps d'arrêt ont été mis en évidence, ainsi que leurs modes de défaillance. Ces problématiques reliées aux pannes sont pertinentes pour l'amélioration continue, que ce soit pour le personnel du département de maintenance ou les fabricants de ces machines.

Dans cet approfondissement de la fiabilité et de la maintenance de ces équipements miniers, l'observation de chaque sous-système par rapport à leur flotte a permis de détecter les éléments les plus faibles. Puisqu'il serait trop long d'énumérer les modes de défaillance récurrents et spécifiques à chaque flotte d'équipements, le lecteur est invité à consulter les sections respectives (voir art. 5.6.1, art. 5.7.1 et art. 5.8.1). La synthèse des résultats obtenus par l'analyse avec l'approche non paramétrique et l'analyse avec l'approche fiabiliste est disponible à la section 5.9. En plus de ces observations, quelques constats généraux sont à ajouter :

- Parmi les équipements étudiés, le marteau perforateur (foreuse) est un composant essentiel à l'exécution des tâches de percussion de la roche. Lors de sa mise en marche et de son avance progressive, la foreuse est continuellement soumise à des forces de compression, des effets de torsion et à des mouvements vibratoires exercés par les chocs de la tige de forage et du trépan. Ces conséquences conduisent inévitablement à des pannes et il n'est pas étonnant que ce composant soit l'un des plus exposés au risque de défaillance au fil des heures de fonctionnement ;
- La faible présence de défaillances recensées pour les sous-systèmes englobant le moteur diesel et la transmission peut s'expliquer par le fait que ces entités ne sont guère sollicitées lors des opérations de forage, contrairement aux équipements de chargement. En d'autres mots, le moteur diesel assure la propulsion de l'équipement et lors de l'arrivée sur le site de forage, l'engin est en position stationnaire et il est branché à l'alimentation électrique afin d'opérer tous les systèmes indispensables à sa fonction principale.
- Selon le diagnostic des flottes d'équipements, il serait pertinent de porter une attention particulière aux sous-systèmes suivants afin de valider s'il est possible d'améliorer leur performance globale, notamment, par le fabricant :
 - Il est remarqué que l'installation de boulon par le système Swellex® apporte plus de pannes que les autres méthodes de soutènement (p. ex. boulons scellés à la résine). La principale problématique rencontrée vient de la défektivité récurrente de la pompe à eau ;
 - Le système d'avance des équipements de boulonnage a régulièrement des problématiques d'ajustement et de bris au niveau des chaînes. Ces causes peuvent provenir de défaillances mécaniques telles que la rupture par fatigue des plaques de liaison ou de la performance non optimale engendrée par divers facteurs possibles (qualité moindre des maillons de chaînes, lubrification insuffisante, environnement hostile).

La dernière partie tient compte de l'optimisation du temps de remplacement préventif dans le cadre des équipements étudiés précédemment et de leurs composants critiques. Deux modèles de maintenances périodiques ont été mis en évidence : les stratégies de maintenance de type âge et de type bloc. La stratégie de maintenance préventive séquentielle a également été introduite, mais elle n'a pas été appliquée à l'étude étant donné qu'aucun composant ne démontrait l'admissibilité d'un modèle défini par des maintenances dites minimales avec une intensité de défaillance de type monotone croissante. À la suite des modélisations, la stratégie de maintenance basée sur l'âge permet d'obtenir certains points minimaux qui optimisent les coûts de maintenance et le temps de remplacement ; or, dans cette étude, ce temps optimisé est souvent supérieur à la durée de survie moyenne des composants critiques. Cette conséquence s'explique partiellement par la présence de ratios réels C_f/C_p faibles. Pour ce qui est de la stratégie de maintenance de type bloc, le temps de remplacement préventif peut être une alternative aux composants critiques suivants : la foreuse RDXXX des équipements BO2103 et BO1111, et la foreuse HLXXX2 de l'équipement FO2107.

7.2 Perspectives

Bien que cette recherche ait contribué de manière significative à l'élaboration d'un procédé permettant de générer des statistiques de fiabilité, de même qu'à l'introspection de flottes d'équipements miniers et de leurs composants, divers perfectionnements pourraient y être apportés. Voici la liste des recommandations et des perspectives proposées :

- Le système de codification pour l'identification du type d'intervention de la mine partenaire est perfectible (code action et code composant). Dans l'observation des bons de travail, il manque parfois la cause de défaillance, ce qui n'est pas nécessairement évident à discerner pour le personnel de maintenance, et le type de réparation n'est pas toujours indiqué, lorsque l'action de la maintenance ne requiert pas un remplacement direct du composant. D'ailleurs, les problématiques en lien avec la gestion de l'information des modes de défaillance ne sont pas uniques à la mine partenaire : c'est une difficulté rencontrée dans plusieurs industries ([Hodkiewicz et Ho, 2016](#)). Le système de codification pourrait être amélioré en réduisant un nombre de choix possibles dans les listes disponibles et être de rigueur lors de la création de bon de travail. Dans la situation présente, c'est principalement les bons de travail planifiés qui sont évalués avec le système de codification. Si la majorité des demandes de travail étaient associées à un mode de défaillance, il serait plus aisé de faire un suivi et de générer des statistiques de maintenance précises.

■ En relation avec le point soulevé précédemment, une meilleure gestion de l'attribution du temps de maintenance alloué au bon de travail serait pertinente. Étant donné la présence de certaines maintenances censurées et, parfois, le manque d'information sur le temps d'arrêt spécifique à chaque travail, il est plus difficile d'estimer la durée d'une maintenance en particulier. Par ailleurs, un niveau détaillé de l'enregistrement du temps moyen d'indisponibilité (MDT) serait bénéfique pour valider la performance des interventions effectuées sur les diverses machines et pourrait inclure les informations suivantes : l'attente de pièces de rechange et de la main-d'œuvre, les temps de diagnostic, de réparation et de réglage. Évidemment, une saisie appropriée des données nécessiterait une volonté et un temps d'exécution de la part du personnel concerné, ainsi qu'une refonte du système de maintenance pour qu'il soit accessible et adapté selon les besoins.

■ Pour les futures recherches, il serait intéressant d'explorer le modèle à risque proportionnel (PHM, de l'expression anglaise *Proportional Hazards Model*) dans le contexte d'un environnement minier souterrain. Le modèle PHM permet de combiner une fonction de risque à une entité et de prendre en compte les covariables associées afin d'améliorer la prédiction de la défaillance (Bendell, 1988; Garmabaki et al., 2015). Ce modèle de pronostic, qui applique la régression de Cox (1972), nécessite de développer un modèle mathématique où des covariables (données d'états) influencent les paramètres des équations tels que les qualités intrinsèques de l'entité (matériaux, effets de la réparation), le facteur humain (compétences de l'opérateur, compétences du personnel de maintenance), les conditions d'utilisation (accessibilité, caractéristiques du terrain) et l'environnement (température, humidité, visibilité) (Ghodrati et al., 2017; Ghodrati et Kumar, 2005a, 2005b). Ce modèle est pratique si la recherche s'effectue sur un composant spécifique dont il est possible d'affecter des paramètres connus aux facteurs des covariables. De ce fait, il serait pertinent de concentrer l'étude sur des composants significatifs, tels que les marteaux perforateurs installés sur les machines minières et employés pour les activités de forage. L'étude permettrait d'obtenir des modèles mathématiques uniques qui représenteraient de façon précise le comportement de défaillance. Cet approfondissement prendrait en considération un échantillon provenant d'un large intervalle de temps afin d'obtenir un profil de survie le plus réaliste possible.

■ Avec l'utilisation de plus en plus fréquente des technologies de l'intelligence de l'information qui permettent l'acquisition et le transfert massif de données à distance (télémétrie) dans le domaine minier, il serait pertinent de développer un processus d'amélioration continue des équipements mobiles par l'emploi de l'informatique décisionnelle (BI, de l'expression anglaise *Business Intelligence*) (Aigner, 2013). Cette solution prendrait en compte un nuage d'informations central (données SQL) dans le but de créer des indicateurs de performance accessibles par la modélisation et la visualisation de rapports intégrés à un progiciel spécialisé (p. ex. Microsoft® Power BI). Ces rapports pourraient se baser, entre autres, sur les indicateurs de performances standards à l'industrie minière qui incluent les notions telles que la productivité, la disponibilité, l'utilisation, la maintenance, etc. De manière complémentaire, l'ajout d'outils statistiques programmables (histogramme, diagramme de probabilité, nuage de points, graphique de contrôle, etc.) serait une avenue possible afin d'identifier des tendances de façon précise, tout en permettant de mettre en contexte les indicateurs clés obtenus.

PUBLICATIONS

Articles soumis et publiés avec comité de lecture

La Roche-Carrier, N., Dituba Ngoma, G., Kocaefe, Y. et Erchiqui, F. (2019). Reliability Analysis of Underground Rock Bolters Using the Renewal Process, the Non-Homogeneous Poisson Process and the Bayesian Approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 37(2), 223-242. doi:[10.1108/IJQRM-01-2019-0035](https://doi.org/10.1108/IJQRM-01-2019-0035)

La Roche-Carrier, N., Dituba Ngoma, G., Kocaefe, Y. et Erchiqui, F. (2019). Branching Poisson Process Modelling for Reliability Analysis of Repairable Mechanical System. *9th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH)*, 29-31 juillet 2019. Prague, République tchèque. doi:[10.5220/0007772302020208](https://doi.org/10.5220/0007772302020208)

La Roche-Carrier, N., Dituba Ngoma, G., Kocaefe, Y. et Erchiqui, F. (s.d.). Reliability Investigation of an Underground Drill Rig Fleets Using the Renewal Process and the Non-Homogeneous Poisson Process. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*. Article soumis pour publication (RQS18-085).

RÉFÉRENCES

- Abernethy, R. B. (2004). *The new Weibull handbook* (5^e éd.). North Palm Beach : R.B. Abernethy.
- Abramowitz, M. et Stegun, I. (1972). *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*. Washington, D.C. : U.S. Government Printing Office.
- Agnico Eagle. (2019). *Complex minier LaRonde* [PDF]. Consulté sur www.agnicoeagle.com
- Ahmad, R., Kamaruddin, S., Mokthar, M. et Almanar, I. P. (2006). Identifying the best fit failure distribution and the parameters of machine's component : A new approach. Dans *International Conference on Man-Machine Systems, 2006* (p. 1-6). Langkawi, Malaisie.
- Aigner, W. (2013). Current work practice and users' perspectives on visualization and interactivity in Business Intelligence. Dans *17th International Conference on Information Visualisation* (p. 299-306). Londres, Angleterre : IEEE. doi:[10.1109/IV.2013.38](https://doi.org/10.1109/IV.2013.38)
- Allahkarami, Z., Sayadi, A. R. et Lanke, A. (2016). Reliability analysis of motor system of dump truck for maintenance management. Dans U. Kumar, A. Ahmadi, A. Verma et P. Varde (dir.), *Current trends in reliability, availability, maintainability and safety* (p. 681-688). Cham : Springer.
- Ascher, H. et Feingold, H. (1984). *Repairable system reliability : Modeling, inference, misconceptions and their cause*. New York : Marcel Dekker.
- Association minière du Canada. (2019). *Faits et chiffres de l'industrie minière canadienne 2018* [PDF]. Consulté sur www.mining.ca
- Atlas Copco. (1982). *Atlas Copco manual* (4^e éd.). Örebro : Ljungföretagen.
- Balakrishnan, N. et Kateri, M. (2008). On the maximum likelihood estimation of parameters of Weibull distribution based on complete and censored data. *Statistics & Probability Letters*, 78(17), 2971-2975. doi:[10.1016/j.spl.2008.05.019](https://doi.org/10.1016/j.spl.2008.05.019)
- Balaraju, J., Govinda Raj, M. et Murthy, C. (2018). Estimation of reliability-based maintenance time intervals of load-haul-dumper in an underground coal mine. *Journal of Mining and Environment*, 9(3), 761-770. doi:[10.22044/jme.2018.6813.1508](https://doi.org/10.22044/jme.2018.6813.1508)
- Balaraju, J., Govinda Raj, M. et Murthy, C. (2019). Maintenance management of load haul dumper using reliability analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. doi:[10.1108/JQME-10-2018-0083](https://doi.org/10.1108/JQME-10-2018-0083)
- Barabady, J. (2005). Reliability and maintainability analysis of crushing plants in Jajarm Bauxite Mine of Iran. Dans *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2005* (p. 109-115). Alexandria, États-Unis : IEEE. doi:[10.1109/RAMS.2005.1408347](https://doi.org/10.1109/RAMS.2005.1408347)

- Barabady, J. et Kumar, U. (2007). Reliability characteristics based maintenance scheduling : A case study of a crushing plant. *International Journal of Performability Engineering*, 3(3), 319-328.
- Barabady, J. et Kumar, U. (2008). Reliability analysis of mining equipment : A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine of Iran. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(4), 647-653. doi:[10.1016/j.ress.2007.10.006](https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.10.006)
- Barlow, R. E. et Hunter, L. (1960). Optimum preventive maintenance policies. *Operations Research*, 8(1), 90-100. doi:[10.1287/opre.8.1.90](https://doi.org/10.1287/opre.8.1.90)
- Barlow, R. E. et Proschan, F. (1964). Comparison of replacement policies, and renewal theory implications. *The Annals of Mathematical Statistics*, 35(2), 577-589. doi:[10.1214/aoms/1177703557](https://doi.org/10.1214/aoms/1177703557)
- Barlow, R. E. et Proschan, F. (1965). *Mathematical theory of reliability*. New York : John Wiley & Sons.
- Bartlett, M. S. (1955). *An introduction to stochastic processes : With special reference to methods and applications*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Benard, A. et Bos-Levenbach, E. (1953). The plotting of observations on probability paper. *Statistica Neerlandica*, 7, 163-173. doi:[10.1111/j.1467-9574.1953.tb00821.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9574.1953.tb00821.x)
- Ben-Daya, M., Kumar, U. et Murthy, D. (2016). *Introduction to maintenance engineering : Modelling, optimization and management*. New York : John Wiley & Sons.
- Bendell, T. (1988). An overview of collection, analysis, and application of reliability data in the process industries. *IEEE Transactions on Reliability*, 37(2), 132-137. doi:[10.1109/24.3732](https://doi.org/10.1109/24.3732)
- Berger, J. (1985). *Statistical decision theory and Bayesian analysis*. New York : Springer.
- Bergman, B. et Klefsjö, B. (1984). The total time on test concept and its use in reliability theory. *Operations Research*, 32(3), 596-606. doi:[10.1287/opre.32.3.596](https://doi.org/10.1287/opre.32.3.596)
- Bhattacharya, S. K. (1967). Bayesian approach to life testing and reliability estimation. *Journal of the American Statistical Association*, 62(317), 48-62. doi:[10.1080/01621459.1967.10482887](https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482887)
- Block, H. W., Langberg, N. A. et Savits, T. H. (1990). Maintenance comparisons : Block policies. *Journal of Applied Probability*, 27(3), 649-657. doi:[10.2307/3214548](https://doi.org/10.2307/3214548)
- Boky, B. (1967). *Mining*. Moscou : Mir Publishers.
- Bon, J. (1995). *Fiabilité des systèmes : méthodes mathématiques*. Paris : Masson.
- Bufferne, J. (2008). *Fiabiliser les équipements industriels*. Paris : Eyrolles.
- Caterpillar Inc. (2011). *R1700G underground mining loader* [PDF]. Consulté sur www.cat.com
- Caterpillar Inc. (2014). *8200 dragline* [PDF]. Consulté sur www.cat.com
- Caterpillar Inc. (2015). *6015B hydraulic shovel* [PDF]. Consulté sur www.cat.com
- Coccozza-Thivent, C. (1997). *Processus stochastiques et fiabilité des systèmes*. Berlin : Springer.

- Coetzee, J. L. (1997). The role of NHPP models in the practical analysis of maintenance failure data. *Reliability Engineering & System Safety*, 56(2), 161-168. doi:[10.1016/S0951-8320\(97\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(97)00010-0)
- Cox, D. (1972). Regression models and life tables. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 34(2), 187-220.
- Cox, D. et Lewis, P. A. W. (1966). *The statistical analysis of series of events*. Londres : Chapman and Hall.
- Crow, L. H. (1975). *Reliability analysis for complex, repairable systems* (Rapport technique N° 138). Army Materiel Systems Analysis Activity.
- Crow, L. H. (1990). Evaluating the reliability of repairable systems. Dans *Reliability and Maintainability Symposium, 1990* (p. 275-279). Los Angeles, États-Unis : IEEE. doi:[10.1109/ARMS.1990.67969](https://doi.org/10.1109/ARMS.1990.67969)
- Darling, P. (2011). *SME mining engineering handbook* (3^e éd.). Ann Arbor : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Davies, C. (2017). *Une hisoite en or : le chemin parcouru par Agnico Eagle pour devenir non la plus grande, mais la meilleure*. Vancouver : Echo Storytelling Agency.
- Deepak, P. P. et Jagathy, D. (2014). CBM, TPM, RCM and A-RCM – A qualitative comparison of maintenance management strategies. *International Journal of Management and Business Studies*, 4(3).
- Delmas, B. (2000). *Statistique descriptive*. Paris : Nathan.
- Dhillon, B. (2008). *Mining equipment reliability, maintainability, and safety*. Londres : Springer.
- Dhillon, B. (2010). *Mine safety : A modern approach*. Londres : Springer.
- Dodson, B. (1994). Determining the optimum schedule for preventive maintenance. *Quality Engineering*, 6(4), 667-679. doi:[10.1080/08982119408918757](https://doi.org/10.1080/08982119408918757)
- Doucet, P. et Lafrance, B. (2005). *Le potentiel aurifère en profondeur du camp minier de Cadillac* [PDF]. (Publication PRO 2005-01). Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. Consulté sur <https://mern.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines>
- Département de la Défense des États-Unis. (1981). *Military handbook, reliability growth management (MIL-HDBK-189)*. Washington, DC : U.S. Government Printing Office.
- Duane, J. (1964). Learning curve approach to reliability monitoring. *IEEE Transactions on Aerospace*, 2(2), 563-566. doi:[10.1109/TA.1964.4319640](https://doi.org/10.1109/TA.1964.4319640)
- Elevli, S., Uzgoren, N. et Taksuk, M. (2008). Maintainability analysis of mechanical systems of electric cable shovels. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 67(4), 267-271.
- Garmabaki, A., Ahmadi, A., Mahmood, Y. A. et Barabadi, A. (2015). Reliability modelling of multiple repairable units. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(7), 2329-2343. doi:[10.1002/qre.1938](https://doi.org/10.1002/qre.1938)
- Gelman, A., Carlin, J., Stern, H., Dunson, D., Vehtari, A. et Rubin, D. (2013). *Bayesian data analysis* (3^e éd.). Boca Raton : CRC Press.

- Ghodrati, B., Hoseinie, S. H. et Kumar, U. (2017). Context-driven mean residual life estimation of mining machinery. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1-9. doi:[10.1080/17480930.2017.1308067](https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1308067)
- Ghodrati, B. et Kumar, U. (2005a). Operating environment-based spare parts forecasting and logistics : A case study. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 8(2), 95-105. doi:[10.1080/13675560512331338189](https://doi.org/10.1080/13675560512331338189)
- Ghodrati, B. et Kumar, U. (2005b). Reliability and operating environment-based spare parts estimation approach : A case study in Kiruna Mine, Sweden. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 11(2), 169-184. doi:[10.1108/13552510510601366](https://doi.org/10.1108/13552510510601366)
- Ghosh, S. et Majumdar, S. K. (2011). Reliability modeling and prediction using classical and Bayesian approach : A case study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 28(5), 556-586. doi:[10.1108/02656711111132580](https://doi.org/10.1108/02656711111132580)
- Gilardoni, G. L. et Colosimo, E. A. (2007). Optimal maintenance time for repairable systems. *Journal of Quality Technology*, 39(1), 48-53. doi:[10.1080/00224065.2007.11917672](https://doi.org/10.1080/00224065.2007.11917672)
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. New York : John Wiley & Sons.
- Girault, M. (1964). Le processus ponctuel de Poisson. *Cahiers du Bureau universitaire de recherche opérationnelle*(5), 3-16.
- Gölbaşı, O. (2015). *Reliability-based maintenance optimization of walking draglines* (Thèse de doctorat). Université technique du Moyen-Orient, Ankara.
- Gölbaşı, O. et Demirel, N. (2016). Simulation of an active maintenance policy : A preliminary study in dragline maintenance optimization. Dans U. Kumar, A. Ahmadi, A. Verma et P. Varde (dir.), *Current trends in reliability, availability, maintainability and safety* (p. 669-679). Cham : Springer. doi:[10.1007/978-3-319-23597-4_49](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23597-4_49)
- Groves, W., Kecojevic, V. et Komljenovic, D. (2007). Analysis of fatalities and injuries involving mining equipment. *Journal of Safety Research*, 38(4), 461-470. doi:[10.1016/j.jsr.2007.03.011](https://doi.org/10.1016/j.jsr.2007.03.011)
- Gustafson, A., Schunnesson, H. et Kumar, U. (2015). Reliability analysis and comparison between automatic and manual load haul dump machines. *Quality and Reliability Engineering International*, 31(3), 523-531. doi:[10.1002/qre.1610](https://doi.org/10.1002/qre.1610)
- Hall, R. A. et Daneshmend, L. K. (2003a). Reliability and maintainability models for mobile underground haulage equipment. *CIM Bulletin*, 96(1072), 159-165.
- Hall, R. A. et Daneshmend, L. K. (2003b). Reliability modelling of surface mining equipment : Data gathering and analysis methodologies. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 17(3), 139-155. doi:[10.1076/ijsm.17.3.139.14773](https://doi.org/10.1076/ijsm.17.3.139.14773)
- Hami, A. et Radi, B. (2011). *Fiabilité et optimisation des systèmes : théorie et applications, cours et exercices corrigés*. Paris : Ellipses.
- Heng, J. (2002). *Pratique de la maintenance préventive*. Paris : Dunod.

- Hodkiewicz, M. et Ho, M. T.-W. (2016). Cleaning historical maintenance work order data for reliability analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 22(2), 146-163. doi:[10.1108/JQME-04-2015-0013](https://doi.org/10.1108/JQME-04-2015-0013)
- Hodkiewicz, M. et Montgomery, N. (2014). Data fitness for purpose : Assessing the quality of industrial data for use in mathematical models. Dans *8th International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability, 2014* (p. 125-130). Oxford, Royaume-Uni : Institute of Mathematics and its Applications.
- Hogg, R. et Craig, A. (1978). *Introduction to mathematical statistics* (4^e éd.). New York : MacMillan.
- Hoseinie, S., Al-Chalabi, H. et Ghodrati, B. (2018). Comparison between simulation and analytical methods in reliability data analysis : A case study on face drilling rigs. *Data*, 3(2), 12. doi:[10.3390/data3020012](https://doi.org/10.3390/data3020012)
- Huber-Carol, C. (1994). Durées de survie tronquées et censurées. *Journal de la société française de statistique*, 135(4), 3-23.
- Hung-Cuong, N., Quyet-Thang, H. et Hai-Trieu, L. (2014). Different ranking of NHPP software reliability growth models with generalised measure and predictability. *International Journal of Applied Information Systems*, 7(11), 1-6. doi:[10.5120/ijais14-451257](https://doi.org/10.5120/ijais14-451257)
- Høyland, A. et Rausand, M. (2004). *System reliability theory : Models and statistical methods* (2^e éd.). Hoboken : John Wiley & Sons.
- ISO. (2014). *Schémas de procédé pour l'industrie chimique et pétrochimique - Partie 1 : Spécification des schémas de procédé (Norme ISO 10628-1 :2014)*. Genève : Organisation internationale de normalisation (ISO).
- ISO. (2016). *Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel : collecte et échange de données de fiabilité et de maintenance des équipements (Norme ISO 14224 :2016)*. Genève : Organisation internationale de normalisation (ISO).
- Jacot, A., Miller, J., Jacot, M. et Stern, J. (2008). *JD Edwards EnterpriseOne, the complete reference*. New York : McGraw-Hill.
- Jardine, A. K., Lin, D. et Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483-1510. doi:[10.1016/j.ymssp.2005.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012)
- Jardine, A. K. et Tsang, A. (2013). *Maintenance, replacement, and reliability : Theory and applications* (2^e éd.). Boca Raton : CRC Press.
- Jeffreys, H. (1939). *Theory of probability*. Oxford : Clarendon Press.
- Johnson, R., Miller, I. et Freund, J. (2011). *Miller and Freund's probability and statistics for engineers* (8^e éd.). Harlow : Prentice Hall.
- Karyagina, M., Wong, W. et Vlacic, L. (1998). Life cycle cost modelling using marked point processes. *Reliability Engineering & System Safety*, 59(3), 291-298. doi:[10.1016/S0951-8320\(97\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(97)00086-0)
- Kececioglu, D. (1993). *Reliability and life testing handbook*. Englewood Cliffs : PTR Prentice Hall.

- Kendall, M. G. (1938). A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30(1-2), 81–93. doi:[10.2307/2332226](https://doi.org/10.2307/2332226)
- Kiremire, A. R. (2011). *The application of the Pareto principle in software engineering* (Recueil inédit). Université de Louisiana Tech, Ruston.
- Klim, Z. (1995). *Fiabilité et maintenabilité des systèmes mécaniques*. Montréal : Presses internationales Polytechnique.
- Krasich, M. (2012). Power law model, correct application in reliability growth do the cumulative times indeed always add up? Dans *Reliability and Maintainability Symposium, 2012* (p. 1-7). Reno, États-Unis. doi:[10.1109/RAMS.2012.6175436](https://doi.org/10.1109/RAMS.2012.6175436)
- Kumar, U. (1990). *Reliability analysis of load-haul-dump machines* (Thèse de doctorat). Université de technologie de Luleå, Luleå.
- Kumar, U. et Klefsjö, B. (1992). Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model. *Reliability Engineering & System Safety*, 35(3), 217-224. doi:[10.1016/0951-8320\(92\)90080-5](https://doi.org/10.1016/0951-8320(92)90080-5)
- Kumar, U., Klefsjö, B. et Granholm, S. (1989). Reliability investigation for a fleet of load haul dump machines in a Swedish mine. *Reliability Engineering & System Safety*, 26(4), 341-361. doi:[10.1016/0951-8320\(89\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0951-8320(89)90004-5)
- Kumar, U. et Vagenas, N. (1993). Performance evaluation of an automatic load-haul dump vehicle. *CIM Bulletin*, 86(974), 39-42.
- Kvaløy, J. T. et Lindqvist, B. H. (1998). TTT-based tests for trend in repairable systems data. *Reliability Engineering & System Safety*, 60(1), 13-28. doi:[10.1016/S0951-8320\(97\)00099-9](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(97)00099-9)
- Lafontaine, E. (2006). *Méthodes et mesures pour l'évaluation de la performance et de l'efficacité des équipements miniers de production* (Mémoire de maîtrise). Université Laval, Québec.
- Lazarević, Ž., Arandelović, I. et Kirin, S. (2018). The reliability of bucket wheel excavator-review of random mechanical failures. *Technical Gazette*, 25(4), 1259–1264. doi:[10.17559/TV-20160727170019](https://doi.org/10.17559/TV-20160727170019)
- Lehmann, E. et Casella, G. (2006). *Theory of point estimation*. New York : Springer.
- Lemy, F., Hadjigeorgiou, J. et Charette, F. (1998). État actuel de l'utilisation du boulonnage dans les mines souterraines en roche dure du Québec. *Tunnelling Association of Canada Annual Publication*.
- Lewis, P. A. W. (1964a). A branching Poisson process model for the analysis of computer failure patterns. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 26(3), 398-456. doi:[10.1111/j.2517-6161.1964.tb00573.x](https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00573.x)
- Lewis, P. A. W. (1964b). Implications of a failure model for the use and maintenance of computers. *Journal of Applied Probability*, 1(02), 347-368. doi:[10.2307/3211865](https://doi.org/10.2307/3211865)
- Lhorente, B., Lugtigheid, D., Knights, P. F. et Santana, A. (2004). A model for optimal armature maintenance in electric haul truck wheel motors : A case study. *Reliability Engineering & System Safety*, 84(2), 209-218. doi:[10.1016/j.ress.2003.10.016](https://doi.org/10.1016/j.ress.2003.10.016)

- Liao, W., Pan, E. et Xi, L. (2010). Preventive maintenance scheduling for repairable system with deterioration. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(6), 875-884. doi:[10.1007/s10845-009-0264-z](https://doi.org/10.1007/s10845-009-0264-z)
- Littlewood, B. et Verrall, J. L. (1974). A Bayesian reliability model with a stochastically monotone failure rate. *IEEE Transactions on Reliability*, 23(2), 108-114. doi:[10.1109/TR.1974.5215217](https://doi.org/10.1109/TR.1974.5215217)
- Louit, D. M., Pascual, R. et Jardine, A. K. (2009). A practical procedure for the selection of time-to-failure models based on the assessment of trends in maintenance data. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(10), 1618-1628. doi:[10.1016/j.ress.2009.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.04.001)
- Lyonnet, P. (2000). *La maintenance : mathématiques et méthodes*. Paris : Éditions Tec & Doc.
- Majumdar, S. (1995). Study on reliability modelling of a hydraulic excavator system. *Quality and Reliability Engineering International*, 11(1), 49-63. doi:[10.1002/qre.4680110108](https://doi.org/10.1002/qre.4680110108)
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. doi:[10.2307/1907187](https://doi.org/10.2307/1907187)
- Martel, J. R. (2016). *Performance des chantiers ouverts en contexte de mines profondes* (Mémoire de maîtrise). Université Laval, Québec.
- Mercier-Langevin, F. (2011). LaRonde extension-mine design at three kilometres. *Mining Technology*, 120(2), 95-104. doi:[10.1179/037178411X12942393517417](https://doi.org/10.1179/037178411X12942393517417)
- Meskini, S., Nassif, A. B. et Capretz, L. F. (2013). Reliability models applied to mobile applications. Dans *7th International Conference on Software Security and Reliability-Companion, 2013* (p. 155-162). Gaithersburg, États-Unis : IEEE. doi:[10.1109/SERE-C.2013.30](https://doi.org/10.1109/SERE-C.2013.30)
- Monchy, F. et Kojchen, C. (2015). *Maintenance : Outils, méthodes et organisations pour une meilleure performance* (4^e éd.). Paris : Dunod.
- Mood, A., Graybill, F. et Boes, D. (1974). *Introduction to the theory of statistics* (3^e éd.). Berkeley : McGraw-Hill.
- Moubray, J. (1991). *Reliability-Centered Maintenance*. Oxford : Butterworth/Heinemann.
- Muller, A. (2005). *Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d'un processus de pronostic* (Thèse de doctorat). Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy.
- Murthy, D., Atrens, A. et Eccleston, J. (2002). Strategic maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(4), 287-305. doi:[10.1108/13552510210448504](https://doi.org/10.1108/13552510210448504)
- Naikan, V. (2008). *Reliability engineering and life testing*. Delhi : PHI Learning.
- Nakagawa, T. (1986). Periodic and sequential preventive maintenance policies. *Journal of Applied Probability*, 23(2), 536-542. doi:[10.2307/3214197](https://doi.org/10.2307/3214197)
- Nakagawa, T. (1988). Sequential imperfect preventive maintenance policies. *IEEE Transactions on Reliability*, 37(3), 295-298. doi:[10.1109/24.3758](https://doi.org/10.1109/24.3758)
- Nakagawa, T. et Yasui, K. (1987). Optimum policies for a system with imperfect maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 36(5), 631-633.

- Nakagawa, T., Zhao, X. et Yun, W. Y. (2011). Optimal age replacement and inspection policies with random failure and replacement times. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 18(05), 405-416. doi:[10.1142/S0218539311004159](https://doi.org/10.1142/S0218539311004159)
- Nakajima, S. (1989). *TPM development program : Implementing Total Productive Maintenance*. Portland : Productivity Press.
- Nguyen, D. et Murthy, D. (1981). Optimal preventive maintenance policies for repairable systems. *Operations Research*, 29(6), 1181-1194. doi:[10.1287/opre.29.6.1181](https://doi.org/10.1287/opre.29.6.1181)
- Nguyen, D. N. (2015). *Contribution aux approches probabilistes pour le pronostic et la maintenance des systèmes contrôlés* (Thèse de doctorat). Université de technologie de Troyes, Troyes.
- Nuziale, T. et Vagenas, N. (2000). A software architecture for reliability analysis of mining equipment. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 14(1), 19-34. doi:[10.1080/13895260008953295](https://doi.org/10.1080/13895260008953295)
- Papoulis, A. (1991). *Probability, random variables, and stochastic processes* (3^e éd.). New York : McGraw-Hill.
- Paraszczak, J. et Perreault, J. (1994). Reliability of diesel powered load-haul-dump machines in an underground Quebec mine. *CIM Bulletin*, 87(978), 123-127.
- Parkin, T., Meisinger, J., Starr, J., Chester, S. et Robinson, J. (1988). Evaluation of statistical estimation methods for lognormally distributed variables. *Soil Science Society of America Journal*, 52(2), 323-329. doi:[10.2136/sssaj1988.03615995005200020004x](https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200020004x)
- Percy, D. F., Kobbacy, K. A. et Fawzi, B. B. (1997). Setting preventive maintenance schedules when data are sparse. *International Journal of Production Economics*, 51(3), 223-234. doi:[10.1016/S0925-5273\(97\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(97)00054-6)
- Pham, H. (2006). *Handbook of reliability engineering*. Londres : Springer.
- Podder, T. K., Sibenac, M., Thomas, H., Kirkwood, W. et Bellingham, J. (2004). Reliability growth of autonomous underwater vehicle-dorado. Dans *Proceedings of the Marine Technology Society/IEEE Oceans Conference, 2004* (p. 856-862). Kobe, Japon : IEEE. doi:[10.1109/OCEANS.2004.1405576](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2004.1405576)
- Prasad, K. H., Faruquie, T. A., Joshi, S., Chaturvedi, S., Subramaniam, L. V. et Mohania, M. (2011). Data cleansing techniques for large enterprise datasets. Dans *SRII Global Conference, 2011* (p. 135-144). San Jose, États-Unis : IEEE. doi:[10.1109/SRII.2011.26](https://doi.org/10.1109/SRII.2011.26)
- Procaccia, H., Fertou, E. et Procaccia, M. (2011). *Fiabilité et maintenance des matériels industriels réparables et non réparables*. Paris : Lavoisier.
- Pérès, F. et Noyes, D. (2003). Evaluation of a maintenance strategy by the analysis of the rate of repair. *Quality and Reliability Engineering International*, 19(2), 129-148. doi:[10.1002/qre.515](https://doi.org/10.1002/qre.515)
- Pulcini, G. (2001). Modeling the failure data of a repairable equipment with bathtub type failure intensity. *Reliability Engineering & System Safety*, 71(2), 209-218. doi:[10.1016/S0951-8320\(00\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00101-0)

- Qin, J., Niu, Y. et Li, Z. (2014). A data analysis method and its applications in Excel. *Journal of Software*, 9(12), 2998-3004.
- Rahimdel, M. J., Ataei, M. et Ghodrati, B. (2019). Modeling and simulation approaches for reliability analysis of drilling machines. *Journal of The Institution of Engineers (India) : Series C*, 1–9. doi:[10.1007/s40032-019-00533-x](https://doi.org/10.1007/s40032-019-00533-x)
- Ranjith, P. G., Zhao, J., Ju, M., De Silva, R. V., Rathnaweera, T. D. et Bandara, A. K. (2017). Opportunities and challenges in deep mining : A brief review. *Engineering*, 3(4), 546–551. doi:[10.1016/J.ENG.2017.04.024](https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.024)
- Rao, K. et Prasad, P. (2001). Graphical methods for reliability of repairable equipment and maintenance planning. Dans *Reliability and Maintainability Symposium, 2001* (p. 123-128). Philadelphie, États-Unis : IEEE. doi:[10.1109/RAMS.2001.902453](https://doi.org/10.1109/RAMS.2001.902453)
- Rao, S. S. (2015). *Reliability engineering*. Boston : Pearson.
- Regattieri, A., Manzini, R. et Battini, D. (2010). Estimating reliability characteristics in the presence of censored data : A case study in a light commercial vehicle manufacturing system. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(10), 1093-1102. doi:[10.1016/j.ress.2010.05.001](https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.05.001)
- Ressources naturelles Canada. (2019). *Les minéraux et l'économie* [Page Web]. Consulté sur www.rncan.gc.ca
- Ribot, P. (2009). *Vers l'intégration diagnostic/pronostic pour la maintenance des systèmes complexes* (Thèse de doctorat). Université Paul Sabatier-Toulouse III, Toulouse.
- Rigdon, S. et Basu, A. (2000). *Statistical methods for the reliability of repairable systems*. New York : John Wiley & Sons.
- Robert, C. (2007). *The Bayesian choice : From decision-theoretic foundations to computational implementation*. New York : Springer.
- Ross, S. (2003). *Introduction to probability models* (8^e éd.). San Diego : Academic Press.
- Roy, S., Bhattacharyya, M. et Naikan, V. (2001). Maintainability and reliability analysis of a fleet of shovels. *Mining Technology*, 110(3), 163-171. doi:[10.1179/mnt.2001.110.3.163](https://doi.org/10.1179/mnt.2001.110.3.163)
- Samanta, B., Sarkar, B. et Mukherjee, S. (2000). Reliability, Availability & Maintainability (RAM) of heavy earth moving machinery in an open cast mine. *Minetech*, 21(5), 15–19.
- Samanta, B., Sarkar, B. et Mukherjee, S. (2001). Reliability analysis of shovel machines used in an open cast coal mine. *Mineral Resources Engineering*, 10(02), 219-231. doi:[10.1142/S0950609801000610](https://doi.org/10.1142/S0950609801000610)
- Samanta, B., Sarkar, B. et Mukherjee, S. (2004). Reliability modelling and performance analyses of an LHD system in mining. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(1), 1-8. doi:[10.520/AJA0038223X_2796](https://doi.org/10.520/AJA0038223X_2796)
- Shahinez, B. (2011). *La gestion des niveaux de sécurité intégrée « System Integrated Level » dans un procédé au niveau du GL2Z* (Thèse de doctorat). Université d'Oran, Oran.
- Stephens, K. (2012). *Reliability data analysis with Excel and Minitab*. Milwaukee : ASQ Quality Press.

- Sturges, H. A. (1926). The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65–66.
- Syamsundar, A. et Naikan, V. (2009). Mathematical modelling of maintained systems using point processes. *IMA Journal of Management Mathematics*, 20(3), 275-301. doi:[10.1093/imaman/dpn037](https://doi.org/10.1093/imaman/dpn037)
- Tatiya, R. R. (2005). *Surface and underground excavations : Methods, techniques and equipment*. Boca Raton : CRC Press.
- Thomas, M. (2002). *Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines*. Montréal : Université du Québec, École de technologie supérieure.
- Tobias, P. A. et Trindade, D. C. (2012). *Applied reliability* (3^e éd.). Boca Raton : CRC Press.
- Torrent, R. (1978). The log-normal distribution : A better fitness for the results of mechanical testing of materials. *Materials and Structures*, 11(4), 235-245. doi:[10.1007/BF02551768](https://doi.org/10.1007/BF02551768)
- Townson, P., Murthy, D. N. P. et Gurgenci, H. (2002). Optimization of dragline load. Dans W. R. Blischke et D. N. P. Murthy (dir.), *Case studies in reliability and maintenance* (p. 517-544). New York : John Wiley & Sons.
- Traoré, M. A. (2010). *Supervision adaptative et pronostic de défaillance pour la maintenance prévisionnelle de systèmes évolutifs complexes* (Thèse de doctorat). Université Lille I, Lille.
- US Army Material Command. (1975). *Engineering design handbook : Maintenance engineering techniques*. Washington D.C. : U.S. Government Printing Office.
- Uzgoren, N., Uysal, O., Elevli, S. et Elevli, B. (2010). Reliability analysis of dragline's mechanical failures. *Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 2010(4), 23-28.
- Vagenas, N., Kazakidis, V., Scoble, M. et Espley, S. (2003). Applying a maintenance methodology for excavation reliability. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 17(1), 4-19. doi:[10.1076/ijsm.17.1.4.8626](https://doi.org/10.1076/ijsm.17.1.4.8626)
- Vagenas, N., Runciman, N. et Clément, S. R. (1997). A methodology for maintenance analysis of mining equipment. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 11(1), 33-40. doi:[10.1080/09208119708944053](https://doi.org/10.1080/09208119708944053)
- Vaurio, J. (1999). Identification of process and distribution characteristics by testing monotonic and non-monotonic trends in failure intensities and hazard rates. *Reliability Engineering & System Safety*, 64(3), 345-357. doi:[10.1016/S0951-8320\(98\)00078-7](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(98)00078-7)
- Vayenas, N. et Wu, X. (2009). Maintenance and reliability analysis of a fleet of load-haul-dump vehicles in an underground hard rock mine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 23(3), 227-238. doi:[10.1080/17480930902916494](https://doi.org/10.1080/17480930902916494)
- Villemeur, A. (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation*. Paris : Eyrolles.
- Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139(3), 469-489. doi:[10.1016/S0377-2217\(01\)00197-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00197-7)
- Wijaya, A. R., Lundberg, J. et Kumar, U. (2012). Downtime analysis of a scaling machine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 26(3), 244-260. doi:[10.1080/17480930.2011.603515](https://doi.org/10.1080/17480930.2011.603515)

Annexes

ANNEXE I

TABLE DE LA LOI NORMALE CENTRÉE RÉDUITE

z^\dagger	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5754
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7258	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7518	0,7549
0,7	0,7580	0,7612	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7996	0,8023	0,8051	0,8079	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9430	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9485	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9700	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9762	0,9767
2,0	0,9773	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9865	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9980	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9983	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,0	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990
3,1	0,9990	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9993
3,2	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995	0,9995
3,3	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,4	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998	0,9998
3,5	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998
3,6	0,9998	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999

† Quantile d'ordre $[1 - \alpha/2]$.

ANNEXE II

TABLE DE LA LOI DU KHI CARRÉ

ν	α^\dagger										
	0,995	0,990	0,975	0,950	0,900	0,500	0,100	0,050	0,025	0,010	0,005
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,45	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88
2	0,01	0,02	0,05	0,10	0,21	1,39	4,61	5,99	7,38	9,21	10,60
3	0,07	0,11	0,22	0,35	0,58	2,37	6,25	7,81	9,35	11,34	12,84
4	0,21	0,30	0,48	0,71	1,06	3,36	7,78	9,49	11,14	13,28	14,86
5	0,41	0,55	0,83	1,15	1,61	4,35	9,24	11,07	12,83	15,09	16,75
6	0,68	0,87	1,24	1,64	2,20	5,35	10,64	12,59	14,45	16,81	18,55
7	0,99	1,24	1,69	2,17	2,83	6,35	12,02	14,07	16,01	18,48	20,28
8	1,34	1,65	2,18	2,73	3,49	7,34	13,36	15,51	17,53	20,09	21,95
9	1,73	2,09	2,70	3,33	4,17	8,34	14,68	16,92	19,02	21,67	23,59
10	2,16	2,56	3,25	3,94	4,87	9,34	15,99	18,31	20,48	23,21	25,19
11	2,60	3,05	3,82	4,57	5,58	10,34	17,28	19,68	21,92	24,72	26,76
12	3,07	3,57	4,40	5,23	6,30	11,34	18,55	21,03	23,34	26,22	28,30
13	3,57	4,11	5,01	5,89	7,04	12,34	19,81	22,36	24,74	27,69	29,82
14	4,07	4,66	5,63	6,57	7,79	13,34	21,06	23,68	26,12	29,14	31,32
15	4,60	5,23	6,26	7,26	8,55	14,34	22,31	25,00	27,49	30,58	32,80
16	5,14	5,81	6,91	7,96	9,31	15,34	23,54	26,30	28,85	32,00	34,27
17	5,70	6,41	7,56	8,67	10,09	16,34	24,77	27,59	30,19	33,41	35,72
18	6,26	7,01	8,23	9,39	10,86	17,34	25,99	28,87	31,53	34,81	37,16
19	6,84	7,63	8,91	10,12	11,65	18,34	27,20	30,14	32,85	36,19	38,58
20	7,43	8,26	9,59	10,85	12,44	19,34	28,41	31,41	34,17	37,57	40,00
21	8,03	8,90	10,28	11,59	13,24	20,34	29,62	32,67	35,48	38,93	41,40
22	8,64	9,54	10,98	12,34	14,04	21,34	30,81	33,92	36,78	40,29	42,80
23	9,26	10,20	11,69	13,09	14,85	22,34	32,01	35,17	38,08	41,64	44,18
24	9,89	10,86	12,40	13,85	15,66	23,34	33,20	36,42	39,36	42,98	45,56
25	10,52	11,52	13,12	14,61	16,47	24,34	34,38	37,65	40,65	44,31	46,93
26	11,16	12,20	13,84	15,38	17,29	25,34	35,56	38,89	41,92	45,64	48,29
27	11,81	12,88	14,57	16,15	18,11	26,34	36,74	40,11	43,19	46,96	49,64
28	12,46	13,56	15,31	16,93	18,94	27,34	37,92	41,34	44,46	48,28	50,99
29	13,12	14,26	16,05	17,71	19,77	28,34	39,09	42,56	45,72	49,59	52,34
30	13,79	14,95	16,79	18,49	20,60	29,34	40,26	43,77	46,98	50,89	53,67
40	20,71	22,16	24,43	26,51	29,05	39,34	51,81	55,76	59,34	63,69	66,77
50	27,99	29,71	32,36	34,76	37,69	49,33	63,17	67,50	71,42	76,15	79,49
60	35,53	37,48	40,48	43,19	46,46	59,33	74,40	79,08	83,30	88,38	91,95
70	43,28	45,44	48,76	51,74	55,33	69,33	85,53	90,53	95,02	100,43	104,21
80	51,17	53,54	57,15	60,39	64,28	79,33	96,58	101,88	106,63	112,33	116,32
90	59,20	61,75	65,65	69,13	73,29	89,33	107,57	113,15	118,14	124,12	128,30
100	67,33	70,06	74,22	77,93	82,36	99,33	118,50	124,34	129,56	135,81	140,17

\dagger Les quantiles d'ordre $[1 - \alpha]$ et d'ordre $[\alpha]$ se lisent α dans la colonne.

ANNEXE III

TABLE DE LA LOI DE STUDENT

n	α^\dagger										
	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05	0,025	0,010	0,005	0,0025	0,0010	0,0005
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,893	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,767
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,690
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,659
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
40	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
50	0,679	0,849	1,047	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496
60	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	2,915	3,232	3,460
80	0,678	0,846	1,043	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	2,887	3,195	3,416
100	0,677	0,845	1,042	1,290	1,660	1,984	2,364	2,626	2,871	3,174	3,390
120	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	2,860	3,160	3,373
∞	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291

\dagger Le quantile d'ordre $[1 - \alpha/2]$ se lit $\alpha/2$ dans la colonne.

ANNEXE IV

TABLE DE LA STATISTIQUE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

n	α				
	0,20	0,15	0,10	0,05	0,01
1	0,900	0,925	0,950	0,975	0,995
2	0,684	0,726	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,642	0,708	0,828
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,733
5	0,446	0,474	0,510	0,565	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,410	0,490
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,258	0,274	0,295	0,328	0,392
17	0,250	0,266	0,286	0,318	0,381
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,371
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,363
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,356
25	0,210	0,220	0,240	0,270	0,320
30	0,190	0,200	0,220	0,240	0,290
35	0,180	0,190	0,210	0,230	0,270
> 35	$1,07/\sqrt{n}$	$1,14/\sqrt{n}$	$1,22\sqrt{n}$	$1,36/\sqrt{n}$	$1,63/\sqrt{n}$

ANNEXE V

TABLE DE LA STATISTIQUE DE CRAMÉR-VON MISES

M	α				
	0,20	0,15	0,10	0,05	0,01
2	0,137	0,149	0,161	0,175	0,186
3	0,120	0,135	0,154	0,183	0,230
4	0,120	0,134	0,154	0,191	0,280
5	0,121	0,137	0,159	0,199	0,296
6	0,122	0,139	0,162	0,203	0,308
7	0,123	0,140	0,164	0,207	0,314
8	0,124	0,141	0,165	0,209	0,318
9	0,125	0,142	0,167	0,211	0,321
10	0,125	0,143	0,168	0,212	0,323
11	0,126	0,143	0,168	0,213	0,325
12	0,126	0,144	0,169	0,214	0,325
13	0,126	0,144	0,169	0,215	0,328
14	0,126	0,144	0,170	0,215	0,328
15	0,127	0,145	0,170	0,216	0,329
16	0,127	0,145	0,170	0,216	0,329
17	0,127	0,145	0,170	0,217	0,330
18	0,127	0,145	0,171	0,217	0,330
19	0,127	0,145	0,171	0,217	0,330
20	0,127	0,145	0,171	0,217	0,332
21	0,128	0,145	0,171	0,217	0,332
22	0,128	0,146	0,171	0,217	0,331
23	0,128	0,146	0,171	0,218	0,331
24	0,128	0,146	0,172	0,218	0,333
25	0,128	0,146	0,172	0,218	0,332
26	0,128	0,146	0,172	0,218	0,333
27	0,128	0,146	0,172	0,217	0,330
28	0,128	0,146	0,172	0,217	0,328
29	0,128	0,146	0,172	0,217	0,329
30	0,128	0,146	0,172	0,217	0,329
40	0,129	0,147	0,173	0,220	0,339
50	0,129	0,148	0,174	0,222	0,341
60	0,129	0,148	0,174	0,222	0,340
100	0,129	0,147	0,174	0,220	0,335

ANNEXE VI

CODE COMPOSANT

Code	Description
1	AIR ET EAU
5	AIR CONDITIONNE
10	ARTICULATION
20	CABLE
25	CAROUSSEL
30	CONVERTISSEUR DE COUPLE
35	CHASSIS
50	CYLINDRE
55	DIFFERENTIEL
60	FOREUSE
70	FREIN
95	MAT
100	MOTEUR
101	MOTEUR ELECTRIQUE
110	PNEUS ET ACCESSOIRE
150	SYSTEME HYDRAULIQUE
155	SYSTEME LUBRIFICATION
160	SYSTEME ELECTRIQUE
180	SYSTEME PROTECTION INCENDIE
190	SYSTEME REFROIDISSEMENT
210	TRACTION
215	TRANSMISSION
235	ACCESSOIRE
240	EQUIPEMENT
340	DEMARREUR
350	ALTERNATEUR
400	TETE DE ROTATION
425	COMPTEUR D'HEURE
470	CENTRALISATEUR
500	SIG

ANNEXE VII

CODE ACTION

Code	Description
10	AJUSTER
20	ANALYSER
30	CALIBRER
40	CHANGER
50	EN DEVELOPPEMENT
60	FABRIQUER
70	INSPECTER
80	INSTALLER
90	LUBRIFIER
95	FILTRATION
100	MODIFIER
110	NETTOYER
120	REMISE A NEUF
130	REPARER
135	PREPARER
140	SOUDER
145	MATERIEL
150	USINER
160	MISE EN SERVICE
170	PEINTURER
175	CERTIFIER
180	IDENTIFIER
185	MESURER
190	COUPER (TAILLER)
200	MAINTENANCE
205	CHANGEMENT DE PIECE
210	CHANGEMENT DE COMPOSANTE
215	ISOLER
220	MANIPULATION
230	REARMER
245	CREUSER
250	DEMANTELEMENT