

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
GENEVIÈVE PLEAU

FIABILITÉ DES ÉQUIPEMENTS

JANVIER 2007

Fiabilité des équipements

Gevenière Pleau

30003967

RÉSUMÉ

Cette étude élabore et valide un processus d'évaluation des caractéristiques de fiabilité selon la quantité de défaillances observées et en fonction de la constance du taux de défaillance. Ce processus a comme objectif d'assurer le suivi de la fiabilité opérationnelle des équipements à l'aide de critères de décision. Il s'intéresse à un cas appliqué pour lequel il y a plusieurs milliers d'équipements de différentes natures et où l'environnement et la qualité de la collecte des données obtenues ne peuvent pas être contrôlés étroitement. De plus, il évolue dans un contexte où les équipements ont été remplacés avec l'âge ou ont subi des modifications de conception, d'environnement ou d'exploitation afin de maintenir la fiabilité intrinsèque de ces équipements en fonction des défaillances observées.

Le processus a été validé par l'application de son ensemble sur des études déjà effectuées à l'intérieur de la centrale nucléaire de Gentilly 2 et dont une seule a été documentée pour le bien de l'étude.

Ce processus a démontré sa capacité d'évaluer les caractéristiques de fiabilité et de suivre la fiabilité opérationnelle en fonction du nombre de défaillances et de la constance du taux de défaillance. Il permet d'utiliser des critères pour trouver la taille de l'échantillon à analyser, pour discriminer les défaillances et pour appliquer le processus bayésien. Il permet également de détecter le vieillissement des équipements et de prendre les mesures nécessaires pour le maintien de la fiabilité.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de cette étude par leur support et collaboration. Je tiens particulièrement à remercier M. Georges Abdul-Nour, directeur de ce projet de maîtrise, de l'Université du Québec à Trois-Rivières et M. Raynald Vaillancourt co-directeur du projet et ingénieur à la centrale nucléaire Gentilly 2. Ils ont contribué de manière significative, par leurs précieux commentaires, à l'élaboration de ce travail. Je tiens spécialement à remercier M. Darragi Messaoudi, ingénieur à Hydro-Québec Distribution, pour avoir partagé ses connaissances et contribué grandement à l'élaboration du processus de suivi de la fiabilité opérationnelle. Je remercie tous les membres de l'équipe Fiabilité pour leurs judicieux conseils et leur aide. Je remercie la direction de la centrale nucléaire Gentilly 2 pour avoir fourni le temps et les ressources nécessaires afin de mener le travail à terme. Je souligne finalement, l'appui et le support que les membres de ma famille m'ont assuré tout au long de ce projet.

AVERTISSEMENT

Hydro-Québec se dégage de toute responsabilité quant à l'utilisation ou l'interprétation qui pourrait être faite des informations contenues dans ce rapport par une tierce partie. En aucun cas, Hydro-Québec ne saurait être tenu responsable de tout dommage ou préjudice quelconque lié à une utilisation ou une interprétation fautive de tout ce rapport ou d'une partie de ce rapport.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	II
REMERCIEMENTS.....	III
AVERTISSEMENT.....	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS.....	XII
<u>CHAPITRE 1: INTRODUCTION</u>	1
1.1 MISE EN CONTEXTE.....	1
1.2 CENTRALE NUCLEAIRE GENTILLY-2	2
1.3 DÉFINITION DE LA PROBLÉMATIQUE	4
1.4 BUT ET OBJECTIFS	5
1.5 HYPOTHÈSES ET LIMITES DE L'ÉTUDE	5
1.6 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	6
<u>CHAPITRE 2: MÉTHODOLOGIE</u>.....	14
2.1 ÉLABORATION D'UN MANUEL THÉORIQUE	14
2.2 CONCEPTION DU PROCESSUS DE SUIVI DE LA FIABILITÉ OPÉRATIONNELLE	15
2.3 VALIDATION DU PROCESSUS	17
<u>CHAPITRE 3: FONDEMENTS THÉORIQUES</u>.....	18
3.1 ESTIMATION DES CARACTÉRISTIQUES DE FIABILITÉ	18
3.2 ESTIMATION BAYÉSIENNE	28
3.3 SUIVI DE LA FIABILITÉ OPÉRATIONNELLE.....	30
3.4 LES TESTS D'HYPOTHÈSES.....	38
3.5 ANALYSE DE VIEILLISSEMENT.....	39

CHAPITRE 4: PROCESSUS POUR L'ANALYSE DE LA FIABILITÉ OPÉRATIONNELLE	42
4.1 CONCEPTION DU SYSTÈME DE COLLECTE DE DONNÉES.....	42
4.2 SÉLECTION D'UN ÉCHANTILLON PERTINENT ET COLLECTE DES DONNÉES.....	44
4.3 CALCUL DES CARACTÉRISTIQUES DE FIABILITÉ	48
4.4 SUIVI DE LA FIABILITÉ OPÉRATIONNELLE.....	50
4.5 OPTIMISATION DE LA FIABILITÉ OPÉRATIONNELLE	51
CHAPITRE 5: ANALYSE D'UNE ÉTUDE DE CAS	53
5.1 MISE EN CONTEXTE.....	53
5.2 CONCEPTION DU SYSTÈME DE COLLECTE DE DONNÉES.....	54
5.3 SÉLECTION D'UN ÉCHANTILLON PERTINENT ET COLLECTE DES DONNÉES.....	56
5.4 CALCUL DES CARACTÉRISTIQUES DE FIABILITÉ	57
5.5 SUIVI DE LA FIABILITÉ OPÉRATIONNELLE.....	59
5.6 OPTIMISATION DE LA FIABILITÉ OPÉRATIONNELLE	59
CHAPITRE 6: VALIDATION DU PROCESSUS.....	60
6.1 CONCEPTION DU SYSTÈME DE COLLECTE DE DONNÉES.....	60
6.2 SÉLECTION D'UN ÉCHANTILLON PERTINENT ET COLLECTE DES DONNÉES.....	63
6.3 CALCUL DES CARACTÉRISTIQUES DE FIABILITÉ	67
6.4 SUIVI DE LA FIABILITÉ OPÉRATIONNELLE.....	73
6.5 OPTIMISATION DE LA FIABILITÉ OPÉRATIONNELLE	81
CHAPITRE 7: ANALYSE DES RÉSULTATS	84
CONCLUSION.....	87
RECOMMANDATIONS.....	88
RÉFÉRENCES.....	89
ANNEXE A: NOTIONS PRÉALABLES	93
ANNEXE B : NOTIONS DE FIABILITÉ.....	97
ANNEXE C: CALCUL DE LA TAILLE DE L'ECHANTILLON (N).....	103

ANNEXE D: DÉTAIL DES CALCULS DES CARACTÉRISTIQUES DE FIABILITÉ	105
ANNEXE E: PRINCIPALES LOIS UTILISÉES EN FIABILITÉ.....	113
ANNEXE F: TESTS D'HYPOTHÈSES.....	120
ANNEXE G: DIAGRAMME DE DÉCISION POUR LA SÉLECTION DES DÉFAILLANCES...	130
ANNEXE H: DESCRIPTION DES SYSTÈMES ET DES ÉQUIPEMENTS À L'ÉTUDE.....	132
ANNEXE I: DESCRIPTION DES MODES DE DÉFAILLANCES	139
ANNEXE J: DÉTAIL DES DÉFAILLANCES DES VANNES DU RUC ET DU RTA	141
ANNEXE K: DÉTAIL DU CALCUL BAYÉSIEN	143
ANNEXE L : DISTRIBUTIONS POUR L'ANALYSE DE VIEILLISSEMENT	149

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Analyses fiabilité, maintenabilité, disponibilité possible.....	28
Tableau 2 : Classification des vannes motorisées d'arrêt du RUC.....	61
Tableau 3: Classification des vannes motorisées d'arrêt du RTA.	61
Tableau 4 : Principaux modes de défaillances des vannes motorisées	62
Tableau 5 : Nombre de défaillances par année dues au temps et à la sollicitation	66
Tableau 6 : Résultats des calculs des taux de défaillance	65
Tableau 7 : Résultats des calculs des probabilités de défaillance sur demande	66
Tableau 8 : Résultats des calculs des taux de réparation.....	66
Tableau 9 : Présentation des caractéristiques de fiabilité	68
Tableau 10 : Résultats des calculs des intervalles de confiance et facteur d'erreur.....	68
Tableau 11 : Résultats du test de comparaison de 2 moyennes observées	69
Tableau 12 : Résultats du test des l'intervalles de confiance.....	70
Tableau 13 : Résultats du calcul des caractéristiques de fiabilité.	70
Tableau 14 : Résultats du test de comparaison de 2 moyennes observées	71
Tableau 15 : Résultats du calcul des caractéristiques de fiabilité RUC/RTA.....	71
Tableau 16: Calcul Bayésien pour le taux de défaillance.....	72
Tableau 17: Calcul Bayésien pour la probabilité de défaillance sur demande	72
Tableau 18 : Résultats obtenus avec la méthode Kaplan-Meier	73
Tableau 19 : Résultats obtenus avec la méthode actuariale.....	75
Tableau 20: Résultats des calculs du test de Mann.....	76
Tableau 21: Résultats des calculs du test de Laplace	76
Tableau 22: Résultats des calculs du test de Mann pour le motofiltre	77
Tableau 23: Résultats des calculs du test de Laplace pour le motofiltre	77

Tableau 24: Résultats des calculs du test de Fisher-Snedecor	78
Tableau 25: Résultat des calculs pour le test de khi-deux (RUC)	78
Tableau 26 : Synthèse des données recueillies lors de l'étude sur les TAG	82
Tableau 27: Synthèse des équations pour le calcul des paramètres de fiabilité	106
Tableau 28 : Caractéristiques des principales lois	117
Tableau 29: Défaillances des vannes motorisées d'arrêt du RUC	141
Tableau 30: Défaillances des vannes motorisées d'arrêt du RTA.....	142
Tableau 31 : Données utilisées pour le tracé des distributions	149

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Méthodes d'estimations statistiques de la fiabilité d'un dispositif	21
Figure 2: Classement des défaillances (origine à gauche)	23
Figure 3: Taux de défaillance en fonction du temps	23
Figure 4: Modèles de courbes baignoire.....	24
Figure 5: Concept de l'intensité de défaillance	25
Figure 6: Les durées caractéristiques de FMD	27
Figure 7: Processus de suivi de la fiabilité opérationnelle.....	52
Figure 8 : Nombre de défaillances par années dues à la sollicitation.....	67
Figure 9 : Courbe de fiabilité obtenue avec la méthode Kaplan-Meiher (sans 1997-2000)	74
Figure 10 : Courbe de fiabilité obtenue avec la méthode Kaplan-Meiher (sans 2000-2003)	74
Figure 11 : Nombre de défaillances en fonction de l'année pour le filtre FR-50	77
Figure 12 : Graphique de Weibull des défaillances par sollicitation (82-96)	79
Figure 13 : Fiabilité des vannes motorisées du RUC à la sollicitation (82-96).....	80
Figure 14 : Graphique de Weibull pour les défaillances sur le temps (82-04)	80
Figure 15 : Fiabilité des vannes sur le temps	81
Figure 16 : Évolution de la probabilité de réussite au démarrage des TAG	83
Figure 17 : Évolution de la disponibilité des TAG	83
Figure 18 : Interrelations entre fiabilité, maintenabilité et disponibilité	99
Figure 19 : Types de défaillance	100
Figure 20 : Comparaison des concepts	118
Figure 21: Loi de fiabilité	119
Figure 22 : Procédure de traitement des DT.....	131
Figure 23 : Calcul Bayésien sans poids de λ pour RUC 82-96 + RUC 96-04.....	143
Figure 24 : Calcul Bayésien avec poids=2 de λ pour RUC 82-96 + RUC 96-04.....	143

Figure 25 : Calcul Bayésien sans poids de γ pour RUC 82-96 + RUC 96-04.....	144
Figure 26 : Calcul Bayésien avec poids=2 de γ pour RUC 82-96 + RUC 96-04.....	144
Figure 27 : Calcul Bayésien sans poids de λ pour RTA 82-96 + RTA 96-04.....	145
Figure 28 : Calcul Bayésien avec poids=2 de λ pour RTA 82-96 + RTA 96-04.....	145
Figure 29 : Calcul Bayésien sans poids de γ pour RTA 82-96 + RTA 96-04.....	146
Figure 30 : Calcul Bayésien avec poids=2 de γ pour RTA 82-96 + RTA 96-04.....	146
Figure 31 : Calcul Bayésien sans poids de λ pour RUC 82-04 + RTA 82-04	147
Figure 32 : Calcul Bayésien avec poids = 3 de λ pour RUC 82-04 + RTA 82-04	147
Figure 33 : Calcul Bayésien sans poids de γ pour RUC 82-04 + RTA 04-04	148
Figure 34 : Calcul Bayésien avec poids=2 de γ pour RUC 82-04 + RTA 82-04	148
Figure 35: Distribution exponentielle	150
Figure 36: Distribution Weibull.....	150
Figure 37: Distribution lognormale.....	151

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

CANDU : CANAda Deuterium-Uranium

CCSN : Commision Canadienne de la Sûreté Nucléaire

DT : Demande de Travail

EIREDA : European Industry Reliability Data Bank

EPRI : Electric Power Research Institute

EPS: Étude Probabiliste de Sûreté

FEP: Fiche d'Entretien Préventif

G-2 : Centrale Nucléaire d'Hydro-Québec de Gentilly 2

HQ : Hydro-Québec

ROCOF: Rate of occurrence of failure

RT : Rapport Technique

RTA : Refroidisseur en Temps d'Arrêt

RUC : Système de Refroidissement d'Urgence du Coeur

SIE : Système Intégré des Équipements

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

La fiabilité des équipements est un sujet qui préoccupe plusieurs types d'entreprises puisque les données de fiabilité sont nécessaires à de nombreuses activités importantes concernant la qualité et la durée de vie des produits et des services. Ces activités comprennent l'évaluation de la disponibilité, les décisions concernant la maintenance, les modifications de conception et le contrôle des performances.

Afin de caractériser la fiabilité des équipements, des études permettant d'obtenir la disponibilité, la maintenabilité et la probabilité ou la fréquence de défaillances des systèmes et de leurs composants sont réalisées. Ces études se déroulent généralement en laboratoire où tous les paramètres tel l'environnement sont contrôlés ou en industrie qui s'intéresse à quelques équipements spécifiques, ce qui fait en sorte que la collecte de l'information est très encadrée.

Cette recherche s'adresse au développement d'un processus pour caractériser la fiabilité de plusieurs milliers d'équipements de différentes natures (électrique, mécanique, électronique, etc.) à partir d'informations collectées sur plusieurs années (de 5 à 20 ans). Elle se distingue donc des autres études puisqu'elle s'intéresse à un cas appliqué où l'environnement et la qualité de la collecte des données obtenues ne peuvent pas être contrôlés étroitement et pour lesquels des équipements ont été remplacés avec l'âge ou ont subi des modifications de conception, d'environnement ou d'exploitation. Elle doit également considérer que le programme de maintenance a continuellement été adapté afin de maintenir la fiabilité intrinsèque de ces équipements en fonction des défaillances observées à l'intérieur de l'entreprise. Ce travail de

recherche est particulièrement intéressant pour les entreprises qui désirent prolonger la durée de vie de plusieurs équipements ou d'usines entières. Il s'agit actuellement du cas des centrales nucléaires et plus particulièrement des centrales CANDU dont une majorité atteindront dans quelques années leur durée de vie de conception. Par ce fait, plusieurs exploitants désirent prolonger la durée de vie de leurs équipements et améliorer leur programme d'entretien préventif.

La mise en œuvre d'un processus de caractérisation de la fiabilité des équipements représente des coûts importants et les résultats doivent être analysés adéquatement afin d'en garantir l'interprétation. Il faut donc s'assurer dans un projet global d'amélioration que les méthodes et procédures suivies pour la caractérisation des paramètres de fiabilité des équipements soient conformes aux standards internationaux. Le chapitre qui suit présente la centrale où est réalisée l'étude, explique l'énoncé du problème, le but et les objectifs de ce travail de recherche. De plus, les hypothèses et limitations du travail y sont présentées.

1.2 Centrale nucléaire Gentilly-2

Mise en service en octobre 1983 et exploitée à sa pleine puissance depuis juin 1987, la centrale de Gentilly-2 est la seule centrale nucléaire appartenant à Hydro-Québec. Elle fournit une puissance de 675 mégawatts, soit environ 3 % de la puissance installée du réseau provincial de production d'électricité. L'énergie électrique produite par Gentilly-2 peut répondre aux besoins d'environ 74 000 clients, mais elle est toutefois intégrée au réseau d'Hydro-Québec, comme celle de toutes les autres centrales de l'entreprise.

La technologie des centrales CANDU a été conçue et mise au point au Canada et toutes les centrales nucléaires canadiennes sont de ce type. La centrale de Gentilly-2 est plus

précisément de type CANDU-PHW (CANada Deuterium Uranium - Pressurized Heavy Water). Les mots deutérium et uranium indiquent que l'eau lourde agit comme modérateur des neutrons dans le réacteur et que l'uranium naturel est utilisé comme combustible. Quant aux lettres PHW, elles se rapportent au caloporteur et indiquent qu'il s'agit d'eau lourde sous pression. Une des caractéristiques distinctives des réacteurs CANDU, du type de celui de Gentilly-2, tient au fait que pendant leur exploitation normale on change en moyenne une quinzaine de grappes de combustible par jour. De plus, les réacteurs CANDU génèrent une petite quantité de déchets faiblement radioactifs qui sont générés, ainsi que la faible dose d'irradiation collective du personnel.

La centrale Gentilly-2 joue un rôle de premier ordre dans le réseau d'Hydro-Québec et son excellent facteur d'utilisation permet de produire environ 5 térawattheures par année. Puisqu'elle n'est pas sujette aux aléas de l'hydraulicité qui dépend des précipitations, elle apporte une certaine stabilité à un parc d'équipement comme celui d'Hydro-Québec. De plus, la présence d'une centrale comme celle de Gentilly-2 près des grands centres est avantageuse car elle permet de jouer le rôle d'un compensateur synchrone en stabilisant la tension du réseau de transport. Enfin, dans un réseau de grande envergure comme celui d'Hydro-Québec, il est avantageux d'exploiter un groupe nucléaire afin de maintenir un niveau de connaissances et d'expertise dans le domaine de la technologie nucléaire, puisque Gentilly-2 constitue ainsi une unité témoin pour l'entreprise dans la filière nucléaire. D'ailleurs, la centrale nucléaire de Gentilly-2 se classe périodiquement parmi les plus performantes de la série des CANDU à travers le monde.

1.3 Définition de la problématique

Des études de fiabilité sont présentement réalisées dans un contexte assez complexe, puisque la quantité d'équipements ayant un impact au niveau de la sûreté est élevée. Pour ce faire, une procédure interne est utilisée : « évaluation des caractéristiques de fiabilité d'un équipement ou d'une fonction » qui comprend six principales étapes soit :

- 1) Définition de la portée de l'étude;
- 2) Définition de la population d'observation;
- 3) Recueil de données;
- 4) Analyse préliminaire des données (statistiques descriptives);
- 5) Analyse statistique des données (statistiques probabilistes), et;
- 6) Synthèse et conclusion.

Cependant, cette procédure est générale [39] et pourrait être améliorée au niveau de l'application de certaines étapes, car elle doit être un outil d'aide à la décision. Également, il faut intégrer cette procédure à un processus plus global pour l'obtention des caractéristiques de fiabilité des principaux équipements critiques pour la sûreté.

La collecte de l'information et l'analyse statistique des données est l'étape clé de ce projet, car elle comprend le regroupement des données, l'estimation des caractéristiques de fiabilité, l'évaluation de la distribution appropriée, l'estimation bayésienne et l'analyse de vieillissement. Cette analyse permet d'obtenir des caractéristiques de fiabilité opérationnelle.

1.4 But et objectifs

Ce projet s'intègre à celui de conception d'une base de données de la fiabilité dans le cadre de la mise en œuvre d'un programme de fiabilité demandée par la commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN). L'objectif du programme est de garantir la fiabilité des systèmes importants pour la sûreté de la centrale nucléaire, conformément aux critères de conception, de performance et de sûreté pertinents. Le but du projet est donc de développer le processus d'évaluation des caractéristiques de fiabilité avec critères selon la quantité de défaillances observées et en fonction de la constance ou non du taux de défaillance. Pour ce faire, il faudra utiliser des études déjà réalisées afin de trouver un équilibre coûts-bénéfices. En effet, l'ajout de sous-étapes dans le processus signifie une augmentation des coûts associés à l'étude. Il faudra donc être en mesure de déterminer à quel niveau doit s'arrêter l'étude pour que les coûts engendrés ne dépassent pas les bénéfices retirés (ex : données utiles pour analyses ultérieures).

Les objectifs à atteindre sont donc de développer le processus en respectant les nouvelles exigences réglementaires, en ajoutant une partie d'aide à la décision et en vérifiant si l'étape d'analyse statistique des données est adéquate. De plus, il faut établir des étapes pour vérifier la constance du taux de défaillance et l'analyse qui devra être effectuée pour les cas où le taux de défaillances s'avère non-constant.

1.5 Hypothèses et limites de l'étude

La principale hypothèse de ce travail est la source d'information pour colliger les défaillances. La validité des résultats dépend de la représentativité de l'échantillon des équipements retenus et

de la garantie de recenser toutes les défaillances et dégradations observées sur les équipements.

Dans la présente étude, le système de gestion de la maintenance nous permet de garantir que toutes les dégradations ou défaillances soient documentées et accessibles depuis juillet 1992. Avant cette date, les informations disponibles sont seulement sur papier ce qui limite la facilité de recherche, complique la possibilité d'analyse des informations et augmente considérablement les coûts du travail.

1.6 Revue de la littérature

Cette section est un résumé de la littérature présentant l'historique et la mise en contexte de la fiabilité dans plusieurs types d'industries et en particulier celle du nucléaire. Elle mène au chapitre 3 qui présente les fondements théoriques se rattachant à la méthodologie définie au chapitre 2, permettant ainsi de créer un processus menant vers l'analyse des caractéristiques de fiabilité.

1.6.1 Principaux concepts de la fiabilité

La préoccupation pour la fiabilité et la sécurité existe probablement depuis que l'homme a façonné ses premiers outils. L'expérience acquise par leur utilisation a mené l'homme à les améliorer. C'est donc l'apprentissage par la panne ou par l'accident qui a été le principal moyen pour mieux maîtriser la fiabilité et la sécurité. Keller et Modarres [19] soulignent que les premières considérations pour la question de sûreté nucléaire sont survenues avec le projet Manhattan durant la deuxième guerre mondiale. En effet, le besoin de maîtriser rapidement la fiabilité de systèmes complexes a fait ressortir de nouveaux concepts comme la prévision de la

fiabilité dès la conception. La méthode de l'Analyse des modes de défaillance et de leurs effets a été employée pour la première fois à partir des années 1960 dans le domaine de l'aéronautique pour l'analyse de la sécurité des avions. Depuis, l'utilisation de cette méthode s'est généralisée dans de très nombreux secteurs industriels [16] dont le domaine nucléaire.

1.6.2 Définition du cadre d'une analyse des caractéristiques de fiabilité

L'analyse d'un système est un processus orienté vers l'acquisition, l'investigation et le traitement ordonné d'informations spécifiques au système et pertinente vis-à-vis d'une décision ou d'un objectif donné. Ce processus aboutit à l'obtention d'un modèle du système [40]. La Norme CEI-863 [6] indique d'ailleurs qu'un modèle de fiabilité doit être donné avec sa justification, les hypothèses et l'adéquation du choix. Les modèles de références peuvent être présentés soit par des diagrammes de fiabilité, des arbres de défaillance, des diagrammes d'états ou leur combinaisons appropriées. Les graphes utilisés doivent être accompagnés des informations suffisantes pour corréler les éléments du modèle de fiabilité [7], aussi bien avec les parties du système ou de l'équipement qu'avec le modèle mathématique appliqué aux caractéristiques de fiabilité.

La NASA [29] a développé une norme technique pour la fiabilité et la maintenabilité qui fournit des informations sur le développement des conditions de fiabilité, l'exécution de conception, et l'évaluation. Elle a été développée pour fournir une source centralisée d'information pour établir des conditions et des facteurs de conception. Ce document traite des principaux points dont il faut tenir compte lorsqu'on a un système d'analyse de la fiabilité à l'intérieur d'une entreprise tels que :

- Établir des exigences réalistes pour le développement des spécifications du système.
- Allouer dès le début de l'attention à la fiabilité et tout au long du design du système

- Contrôler le coût du cycle de vie du système en dédiant des coûts d'opération et d'entretien pendant la conception du système
- Considérer la mesure et l'évaluation de la fiabilité pour tout le cycle de vie du système et maintenir une base de données complète et aisément accessible des données de succès et de défaillance.

Deux méthodes connues afin d'améliorer la fiabilité d'un système sont d'augmenter la fiabilité des composants et/ou d'ajouter la redondance. Plusieurs des modèles d'optimisation de fiabilité sont formulés en tant que systèmes en série de N-étapes. À chaque étape, il y a l'option d'ajouter la redondance sous la forme de composants parallèles. Le problème d'optimisation est de déterminer le nombre optimal de composants parallèles à chaque étape avec la fiabilité de chaque composant pour maximiser la fiabilité du système soumis aux contraintes de ressources telles que le coût. Painton et Campbell [32] présente un modèle d'optimisation qui identifie les types d'améliorations et le niveau de l'effort dépensé pour ces améliorations afin de maximiser un ou plusieurs critères de performance, sujet aux contraintes en présence de l'incertitude du taux de défaillance des composants.

Lorsque les buts de l'analyse de fiabilité ont été établis, il faut par la suite définir la population d'observation. Le choix des équipements étudiés dépend de la quantité. Quand le nombre est limité ils sont tous sélectionnés, alors que lorsque le nombre est élevé, un échantillon aléatoire est choisi selon les méthodes statistiques habituelles. De telles études engendrent des coûts élevés et c'est dans cette optique que Yang et ses collègues [41] ont développé à l'aide d'un algorithme génétique une méthode d'allocation de la fiabilité dans un processus d'optimisation, afin de minimiser les coûts de ces études et de se soumettre aux contraintes de sûreté de l'ensemble d'une centrale. L'importance de l'allocation de fiabilité est soulignée sous plusieurs aspects dont l'allocation des ressources limitées adéquatement et la réduction de la conception

abusive. Leur étude porte sur les réacteurs et leurs sous-ensembles, mais démontre que l'algorithme pourrait être appliqué à d'autres systèmes de nouvelles centrales nucléaires ou d'autres déjà existantes.

Une analyse des caractéristiques de fiabilité des équipements implique le recueil de nombreuses données. La Norme CEI-300-3-2 [8] explique les objectifs de la collecte des données. Tout d'abord, le recueil des données permet le suivi du niveau réel des performances des entités sous contrôle, il fournit également des informations aux organismes de direction, de planification, d'exploitation et de logistique de maintenance et apporte un soutien à la formation du personnel. De plus, la collecte permet d'identifier les modes de pannes, les causes de défaillances et, éventuellement, les mécanismes de défaillances. En dernier lieu, il est possible de comparer les données spécifiées ou prévisionnelles des entités aux performances réelles en exploitation.

Lorsque les données sont recueillies, une analyse statistique descriptive est possible. Cette analyse est préliminaire et rend plus intelligible une série d'observations en permettant de dégager les caractéristiques essentielles qui se dissimulent dans une masse de données [4]. La forme exacte de l'analyse statistique des données est spécifique à chaque utilisation et peut représenter un processus complexe, consommateur de temps. Pour une entité, on peut combiner les différents ensembles de données qui sont disponibles dès lors que les mêmes critères de sélection ont été appliqués à chaque ensemble. Le choix des méthodes appropriées pour le traitement des données peut dépendre de certains facteurs comme, éventuellement, l'influence du temps sur le processus ou le fait que plus d'une cause de défaillance soient directement liée aux données (Norme CEI-300-3-2) [8]. Martz et Kvam [23] expliquent comment une partie importante de l'analyse des données de fiabilité concerne l'identification de statistiques de tendances et de modèles inhérents aux données selon une échelle de temps.

Pour les auteurs, une tendance signifie une croissance ou décroissance constante dans le temps pour une caractéristique de fiabilité tel que le taux de défaillance. Ils montrent donc une méthode graphique simple pour déterminer si des tendances peuvent être ressortie. Deux exemples de centrales nucléaires sont présentés afin d'illustrer la méthode.

1.6.3 Aspects des études de fiabilité

L'étape subséquente est l'utilisation des statistiques probabilistes ou analytiques qui permettent de valider les hypothèses [9] et de tirer des conclusions plus approfondies. Dans de nombreux cas, les statistiques classiques donnent des résultats satisfaisants, mais il existe un certain nombre de situations pour lesquelles l'utilisation de ces techniques devient hasardeuse. Par exemple, lorsqu'il faut estimer la fiabilité d'un composant alors qu'il dispose d'un faible effectif d'observations expérimentales, voire d'aucune défaillance observée sur une durée donnée. Les statistiques classiques ne sont d'aucun secours, on dispose tout au plus d'une valeur médiane par la loi du khi-deux, ce qui est tout à fait subjectif [3]. C'est pourquoi l'estimation bayésienne des caractéristiques de fiabilité fait partie de l'analyse statistique, puisqu'elle permet de traiter les données alors qu'on en a peu de disponibles.

Atwood et ses collègues [1] ont développé un manuel qui fournit les informations de base requises pour effectuer les évaluations des caractéristiques de fiabilité. Il commence en décrivant les modèles de probabilité et les données d'usines employées pour évaluer chacune des caractéristiques. Des sources possibles pour les données sont identifiées et des conseils sur la collecte, le criblage, et l'interprétation sont fournis. Les techniques statistiques (méthodes bayésiennes et classiques) exigées pour analyser les données rassemblées et pour examiner la validité des modèles statistiques sont décrites. Des exemples sont fournis pour aider l'analyste de EPS (étude probabiliste de sûreté) à utiliser les différentes techniques. Ce manuel fournit

également les techniques avancées qui permettent de modéliser des tendances de temps. Des méthodes pour combiner des données d'un certain nombre de sources semblables, mais non identiques sont également fournies. Ceci inclut des approches bayésiennes empiriques et hiérarchiques. La partie sur l'analyse de données d'une étude probabiliste de sûreté (EPS) d'une centrale nucléaire fournit des évaluations pour les paramètres employés afin de déterminer les fréquences et les probabilités des divers événements modélisés dans une EPS. L'objectif de ce manuel est donc de fournir des méthodes pour estimer les caractéristiques utilisées dans les modèles de EPS et pour mesurer les incertitudes dans les évaluations.

Un des buts de l'analyse statistique des données est de déterminer les caractéristiques de fiabilité des équipements. L'article de Melo et Pereira [24] décrit une méthodologie pour calculer la variation des caractéristiques de fiabilité tels que le taux de défaillance des équipements ainsi que les taux de réparation. Cette information peut être employée pour évaluer les coûts/bénéfices de l'amélioration de la fiabilité des équipements en réduisant le temps d'arrêt, en embauchant du personnel additionnel pour des réparations ou en utilisant des techniques plus sophistiquées pour les systèmes de surveillance et d'entretien. Les indices de sensibilité peuvent également être employés pour estimer l'impact de l'incertitude des paramètres sur les caractéristiques de fiabilité. Leur méthodologie est facile à mettre en application sur des programmes existants d'évaluation de fiabilité. Basée sur l'énumération d'états ou la simulation de Monte Carlo, elle n'exige pas de support informatique additionnel.

De plus, Pörn [34] se penche sur le travail pour le manuel des données de fiabilité qui est employé dans des analyses de sûreté des centrales nucléaires de Suède. Le manuel fournit des distributions d'incertitude pour les intensités de défaillance, basées sur des données d'exploitation rassemblées dans une base de données. La supposition la plus commune sur laquelle les banques de données de défaillances sont basées est que les défaillances des

composants se produisent selon une loi de Poisson. Bien que les composants soient groupés selon leur type, mode de fonctionnement, taille et capacité, il y a certains facteurs tels que l'environnement de fonctionnement et d'entretien qui rendent peu réaliste d'assumer l'homogénéité complète des groupes de composants en ce qui concerne la fiabilité (ceci est identifié dans le manuel militaire). La recherche de Pörn [34] décrit une méthode bayésienne, par laquelle la similitude des groupes d'équipements est prise en considération dans le modèle de base de probabilité et est utilisée statistiquement.

Fleming [13] a développé une méthode afin de prédire la fiabilité d'un système de pompage pour un projet subventionné par EPRI. Cette méthode inclue la démarche d'analyse de Markov modélisant la technique pour prévoir l'influence des stratégies alternatives d'inspection sur la fiabilité de systèmes de pompage, et celle de l'incertitude de Bayes pour mesurer les variations des caractéristiques de fiabilité du système. Cet article décrit ces méthodes et identifie les bases de données associées requises pour leur mesure en mettant l'accent sur l'application du modèle de fiabilité de Markov. Des techniques sont développées concernant la mesure de fiabilité qui devrait être employée pour les études probabilistes de sûreté afin d'estimer, par exemple, la fréquence, dépendante du temps, de la perte accidentelle de liquide réfrigérant ou d'événements internes comme une inondation. La méthodologie pour des évaluations développées de tous les paramètres d'entrée des modèles de fiabilité est démontrée par des exemples.

Une des principales caractéristiques de fiabilité est le taux de défaillances, Fleming et Lydell [14] présentent des développements récents dans la méthodologie et les bases de données pour l'estimation des taux de défaillance et des fréquences de rupture dans les systèmes de canalisation d'une centrale nucléaire. Les évaluations de taux de défaillance pour les systèmes de canalisation sont des entrées importantes aux études probabilistes de sûreté. Suite au

développement d'une méthodologie pour mesurer les incertitudes à l'aide du théorème de Bayes pour le programme d'inspection du risque par EPRI, Fleming et Lydell [14] identifient les questions techniques avec les évaluations publiées précédemment.

Les analyses de fiabilité engendrent des coûts importants pour l'entreprise qui les réalisent. Le rôle des coûts est donc très important pour l'opération et la planification des systèmes. Dans les analyses traditionnelles de fiabilité, ces coûts ont été rarement pris en considération, principalement en raison du manque de modèles mathématiques appropriés. C'est ainsi que dans leur article Anders et Silva [2] présentent de nouveaux modèles pour que les analyses considèrent deux aspects importants soit la modélisation probabiliste et l'évaluation économique. Afin de modéliser l'aspect économique de la fiabilité d'un système ils utilisent la chaîne modifiée de Markov.

En résumé, la section de revue de littérature permet d'introduire les différentes parties dont traitera le travail de recherche. En premier lieu, une présentation de principaux concepts était nécessaire afin de bien définir le sujet et d'entrer ensuite dans l'essence du sujet soit la définition du cadre d'une analyse des caractéristiques de fiabilité. Cette section présente la méthodologie générale à suivre proposée par la littérature afin de réaliser une étude. Cette méthodologie comprend l'établissement des buts et objectifs de l'analyse, la sélection de l'échantillon et le recueil des données. Lorsque les données sont rassemblées, une analyse descriptive peut être effectuée, ce qui permet d'identifier des statistiques de tendances. L'étape suivante est l'utilisation des statistiques probabilistes qui permettent d'estimer, par exemple, les caractéristiques de fiabilité d'un équipement pour lequel on a un faible effectif d'observations voire aucune défaillance. En conclusion on comprend que l'évaluation des taux de défaillance est une entrée importante aux études probabilistes de sûreté.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour chacune des étapes du travail afin d'arriver au résultat final d'élaboration et de validation du processus de suivi de la fiabilité opérationnelle en exploitation. En premier lieu, il est présenté la méthodologie utilisée pour effectuer un regroupement de la théorie nécessaire à la conception du processus. En deuxième lieu, la méthodologie de conception du processus de suivi de la fiabilité opérationnelle est développée. Finalement, les étapes nécessaires à la validation du processus sont énumérées.

2.1 Élaboration d'un manuel théorique

Pour cette partie de la recherche les principales étapes du travail consiste à :

- Effectuer une recherche bibliographique pour tous les sujets reliés au processus à concevoir pour le suivi de la fiabilité opérationnelle. Tout d'abord :
 - compiler la littérature utilisée à l'interne puisqu'une expérience a été acquise lors de plusieurs cas appliqués à la centrale,
 - ensuite consulter l'information externe en commençant par l'Amérique du Nord (ex : EPRI), puisque les pratiques sont similaires, puis en se tournant vers l'Europe (ex : EDF).
- Trier l'information trouvée et retenir ce qui s'applique au contexte de l'étude soit des entreprises où il y a un grand nombre d'équipements de différentes natures (électrique,

mécanique, électronique, etc.) et où l'environnement et la qualité de la collecte des données obtenues ne peuvent être contrôlés étroitement.

- Regrouper l'information par sujets comme les tests de constance du taux de défaillance ou les méthodes pour détecter le point de vieillissement.
- Synthétiser pour présenter ce qui sera utilisé dans le processus en ordre chronologique d'utilisation donc en commençant par les notions de bases.

2.2 Conception du processus de suivi de la fiabilité opérationnelle

Cette partie de la recherche a été élaborée en collaboration avec l'équipe Fiabilité de la centrale nucléaire Gentilly-2. Le travail consiste à :

- Définir en détail les buts et objectifs du processus, identifier les besoins qui ont motivé sa création et identifier les variables qui doivent être mesurées
- Analyser l'ensemble de la procédure G2-PI-AF-101 [39] utilisée par le département d'analyse et fiabilité de G2 afin de vérifier que les hypothèses qui la sous-tendent permettent d'atteindre le but visé soit l'obtention des caractéristiques de fiabilité. Par la suite, identifier les étapes manquantes afin de répondre aux objectifs définis précédemment.
- Identifier les intrants (fonction, frontières, essais, entretiens, modifications et environnement d'exploitation) et les extrants du processus afin d'établir les frontières du processus.

- Déterminer les principales étapes du processus qui le composeront et permettront de guider les utilisateurs en fonction des buts recherchés. Élaborer ensuite les activités pour chacune des étapes.
 - Définir les processus pour calculer les caractéristiques de fiabilité des équipements et composants de certains groupes prédéterminés (Systèmes Importants pour la Sûreté).
 - Établir la méthode de traitement des données spécifiques et génériques et d'analyse des défauts observés sur les équipements afin de les classer en fonction qu'il s'agit d'une défaillance ou non, du mode de défaillance et de préciser pour chacun, les causes et mécanismes.
 - Déterminer les étapes pour l'analyse statistique descriptive des défaillances (par exemple, le nombre de défaillances par mode et par équipement).
- Déterminer les liens entre les activités ainsi que les arbres de décision selon le type d'étude afin de permettre l'évaluation des caractéristiques de fiabilité (taux de défaillance en fonction du temps, probabilité de défaillance sur sollicitation).
- Définir les méthodes permettant d'évaluer la constance du taux de défaillance par des tests, des intervalles de confiance, par le calcul du facteur d'erreur ou un calcul bayésien.
- Déterminer les méthodes à employer pour évaluer la constance du taux de défaillance ainsi qu'un processus avec critères de décision pour les cas où le taux n'est pas constant. Il faut également que cela soit en fonction du nombre de défauts.
- Définir les méthodes pour déterminer les tendances et découvrir la dégradation (vieillessement) des équipements.

- Écrire une procédure permettant d'appliquer le processus lors d'une étude des caractéristiques de fiabilité.

2.3 Validation du processus

Pour cette partie de la recherche, les principales activités à réaliser sont :

- Choisir les études qui permettent de valider toutes les parties du processus que ce soit les cas avec beaucoup ou peu de défauts, de calcul bayésien, de situations de constance ou non du taux de défaillance et d'analyse du vieillissement.
- Vérifier si chaque étape du processus a été considérée dans l'étude et noter celles qui manquent.
- Vérifier si l'information se retrouve au bon endroit dans le rapport ou si elle doit être redirigée dans une autre section en fonction de la procédure.
- Rédiger les sections manquantes et effectuer les calculs qui ne faisaient pas partie de l'étude afin de valider la procédure.
- Vérifier si des recommandations supplémentaires auraient pu être établies grâce à ce nouveau processus.
- Quantifier à partir des études validées les bénéfices du nouveau processus.

Chapitre 3

FONDEMENTS THÉORIQUES

Ce chapitre présente l'ensemble de la théorie qui a été requise pour la conception d'un processus de suivi de la fiabilité opérationnelle. La première partie présente la théorie relative à la conception du processus d'estimation des caractéristiques ainsi que les notions préalables et les notions de fiabilité nécessaires pour mettre tous les acteurs au même niveau en ce qui concerne les connaissances générales. La seconde partie présente l'estimation bayésienne et la troisième les principales lois utilisées en fiabilité et les méthodes pour le suivi de la fiabilité opérationnelle. Les dernières parties contiennent les tests d'hypothèses pouvant être utilisés et les calculs relatifs à l'analyse du vieillissement. Ce chapitre se veut donc le regroupement des définitions de la théorie, des équations mathématiques, des hypothèses, des limites d'application et des techniques de résolution ainsi que leur justification.

3.1 Estimation des caractéristiques de fiabilité

Pour effectuer une étude d'estimation des caractéristiques de fiabilité, un processus rigoureux doit être suivi. La partie qui suit présente les prémisses du processus qui sera développé afin de suivre la fiabilité opérationnelle ainsi que les caractéristiques pouvant être à l'étude.

3.1.1 Processus

L'historique d'un composant ou d'un système fournit un échantillon chronologique de N valeurs du temps entre les défaillances (MTBF). Il faut s'assurer que le test statistique permette de traiter le nombre de valeurs contenues dans l'échantillon. Cet échantillon est une représentation du passé appartenant à une population mère constituée de toutes les défaillances passées et à

venir, sur un système ou composant donné. Notons que d'autres historiques établis à partir de systèmes identiques exploités dans des conditions comparables fourniraient d'autres valeurs numériques. Afin d'uniformiser l'utilisation des concepts tel que composant et système, l'annexe A présente les définitions des notions préalables. Pour ce qui est des notions générales de fiabilité, il faudra se référer à l'annexe B.

L'objectif des analyses de fiabilité est de caractériser la population mère de défaillances afin de connaître le comportement et de faire des prévisions utiles à la maintenance. Cette caractérisation peut s'obtenir :

- à partir de la description statistique de l'échantillon si celui-ci est significatif ;
- par l'exploitation de modèles probabilistes déduits de l'échantillonnage.

La **Figure 1** schématise deux méthodes de traitement des données :

- Pour les grands échantillons ($N > 50$), il faut mettre en œuvre une estimation statistique en application de la statistique descriptive. Cette méthode donnera des estimateurs empiriques de la fiabilité de l'échantillon.
- Pour des échantillons petits ($8 < N < 50$), il faut mettre en œuvre une recherche de loi de probabilité ajustable à l'échantillon. Cette méthode fournira les caractéristiques de la population mère associée à un intervalle de confiance, sous forme graphique et/ou analytique.

Sélection d'un échantillon

L'étape de sélection d'un échantillon est importante, car il est essentiel d'obtenir une population homogène pour laquelle il sera possible de calculer des caractéristiques de fiabilité. Les principaux critères de sélection sont:

- les dates de début et de fin d'observation,

- les équipements concernés (le type, la famille et l'état des équipements, le niveau de décomposition dans l'arborescence matérielle, les limites des équipements),
- éventuellement un mode de défaillance pour ces équipements, si l'on s'intéresse à une évaluation de sécurité, ou à un calcul de disponibilité,
- les caractéristiques techniques : l'échantillon doit comprendre des équipements ayant les mêmes caractéristiques de conception,
- les conditions de fonctionnement : le type d'utilisation doit être similaire, les temps de fonctionnement (heures de fonctionnement et sollicitations) doivent être récupérées.
- les conditions environnementales (température, humidité, corrosion,...).

Il faut ensuite s'assurer que les données soient valides et pertinentes pour le problème posé. Dans le cas de l'analyse de défaillances, cette validation nécessite la comparaison entre le résumé de la défaillance et les rubriques codées afin de vérifier :

- la cohérence avec les arborescences fonctionnelles-matérielles (c'est la cohérence de l'analyse de défaillances et du mode de défaillance),
- le degré de la défaillance,
- l'expertise des informations concernant la maintenance réalisée,
- la cohérence des informations sur les défaillances avec les connaissances des experts en matière de fonctionnement et de comportement des équipements,
- et de comparer avec d'autres sources de données : les données événementielles, les données du système de gestion de la maintenance.

Cette validation est le point le plus critique de l'analyse du retour d'expérience. Elle est fondamentale, car elle permet l'analyse a posteriori, et par conséquent l'amélioration des équipements et des installations.

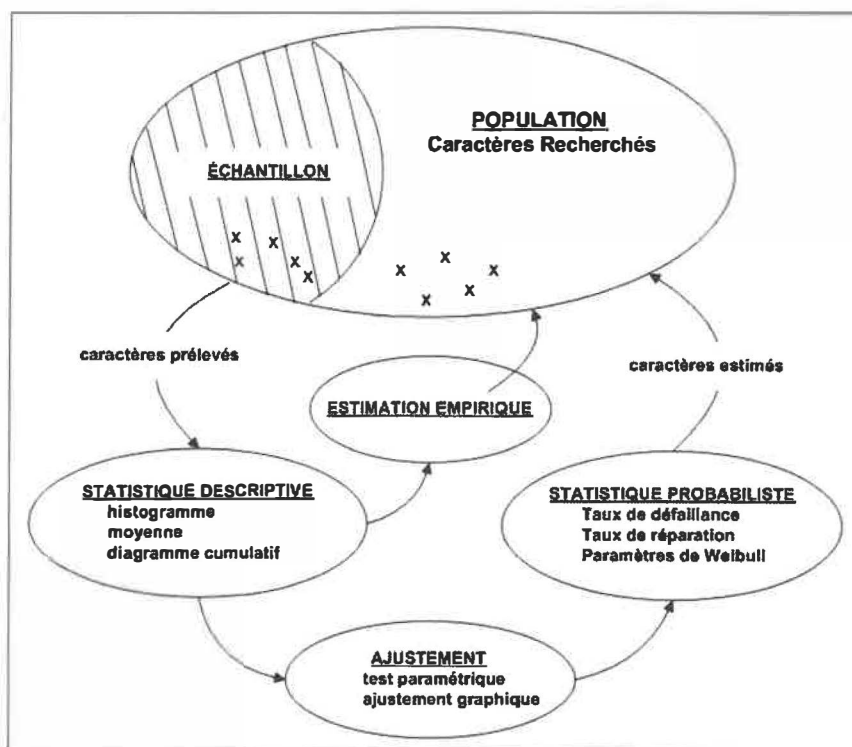


Figure 1 : Méthodes d'estimations statistiques de la fiabilité d'un dispositif (adapté de [10])

Statistique descriptive

La statistique descriptive se définit comme l'instrument statistique qui permet de donner un sens, une expression à l'information recueillie. Elle rend plus intelligible une série d'observations en permettant de dégager les caractéristiques essentielles qui se dissimulent dans une masse de données. Nous obtenons donc par la statistique descriptive une image concise et simplifiée de la réalité : un résumé statistique qui caractérise l'essentiel [4]. À partir des résultats obtenus, classés dans des tableaux, il est possible de réaliser, entre autre, des histogrammes et diagrammes cumulatifs.

Statistique probabiliste

En fiabilité, certaines lois sont utilisées et pour chacune l'estimation peut se faire rapidement par des méthodes graphiques ou analytiquement. Les ajustements graphiques se font sur des papiers à échelles fonctionnelles qui sont conçus pour linéariser la fonction de répartition $F(t)$ à

partir du nuage de points représentatif des résultats obtenus en exploitation. Les tests paramétriques, quant à eux, ont pour rôle de vérifier qu'une loi de probabilité est applicable à un échantillon de valeurs α ou un niveau de confiance $1-\alpha$. À chaque loi de probabilité correspond un ou plusieurs tests statistiques de corrélation ou de tendance appropriés [12].

3.1.2 Calcul des caractéristiques

Cette section présente les principales caractéristiques de fiabilité et leurs équations [35], le détail des variables et des calculs se trouvent à l'annexe D.

Taux de défaillance

Le taux de défaillance ($\lambda(t)$) est défini comme la probabilité conditionnelle qu'une entité soit en panne à l'instant $t + \Delta t$ sachant qu'il était en fonction à l'instant t . Il arrive souvent que des entités présentent un taux de défaillance en fonction du temps suivant une courbe dite « en baignoire » (Figure 3).

$$\lambda = \frac{n}{N * T}$$

Le taux de défaillance est applicable à tout composant non réparable. Il est associé au temps de la première défaillance et au temps moyen à la première défaillance. Il s'intéresse également à la distribution des temps à la défaillance tel que démontré à la Figure 2.

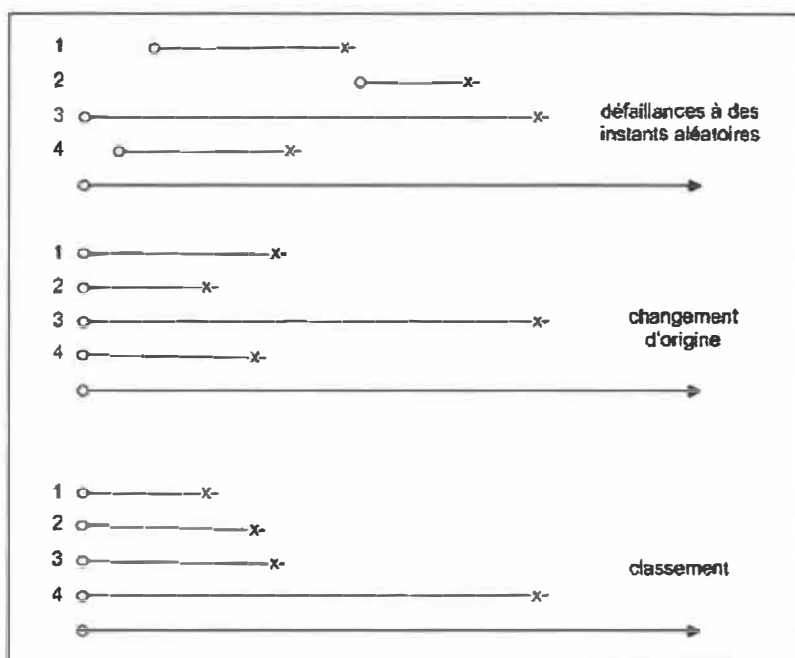


Figure 2: Classement des défaillances (origine à gauche) (extrait de [20])

Courbe en baignoire

Le modèle classique de « courbe en baignoire » caractérise la forme générale de l'évolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ des composants depuis leur début de vie jusqu'à l'apparition des phénomènes d'usure.

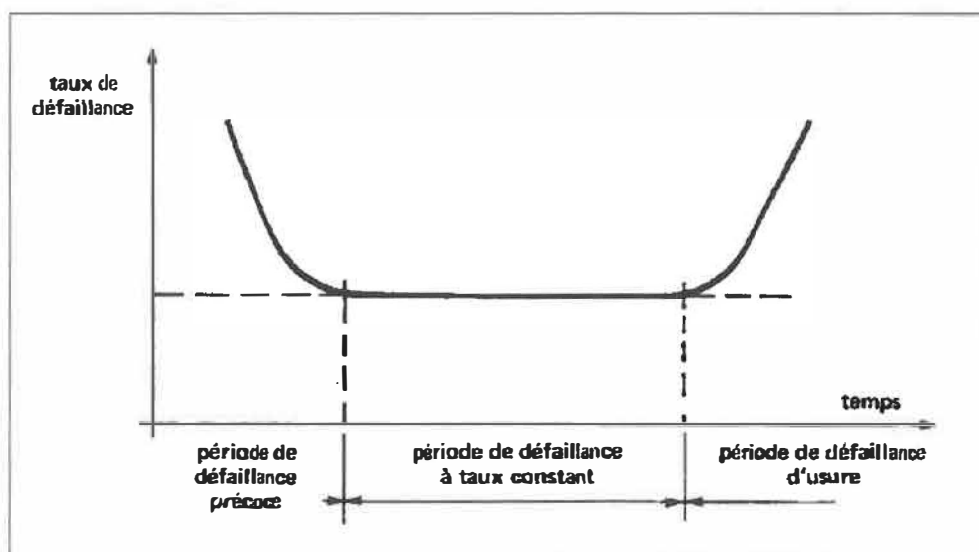


Figure 3: Taux de défaillance en fonction du temps

Trois périodes sont observées sur la courbe de la **Figure 3** :

- a) Période de défaillance précoce : période de rodage de l'entité pendant laquelle le taux de défaillance décroît rapidement. Ce phénomène résulte de l'élimination progressive des composants « faibles » de la population mise en service.
- b) Période de défaillance à taux constant : durée de vie utile de l'entité pendant laquelle les défaillances se produisent avec un taux passablement constant.
- c) Période de défaillance d'usure : période de dégradation de l'entité durant laquelle le taux de défaillance augmente rapidement. Elle est révélatrice des phénomènes de vieillissement (fatigue, usure, corrosion).

On distingue également six différents modèles de courbe du taux de défaillance en fonction du temps selon le type d'équipement. La **Figure 4** présente ces différentes courbes.

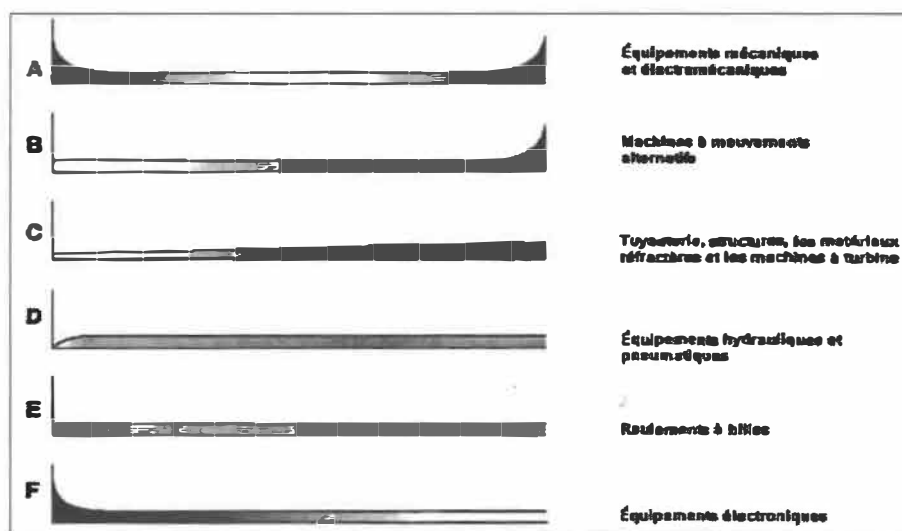


Figure 4: Modèles de courbes baignoire

Intensité de défaillance

Le concept de l'intensité de défaillance s'applique aux systèmes réparables. Les défaillances reviennent périodiquement et ce sont les temps entre les défaillances qui retiennent l'attention ainsi que le nombre de défaillances observées pendant Δt tel que présenté à la Figure 5. C'est la limite du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l'instant T d'une défaillance d'une entité soit compris dans un intervalle de temps donné $[t, t + \Delta t]$. L'intensité de défaillance $z(t)$ suppose que l'entité est en fonctionnement au temps $t=0$ (ou plus généralement dans l'état normal), tandis que le taux de défaillance admet, en plus, que l'entité n'a pas eu de défaillance sur $[0, t]$.

$$\hat{z} = \frac{\text{nombre de défaillances observées pendant } \Delta t}{\Delta t}$$

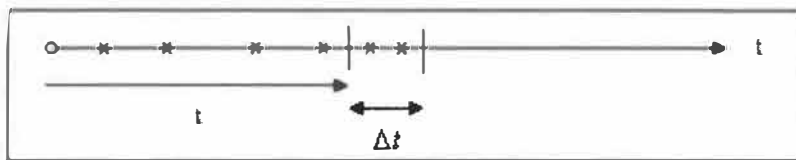


Figure 5: Concept de l'intensité de défaillance (extrait de [20])

Probabilité de défaillance sur demande

Le nombre de défaillances sur demande (sollicitations) est distribué selon une loi binomiale. La probabilité de défaillance sur demande s'estime par :

$$\gamma = n / N_d$$

MTTF

Le *Mean Time To Failure* est la durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance et s'estime par :

$$\mu = T/n$$

MTBF

Le *Mean Time Between Failure* est la durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée.

MTTR

Le *Mean Time To Repair* est la durée moyenne de réparation et s'estime par :

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n MTTR_i}{n}$$

où $MTTR_i$ représente le MTTR de la $i^{ième}$ défaillance.

Cette variable est un indicateur de maintenabilité.

MUT

Le *Mean Up Time* est la durée moyenne de fonctionnement après réparation.

MDT

Le *Mean Down Time* est la durée moyenne d'indisponibilité.

Cette durée correspond aux étapes suivantes :

- Détection de la panne
- Réparation de la panne
- Remise en service

La **Figure 6** illustre les durées caractéristiques sur une même échelle de temps.

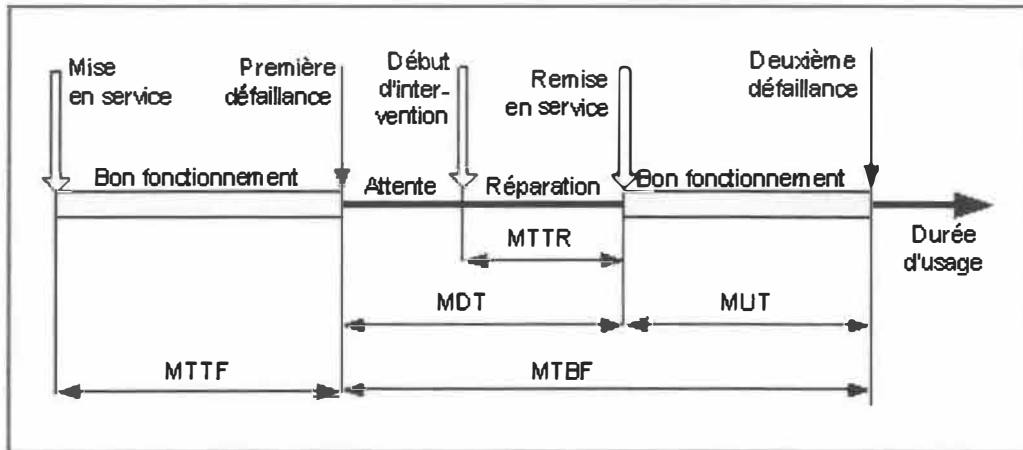


Figure 6: Les durées caractéristiques de Fiabilité-Maintenabilité-Disponibilité (extrait de [27])

Disponibilité opérationnelle

L'indicateur de base de la disponibilité opérationnelle se calcule comme suit :

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} < 1$$

Le **Tableau 1** indique les analyses correspondant au type de système.

Tableau 1: Analyses fiabilité, maintenabilité, disponibilité possibles (extrait de [27])

Arborescence d'un système	Caractéristique	Analyses correspondantes		
		R(t)	M(t)	D(t)
Système	Réparable	<i>MTBF</i>	<i>MTTR</i>	D_{op}
	Non réparable	<i>MTTF</i>	X	X
Sous-système interchangeable	Réparable	<i>MTBF</i>	<i>MTTR</i>	X
	Consommable ¹	<i>MTTF</i>	X	X
Composant	Consommable	<i>MTTF</i>	X	x

3.2 Estimation Bayésienne

La démarche bayésienne fait appel aux probabilités subjectives. Elle se sert de la loi gamma a priori intégrant l'état de la connaissance et l'effet des différents facteurs d'influence sur la probabilité recherchée, puis la joint aux observations du retour d'expérience, ce qui permet de calculer une probabilité prévisionnelle, dite a posteriori, de l'occurrence d'un événement à venir. Dans cette démarche, le manque ou même le défaut d'informations statistiques est compensé par la prise en compte des connaissances initiales qui seront validées ou infirmées par le retour d'expérience.

¹ Le sous-système défaillant est réparé (avec risque élevé d'indisponibilité) ou il est « consommé » par échange standard rapide et ensuite réparé ou rebuté.

Étant donné un événement B de probabilité non nulle et A_i un ensemble d'événements complets, on appelle théorème de Bayes la relation suivante :

$$P[A_i/b] = \frac{P[B/A_i]P[A_i]}{\sum_i P[B/A_i]P[A_i]}$$

Cette technique a été très largement développée et utilisée dans le domaine de la fiabilité. À partir d'une base théorique rigoureuse issue des probabilités conditionnelles, cette approche combine deux familles de données :

- Les données de retour d'expérience (nombre de défaillances, durée de fonctionnement/nombre de sollicitations, date des défaillances).
- Les jugements d'experts (risque d'avoir une panne ou non sur une période donnée, des durées de fonctionnement avec ou sans panne, des informations quantifiées sur le gain en fiabilité).

Les développements actuels des techniques bayésiennes répondent à l'ensemble des préoccupations de fiabilité, et les résultats fournis sont de la forme :

- Taux de défaillance (en fonctionnement, à l'arrêt, à la sollicitation).
- Durée de réparation calcul connu (loi de fiabilité) ou discret (calcul d'une moyenne), application au vieillissement, à la maintenance.

Cette technique est utile pour les analyses de fiabilité particulièrement dans les cas où :

- Les systèmes ont soit des durées de fonctionnement, hors situation accidentelle, faibles et des défaillances rares, soit des durées de fonctionnement normales mais dont les défaillances sont rares du fait du suivi permanent réalisé sur ceux-ci.

- Le matériel a subi des modifications de conception, afin que sa fiabilité s'améliore, ou les contraintes d'exploitation et de maintenance ont évolué depuis la mise en service de la centrale.

3.3 Suivi de la fiabilité opérationnelle

Le suivi de la fiabilité opérationnelle peut se faire à l'aide de différents tests selon la nature des équipements (réparables ou non). Ces tests [21] peuvent être appliqués de façon continue ou périodique en fonction de la quantité de défaillances répertoriées sur les équipements. En effet, si plusieurs défaillances par année surviennent sur un même groupe d'équipements, les tests de suivi seront effectués en continu alors que si seulement une seule défaillance survient par période d'un an ou deux, alors les tests seront appliqués périodiquement.

3.3.1 Méthodes non-paramétriques

Méthode actuariale

Cette méthode, très souvent appliquée, permet d'obtenir à partir de résultats en exploitation pour :

- la variation du taux de défaillance en fonction du temps;
- la variation de la fiabilité en fonction du temps.

Elle peut être complétée par :

- les tests du χ^2 ;
- les tests de Mann et Proschan-Pyke;

- des représentations graphiques type $\lambda(t)$, $R(t)$.

On distingue deux types de méthodes : 1) systèmes réparables et 2) systèmes non réparables²

Pour utiliser cette méthode, il faut estimer un taux de défaillance instantané $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

À partir d'un effectif initial de pièces N_o , et d'un nombre de survivants $N_i(t)$ au bout d'un temps t , on en déduit comme estimateur de $R(t)$:

$$\hat{R}(t) = \frac{N_i(t)}{N_o}$$

Si pendant un temps Δt , dans l'intervalle $(t, t + \Delta t)$, l'effectif décroît d'une quantité $\Delta N(t)$, on peut en déduire comme estimateur de $f(t)$:

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta N(t)}{N_o \cdot \Delta t}$$

Il en résulte que :

On pourra donc estimer un taux de défaillance instantané, à partir :

- d'une variation d'effectif $\Delta N(t)$, c'est-à-dire d'un nombre de pannes dans un intervalle Δt ;
- d'un effectif $N_i(t)$ en début de l'intervalle considéré.

Pour arriver à cette estimation, il faut détenir les connaissances sur :

²² Dans le contexte de ce projet, on utilisera la méthode actuariale seulement pour les systèmes non-réparables.

- Les conditions et durées de fonctionnement de chacun des dispositifs en exploitation, et donc avoir la connaissance individuelle de l'histoire de chaque dispositif existant, soit par l'établissement de rapports d'exploitation à chaque utilisation du matériel, soit des livrets individuels retraçant et tenant à jour l'historique du matériel.
- Toutes les défaillances, avec la connaissance de la panne, du numéro de l'équipement en cause pour être en mesure de retrouver son historique, à l'âge de l'équipement au moment de la panne.

Ces deux sources d'information permettent d'appliquer les méthodes présentées ci-dessous.

Des informations économiques permettent ensuite de définir une périodicité de maintenance systématique :

- coût entraîné par la réparation d'une défaillance à un moment inopportun,
- coût d'une maintenance systématique bien programmée et faite dans de bonnes conditions.

Le taux moyen de défaillance $\lambda(t)$ dans un intervalle Δt , multiplié par cet intervalle de temps dt , représente la probabilité qu'un matériel qui a atteint l'âge t , devienne défectueux dans l'intervalle $(t, t + \Delta t)$.

Pour calculer pratiquement ce taux moyen de défaillance, il faut quantifier les âges en considérant des tranches d'âge (t_i, t_{i+1}) et rechercher, d'une part le nombre N_i de matériels ayant fonctionné un temps t_i jusqu'au recensement et d'autre part le nombre n_i d'appareils qui ont eu une défaillance dans la tranche d'âge (t_i, t_{i+1}) .

Alors :

$$\hat{\lambda}(t_i) = \frac{n_i}{(N_i + N'_i)(t_{i+1} - t_i)}$$

est un estimateur du taux de défaillance moyen $\lambda(t_i)$.

Si les pièces défectueuses sont remplacées par des neuves, on est ramené au cas particulier où il faut ajouter une variable supplémentaire N'_i . Ce sont les pièces tombées en panne sur un effectif initial. On peut alors calculer un estimateur $\hat{R}(t)$ qui indique directement la fiabilité en fonction de l'âge.

$$\hat{R}(t_i) = \frac{N_i + N'_i}{N_i + N'_o}$$

Pour interpréter les résultats, deux tests peuvent être utilisés :

➤ le test du χ^2 nécessite d'avoir cinq observations par classe ou par regroupement de classes.

Il consiste à comparer le nombre de défaillances théoriques par classe au nombre réel constaté de façon périodique, soit :

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_i D_i}{\sum_i N_i \Delta t_i}$$

où : D_i = défaillances dans la classe i .

Calcul du:

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^n \frac{D_k \text{ obs} - D_k \text{ théor}}{D_k \text{ théor}} \rightarrow \chi^2_v$$

où : $v = n - 2$ ddl

$$D_k \text{ théor} = \bar{\lambda} N_k \Delta t_k$$

$$\Delta t_k = \text{longueur de classe}$$

$$N_k = \text{nombre d'individus dans la classe}$$

➤ *le test de Mann et Proschan-Pyke*

voir Annexe F: tests d'hypothèses

Kaplan-Meier

L'estimateur de Kaplan-Meier est considéré comme l'estimateur non-paramétrique le plus direct de la fonction de survie. Il est l'unique estimateur cohérent de la fonction de survie. Un estimateur R de la fonction de survie est dit cohérent si pour tout âge t , il vérifie la relation :

$$R(t) = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n I(t_i \geq t) + \sum_{i=1}^n I(t_i^* < t) \frac{R(t)}{R(t_i)} \right]$$

t_i^* = instant de censure

L'estimateur de Kaplan-Meier vérifie cette propriété. Cette équation est constituée de la manière suivante : les survivants au-delà de l'instant t sont ceux qui n'ont été, avant cette date, ni défailants, ni censurés, et dont l'effectif constitue la première somme dans le crochet, et d'autre part ceux qui, ayant été censurés à un instant t_i^* antérieur à t_i survient

au-delà de t avec la probabilité conditionnelle $\frac{R(t)}{R(t_i)}$ qui pondère chacun d'eux.

Soit :

d_j le nombre de défaillances au temps t_j

r_j le nombre de dispositifs soumis à risque à t_j , i.e. ni défaillants, ni censurés.

$$\text{On a : } R(t_i) = \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{d_j}{r_j} \right)$$

Cette méthode repose sur le principe qu'être en bon fonctionnement après l'instant t , c'est être en bon fonctionnement juste avant t et ne pas être défaillant à t .

3.3.2 Suivi de la fiabilité d'un processus de poisson non homogène (NHPP)

Modèle loglinéaire

$$z(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 * t)$$

- si $\beta_1 < 0$, le matériel s'améliore ;
- si $\beta_1 > 0$, il se dégrade.

On considère un équipement réparable observé sur $(0, t_0)$, les instants de défaillance sont $t_1, t_2, \dots, t_n$. Le logarithme de la vraisemblance pour ce matériel réparable devient :

$$\ell n L = n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n t_i - \frac{\exp(\beta_0) \cdot (\exp(\beta_1 t_0) - 1)}{\beta_1}$$

d'où l'on déduit par : $\frac{\partial \ell n L}{\partial \beta_0} = 0$ et $\frac{\partial \ell n L}{\partial \beta_1} = 0$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n t_i + n\beta_1^{-1} - nt_0(1 - \exp(-\beta_1 t_0))^{-1} = 0 \\ \hat{\beta}_0 = \ell n \frac{n\hat{\beta}_1}{\exp(\hat{\beta}_1 t_0) - 1} \end{cases}$$

d'où :

$$\ell n L = n\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n t_i - n$$

Si l'intensité de défaillance est constante, donc $\beta_1=0$, $\ell n L = n\beta_0 - t_0 \exp(\beta_0)$ est

maximale si $\beta_0 = \ell n \frac{n}{t_0}$. Si $\beta_1=0$, la valeur maximale du logarithme de la vraisemblance

est : $n \ell n \frac{n}{t_0} - t_0 \exp(\beta_0)$.

Le test le plus utilisé pour tester l'hypothèse $\beta_1=0$ est le test de Laplace. Soit la statistique :

$$U = \frac{\sum t_i - \frac{1}{2} n t_0}{t_0 (n/12)^{1/2}}$$

Cette statistique est approximativement une distribution normale sous l'hypothèse nulle :

- Si U est faible, l'hypothèse d'une intensité de défaillance constante ($\beta_1=0$) ne peut être rejetée.
- Si U est grand, positif, l'hypothèse alternative $\beta_1 \neq 0$ peut-être retenue avec $\beta_1 > 0$ (dégradation).
- Si U est grand, négatif, l'hypothèse $\beta_1 = 0$ peut être rejetée en faveur de $\beta_1 < 0$ (amélioration).

Modèle de puissance

$$z(t) = \gamma \cdot \delta \cdot t^{\delta-1} (\beta_0 + \beta_1 t)$$

où $\gamma > 0$ et $\delta > 0$

- si $\delta > 1$, le matériel se dégrade
- si $\delta < 1$, il s'améliore

La vraisemblance s'écrit :

$$\ell n L = n \ell n \gamma + n \ell n \delta + (\delta - 1) \sum_{i=1}^n t_i - t_0^\delta$$

d'où :

$$\hat{\delta} = \frac{n}{n \ell n t_0 - \sum_{i=1}^n \ell n t_i}$$

$$\hat{\gamma} = \frac{n}{t_0^{\hat{\delta}}}$$

L'hypothèse nulle $\delta = 1$ (δ est un paramètre de forme) est testée à l'aide de la statistique :

$$V = 2 \sum_{i=1}^n \ell n \left(\frac{t_0}{t_i} \right)$$

qui est une distribution $\chi^2(2n)$.

De grandes valeurs de V rejettent l'hypothèse nulle en faveur d'une amélioration de la fiabilité ($\delta < 1$). Des petites valeurs, au contraire indiquent une dégradation ($\delta > 1$).

L'intérêt de cette loi de puissance est que le temps à la première défaillance est une distribution de Weibull. En effet :

$$\text{Proba}(T > t) = \exp \left(- \int_0^t z(t) dt \right) = \exp(-\gamma t^\delta)$$

est une loi de Weibull à deux paramètres. Il faut cependant préciser que ni les temps de défaillance ni les temps entre défaillances ne suivent une loi de Weibull.

3.4 Les tests d'hypothèses

Lorsqu'on analyse des données statistiques, il est généralement nécessaire de connaître la distribution (voir Annexe E: Principales lois utilisées en fiabilité) à laquelle appartiennent les résultats expérimentaux obtenus. On se base habituellement sur les distributions fournies par les données d'expériences antérieures ou par la théorie qui permet de vérifier par des tests d'hypothèses si la distribution des données expérimentales est cohérente avec la distribution théorique.

Un test d'hypothèse ou test statistique est une démarche qui a pour but de fournir une règle de décision permettant de faire un choix entre deux hypothèses statistiques (l'hypothèse nulle et la contre hypothèse) et ce sur la base de résultats d'échantillon. Un des aspects importants d'un test d'hypothèse est de décider, avant le prélèvement de l'échantillon, à quelle condition l'une ou l'autre des hypothèses sera considérée comme vraisemblable. Dans la section qui suit, les tests sont regroupés selon la catégorie à laquelle ils appartiennent et l'utilisation qu'il est possible d'en faire.

L'hypothèse de la constance du taux de défaillance, i.e. une distribution exponentielle du taux de défaillance est souvent faite et mène à une simplification des mathématiques reliées à la fiabilité ainsi que pour le regroupement et l'interprétation des données. Ainsi, il devient inutile de savoir quand les équipements sont défaillants, tant que le nombre de défaillances, dans un délai de fonctionnement donné, est connu. Si la présomption n'est pas valide, elle peut alors causer

des erreurs sérieuses dans l'analyse et la prévision de fiabilité. Les différents tests ainsi que le détail des formules y étant associées se trouvent à l'Annexe F: tests d'hypothèses.

3.5 Analyse de vieillissement

Lorsque les tests d'hypothèses sont effectués et que l'on trouve le taux de défaillance non constant, il est intéressant d'ajouter d'autres tests permettant de déterminer s'il y a vieillissement ou non.

3.5.1 Comparaison de deux proportions observées

La comparaison entre deux proportions P_A et P_B , observées sur des échantillons n_A et n_B , est fondée sur l'écart réduit. Ce test des moyennes et le suivant sont vrais si les variances sont testées égales, dans le cas contraire, il faut utiliser d'autres tests :

soit :

$$\varepsilon = \frac{P_A - P_B}{\sqrt{\frac{p(1-p)}{n_A} + \frac{p(1-p)}{n_B}}}$$

où p désigne la proportion évaluée connue sur l'ensemble des deux échantillons. On suppose une répartition normale.

Si $|\varepsilon| < 1,96$, la différence n'est pas significative (au risque de première espèce 5%); sinon la différence est significative.

3.5.2 Comparaison de deux moyennes observées

Cas des grands échantillons (plus de 20 observations)

La comparaison de deux moyennes m_A et m_B observées sur des échantillons n_A et n_B , est fondée sur l'écart réduit :

$$\varepsilon = \frac{m_A - m_B}{\sqrt{\frac{\sigma_A^2}{n_A} + \frac{\sigma_B^2}{n_B}}}$$

où σ_A^2 et σ_B^2 sont des variances estimées.

Si $|\varepsilon| < 1,96$ (5%), la différence n'est pas significative.

Cas des petits échantillons

On calcule :

$$t = \frac{m_A - m_B}{\sqrt{\frac{s^2}{n_A} + \frac{s^2}{n_B}}}$$

où s^2 désigne l'estimation de la variance, supposée connue :

$$s^2 = \frac{\sum (x - m_A)^2 + \sum (x - m_B)^2}{n_A + n_B - 2}$$

Si $|t|$, la variable de Student, est inférieure à la valeur de t (5%, ddl = $n_A + n_B - 2$), la différence n'est pas significative. Sinon, cette différence est significative et la valeur de $|t|$ fixe le degré de signification.

Signalons que ces comparaisons sont particulièrement utiles lorsqu'il s'agit de comparer des périodes différentes de la vie d'un matériel, ou de comparer des comportements de matériels de même conception et de même fonctionnement, installés dans des unités ou des industries différentes.

CHAPITRE 4

PROCESSUS POUR L'ANALYSE DE LA FIABILITÉ OPÉRATIONNELLE

Ce chapitre présente le processus de suivi de la fiabilité opérationnelle qui constitue le cœur de ce travail de recherche. Le schéma détaillé se retrouve à la Figure 7. Le processus a été conçu en suivant la méthodologie présentée au chapitre deux et dans l'optique de permettre la conception d'une base de données permettant d'enregistrer les informations et d'en faire des mises à jour. Le processus est composé de cinq principales étapes qui se divisent en plusieurs activités et certaines de ces étapes sont itératives.

Tout d'abord il s'agit de concevoir un système de collecte de données avant de sélectionner un échantillon qui servira à une analyse par les statistiques descriptives puis au calcul des caractéristiques de fiabilité qui permettront d'assurer un suivi de la fiabilité opérationnelle, ce qui conduira à son optimisation. Lorsque les données sont trouvées non homogènes, il faut redéfinir l'échantillon et refaire les étapes appropriées. Le même procédé se produit si l'intervalle de confiance et le facteur d'erreur ne sont pas acceptables. L'intrant principal de ce processus est un manuel d'équipement qui contient toute l'information au sujet des équipements que ce soit au niveau des frontières, des caractéristiques ou des modes de défaillances.

4.1 Conception du système de collecte de données

Cette première étape du processus en est le fondement, puisqu'on y retrouvera toutes les informations nécessaires à la réalisation des études de fiabilité. Elle concerne le regroupement des données utiles pour les calculs ultérieurs des caractéristiques de fiabilité. Cette étape

demande donc d'être traitée avec beaucoup de précision, puisque le déroulement et les résultats des études en dépendent.

4.1.1 Déterminer les familles technologiques homogènes (préliminaires)

Cette activité est réalisée à l'aide du manuel des équipements et elle consiste à regrouper les équipements en fonction des caractéristiques de conception telles que les données de conception, générales et génériques. Il faut également considérer les caractéristiques d'exploitation comme le cycle de charge, les conditions de service, l'historique de la maintenance et le programme de maintenance préventive (essais et entretien). Finalement les caractéristiques fonctionnelles comme les frontières et limites des équipements ainsi que l'arborescence matérielle sont considérées afin de créer les familles technologiques.

4.1.2 Déterminer la liste préliminaire des modes de défaillance plausibles

Cette activité consiste à déterminer, pour chaque équipement, les modes et mécanismes de défaillances possibles et dominants provenant des banques de données externes, du jugement d'experts et des autres références pertinentes. Elle présente donc les critères de défaillances dans des termes spécifiques et mesurables, dans les limites du possible, et la définition doit être consistante avec les fonctions intrinsèques de l'équipement. Les défauts, les mécanismes de dégradation, l'observabilité des défaillances, la localisation de la défaillance, la progression de la défaillance dans le temps, les facteurs de stress et les actions préventives et correctives doivent également être définis. À l'aide du manuel des équipements, il faut indiquer le degré de la défaillance (est-elle complète ou s'agit-il d'une dégradation?), le type de défaillance (au temps

ou à la sollicitation?) et la résolution de la défaillance soit jusqu'où l'on doit remonter dans l'analyse des causes de la défaillance

4.1.3 Déterminer les caractéristiques de fiabilité à suivre

Cette activité consiste à déterminer et à justifier, à partir du manuel d'équipement, les caractéristiques de fiabilité par mode de défaillances comme le taux de défaillance en marche et à l'arrêt, la probabilité de défaillance à la sollicitation, le taux de réparation et l'intensité de défaillance (ROCOF) pour les systèmes réparables.

4.1.4 Déterminer les variables associées aux caractéristiques de fiabilité

Lors de cette activité, il s'agit de regrouper les dates de mise en service, les dates calendaires des défaillances, les temps à la défaillance, la durée d'observation et la date de découverte de la défaillance. D'autres variables telles que le nombre de défaillances, le nombre de sollicitations (réelles ou estimées) ainsi que la durée de réparation devront être trouvées soit dans les banques de données externes ou dans les demandes de travail (DT). De plus, le manuel d'équipements qui contient les variables des défaillances par caractéristiques de fiabilité soit les variables nécessaires aux calculs des caractéristiques devra être consulté.

4.2 Sélection d'un échantillon pertinent et collecte des données

La deuxième étape du processus se concentre sur l'estimation d'échantillon et la collecte de données pour une étude à réaliser en particulier. Après avoir recueilli les données, il faut

procéder à l'analyse des défaillances qui permettra de trier les données et d'en ressortir des diagrammes pour une analyse de statistiques descriptives.

4.2.1 Déterminer les familles statistiques homogènes (itérations) des équipements

Il s'agit de déterminer un groupe d'équipements qui feront partie de l'étude. Lorsqu'un groupe ne contient pas assez d'équipements, on peut prendre un équipement en provenance d'un autre groupe qui présente les mêmes caractéristiques technologiques afin d'élargir l'échantillon. Ces ajouts se font par itérations, après avoir vérifier la quantité et la qualité des données recueillies pour que l'analyse statistique soit représentative.

4.2.2 Estimer qualitativement la taille préliminaire de l'échantillon

Après avoir déterminé la famille statistique, on doit estimer de manière qualitative la taille de l'échantillon en nombre par années ou en sollicitations, puis passer à la catégorisation des données. Cette étape consiste à définir les règles par le choix d'un échantillon (ex : critères d'appartenance à un échantillon). Il s'agit donc de déterminer la population à observer (techniques d'échantillonnage, corrélation entre la taille de l'échantillon, le nombre de défaillances observées et le niveau de confiance). La construction de l'échantillon se fait en utilisant les techniques de regroupement.

4.2.3 Collecte de données des systèmes

Cette activité consiste à définir les données à collecter lors de l'étude ainsi que les caractéristiques des données liées à l'échantillon et aux objectifs de l'étude. Il faudra également définir des règles de collecte en fonction du contexte d'exploitation et les sources de données pertinentes pour l'étude (jugement d'expert, banque de données externes pour mise à jour bayésienne ou recueil des données d'exploitation).

Principales activités

Le recueil de données consiste en trois activités :

- a. la sélection des données pertinentes (données externes et d'exploitation);
- b. la détermination des temps de bon fonctionnement (temps entre la mise en service et la défaillance) et des temps de réparation (temps entre la découverte du défaut et la remise en service);
- c. la compilation des données d'exploitation (date du défaut, date de réparation, date de mise en service, l'équipement en défaut, description du défaut, causes et mécanismes de défaillance si possible, réparation effectuée, référence, temps de bon fonctionnement, temps de réparation).

Informations recherchées

Pour chaque défaut sur un équipement, le recueil des données d'exploitation recherche l'obtention des informations de nature quantitative suivantes :

- Instant de découverte du défaut;
- Instant du retrait d'exploitation;
- Instant de remise en service;

- Durée de l'intervention effectuée (si cette intervention consiste en la réparation de l'équipement sans substitution, il s'agit de la durée de la réparation. Si cette intervention consiste en une substitution, il s'agit de la durée de l'opération de substitution).

Informations complémentaires

D'autres informations quantitatives peuvent se révéler d'un grand intérêt, même si elles ne servent pas directement au calcul des caractéristiques de fiabilité :

- Le nombre d'heures de main-d'œuvre nécessaires pour l'accomplissement de l'intervention;
- Le coût de l'intervention;
- La perte de production éventuelle entraînée par la défaillance;
- La dose cumulée par l'équipe de maintenance.

Il est aussi utile, surtout pour les équipements qui tombent rarement en panne, de relever à intervalles réguliers les temps cumulés de fonctionnement et les nombres de sollicitations.

Pour caractériser les défaillances, il s'avère aussi nécessaire de disposer des informations qualitatives suivantes :

- S'il s'agit d'une défaillance en fonctionnement, à l'arrêt ou à la sollicitation;
- Le mode et les mécanismes de la défaillance;

4.2.4 Analyser les défaillances

Cette activité se consacre à la validation des données singulières et le traitement des points aberrants. Il faut également faire la discrimination des défauts (dégradations) et des défaillances et ainsi décrire les critères permettant de faire la sélection. Constitution de tableaux permettant

de synthétiser toutes les données recueillies. Pour cette étape de la procédure, il s'agit de noter les caractéristiques de la défaillance observée (effective, latente, etc.), les modes et les causes de défaillance ainsi que les conséquences et la criticité. Un diagramme créé pour faciliter l'analyse des défaillances à l'intérieur de la centrale de Gentilly-2 est présenté à l'Annexe G: Diagramme de décision pour la sélection des défaillances.

4.2.5 Statistiques descriptives

Cette activité consiste principalement en une analyse préliminaire soit une synthèse des données recueillies. Celles-ci sont présentées en tableau, en histogramme ou sous d'autres formes, par année, par équipement ou par groupe, toutes les combinaisons possibles étant permises afin de visualiser les équipements les plus concernés et de poser un premier diagnostic sur leur comportement.

4.3 Calcul des caractéristiques de fiabilité

La troisième étape consiste essentiellement en une analyse statistique des données ayant pour but d'obtenir les caractéristiques de fiabilité recherchées. Elle prend en considération les données de sources externes, le retour d'expérience, le jugement d'expert et le savoir-faire non documenté du personnel exploitant. Les techniques et méthodes sont explicitées dans les fondements théoriques (chapitre 3) et comprend les activités suivantes.

4.3.1 Estimation ponctuelle des caractéristiques de fiabilité (> 0 défaillance)

Il s'agit de déterminer les caractéristiques de fiabilité selon le type d'équipement. En effet, pour les équipements réparables il est possible de calculer l'intensité de défaillance (ROCOF) et le taux de réparation, alors que pour les systèmes non-réparables on peut calculer le taux de défaillance et la probabilité de défaillance à la sollicitation.

4.3.2 Estimation par intervalle des caractéristiques de fiabilité

À cette étape, il s'agit de calculer le facteur d'erreur et de vérifier les valeurs obtenues à l'aide d'intervalles de confiance fixés en fonction du nombre de défaillances observées.

4.3.3 Vérifier l'homogénéité des données

Cette activité consiste à éliminer les points aberrants et singuliers comme les défaillances de jeunesse et tardives. Lorsque les sous-groupes s'avèrent non homogènes, il faut retourner à l'étape 4.2.1 et déterminer une nouvelle famille statistique en ajoutant des équipements de groupes différents, mais possédant les mêmes caractéristiques afin de commencer une nouvelle itération.

Si ce sont des périodes successives qui sont non homogènes, il faut retourner à l'étape 4.2.3, puisqu'il faudra faire la collecte pour les périodes définies. Lorsque les données sont homogènes, on évalue si l'intervalle de confiance et les facteurs d'erreur sont acceptables. Si oui on retient les valeurs calculées et elles sont enregistrées dans une base de données pour des mises à jour ultérieures. Si l'intervalle d'erreur ou le facteur d'erreur ne sont pas jugés acceptables il faut évaluer la possibilité d'agrandir l'échantillon. Si c'est possible, on retourne à

l'étape 4.2.1 ou 4.2.3 dépendamment de la situation, si ce n'est pas possible il faut utiliser le processus Bayésien.

4.3.4 Processus Bayésien

Lorsque des données pertinentes provenant d'autres sources comme les banque de données externes telles EIREDA [11] et Ontario-Hydro [31] ainsi que le jugement d'experts sont disponibles, il est intéressant d'utiliser l'approche bayésienne pour consolider les résultats, particulièrement lorsque le nombre de données recueillies en exploitation est relativement faible.

4.4 Suivi de la fiabilité opérationnelle

Pour les équipements réparables, il faut faire le suivi d'un processus de poisson non homogène (NHPP). Pour ce faire, il est possible d'utiliser le modèle loglinéaire ou le modèle de puissance tel que décrit dans les fondements théoriques.

Lorsqu'il s'agit d'un équipement non-réparable et que le nombre de défaillances est inférieur à 20, le suivi de la fiabilité se fait avec la méthode Kaplan-Meier. Si le nombre de défaillance est supérieur à 20, le suivi se fait avec la méthode actuariale. Afin de réaliser un suivi complet de la fiabilité opérationnelle, il faut également vérifier la constance du taux de défaillance à l'aide des tests de Mann, Laplace, Khi-deux et Fisher-Snedecor. Lorsque le taux de défaillances est trouvé non constant, il est possible de détecter le point de vieillissement soit le point qui délimite deux périodes successives non homogènes.

4.5 Optimisation de la fiabilité opérationnelle

Cette étape débute lorsque les calculs des étapes précédentes ont été complétées, il faut alors retenir les valeurs calculées et les enregistrer dans une base de données pour des mises à jour ultérieures et ainsi conserver un historique des résultats. Il est ainsi possible d'analyser les caractéristiques de fiabilité opérationnelle (avec l'hypothèse du taux de défaillance constant) et d'optimiser la fiabilité en proposant un plan d'action de maintenance.

Chapitre 5

ANALYSE D'UNE ÉTUDE DE CAS

Le chapitre qui suit présente l'analyse et la critique d'une étude déjà effectuée, sur les caractéristiques de fiabilité d'un type d'équipement de la centrale de Gentilly-2. Il s'agit des vannes motorisées du système de refroidissement d'urgence du cœur (RUC) et du système de refroidissement en temps d'arrêt (RTA). C'est cette étude qui a été choisie, car elle permettait d'avoir un retour d'expérience, mais d'autres études ont été effectuées en parallèle de l'évolution de ce projet. Ainsi, il a été possible de valider en temps réel le processus à l'aide d'études comme celle sur les batteries et celle sur la perte d'alimentation électrique de catégorie IV. Cette analyse a pour but d'établir les étapes qui resteront à faire pour valider le processus d'optimisation de la fiabilité opérationnelle. En effet, il s'agit de faire ressortir les points qui suivent le nouveau processus et de souligner ceux qu'il faudra accomplir afin de valider la démarche proposée et d'en établir les limites. La première partie présente la mise en contexte de l'étude et par la suite, les divisions sont faites selon les étapes déjà établies du processus.

5.1 Mise en contexte

De 1990 à 1995, on constatait un nombre croissant de défauts sur les vannes motorisées des systèmes du RUC et d'isolation du caloporteur de la centrale nucléaire Gentilly 2. La littérature, principalement dans le domaine nucléaire, indiquait que la défaillance de ces équipements augmentait en fonction du taux de sollicitation (par essais ou autres). En 1995, une étude de fiabilité était effectuée sur ces vannes et confirmait les conclusions de la littérature pour ces équipements de la centrale de Gentilly-2. Basé sur les recommandations de cette étude, HQ a réduit la périodicité des essais des vannes motorisées du RUC et de l'isolation du caloporteur, de une fois par mois à une fois par trois mois (de 12 à 4 essais par année). En 2000, une mise à

jour de l'étude a été faite sur les vannes motorisées du RUC, pour confirmer que le changement de périodicité des essais n'avait pas eu d'impact négatif sur ces équipements. Le but de l'étude de 2004 est de mettre à jour les études de fiabilité des vannes motorisées du RUC réalisées en 1995 et en 2000 en y incorporant les données des vannes d'arrêt motorisées du RTA et les nouveaux défauts survenus sur les vannes du RUC. Le système de refroidissement en temps d'arrêt (RTA) est composé de vannes motorisées d'arrêt identiques à celles du RUC. Cependant, la périodicité des essais sur les vannes motorisées du RTA n'a pas été modifiée en 1996, ce qui rend intéressant la comparaison des résultats. L'Annexe H: Description des systèmes et des équipements à l'étude présente la description des systèmes et des équipements à l'étude.

5.2 Conception du système de collecte de données

5.2.1 Déterminer les familles technologiques homogènes (préliminaires)

Dans cette étude les équipements sont classés en deux familles technologiques soit les vannes d'arrêts du RUC et les vannes d'arrêts du RTA. Il aurait fallu identifier et décrire ces deux familles dès la première section avant le tableau qui présente le regroupement des vannes selon la fonction, le diamètre, le modèle et la position en exploitation normale.

5.2.2 Déterminer la liste préliminaire des modes de défaillances

Les quatre principaux modes de défaillances retenus (ouverture ou fermeture intempestive, refus d'ouvrir ou de fermer, fuite externe et fuite interne) et leurs mécanismes associés sont décrits dans cette étude. On y retrouve ensuite un tableau qui présente tous les modes et

mécanismes des vannes avant qu'elles ne soient modélisées dans les analyses de fiabilité et de probabilité. Ce tableau pourrait être mis en annexe, puisqu'il n'est pas requis pour l'étude.

5.2.3 Déterminer les caractéristiques de fiabilité à suivre pour chaque mode de défaillance

Puisque le nombre de défaillances relevées est faible, il a été décidé dans cette étude de regrouper les modes de défaillance afin d'en obtenir un seul soit refus d'opérer. Les caractéristiques de fiabilité sont donc calculées pour ce seul mode. Dans cette étude, les caractéristiques calculées sont le taux de défaillance et la probabilité de défaillance sur demande. Il n'y a pas de section qui explique les caractéristiques recherchées et les objectifs qui y sont rattachés. De plus, le taux de réparation n'a pas été calculé, ce qui aurait pu représenter une donnée utile lors d'analyses futures.

5.2.4 Déterminer les variables associées aux caractéristiques de fiabilité

Les variables pour la collecte des données nécessaires au calcul des caractéristiques de données sont présentées dans un tableau dans la section de collecte des données. Ce tableau est complet car il comprend le numéro d'équipement, la classe de l'équipement, la date de la défaillance, le mode de défaillance, le temps de réparation, le nombre de travailleurs, défaillance causée par le temps ou par la demande, la justification et la référence.

5.3 Sélection d'un échantillon pertinent et collecte des données

5.3.1 Déterminer les familles statistiques homogènes des équipements

Pour cette étude, les familles statistiques sont les mêmes que les familles technologiques, soit deux (vannes d'arrêts du RUC et vannes d'arrêts du RTA) parce que le nombre d'équipement est peu élevé ainsi que le nombre de défauts que l'on retrouve sur chacun.

5.3.2 Estimer qualitativement la taille préliminaire de l'échantillon

Lorsque des données génériques sont disponibles, il est possible d'estimer la taille de l'échantillon voulue pour l'étude. Dans le cas présent il n'y a pas assez d'équipements pour utiliser cette méthode, alors ils sont tous considérés.

5.3.3 Faire la collecte de données des systèmes d'information existants pour une période donnée.

Dans cette étude, la collecte de données est divisée en deux section. La première est composée des données externes qui comprennent les données Européennes (EiReDa), d'Hydro-Ontario, de Pointe Lepreau, des bases de données scandinave (TUD) et allemande (ZEDB). La deuxième section est composée des données internes qui proviennent des études de fiabilité de 1995 et 2000 et celles-ci ont été validées ou vérifiées avec les DT ou rapports trimestriels. Les données entre 2000 et 2004 proviennent également des DT et rapports trimestriels. Cependant, lors d'une étude on devrait présenter les données recueillies à l'interne avant de les comparées à celles de l'externe.

5.3.4 Analyser les défaillances

Dans le cas présent, tous les défauts sont répertoriés, puisqu'il y en a peu, ensuite il y a un tableau qui permet de justifier si le défaut est considéré comme une défaillance ou non. Un tableau présentant le nombre de pannes causées par le temps ou par la demande pour chaque vanne motorisée est présenté à la section analyse statistique des données et un autre présente les principales variables reliées aux caractéristiques de fiabilité tel que la période d'observation totale et le nombre de sollicitations pour la famille statistique des vannes d'arrêts.

5.3.5 Statistiques descriptives

Un histogramme représentant le nombre de défaillances pour chaque année se trouve dans l'étude, à la section analyse statistique des données. Cependant il n'y a pas de diagramme démontrant la répartition des défaillances sur les différents équipements ou selon la famille statistique ou les conditions d'opération. Cela peut être justifié par le peu de défaillances observées.

5.4 Calcul des caractéristiques de fiabilité

5.4.1 Faire l'estimation ponctuelle des caractéristiques de fiabilité (> 0 défaillance)

Le taux de défaillance ainsi que la probabilité de défaillance sur demande sont calculés, il faudrait ajouter le MTTR pour compléter l'étude. Le taux de défaillance a été calculé en deux périodes séparées à cause des changements effectuées dans l'entretien préventif. Ensuite certains tests d'homogénéité ont été faits pour vérifier si les deux périodes pouvaient être jumelées et puis si les deux populations (RUC et RTA) pouvaient également être combinées.

5.4.2 Faire l'estimation par intervalle des caractéristiques de fiabilité

Les intervalles de confiance (limites supérieures et inférieures) sont calculés pour les deux périodes d'observation pour les vannes d'arrêts. Il n'y a cependant pas de calcul du facteur d'erreur. De plus, certains calculs sont à refaire, car ce ne sont pas les bons niveaux de confiance qui ont été considérés en fonction du nombre de défauts.

5.4.3 Vérifier l'homogénéité des données

Dans cette étude, le calcul des caractéristiques de fiabilité c'est fait en deux périodes distinctes. Afin de savoir si les valeurs obtenues appartiennent à la même famille statistique, le F-test (test d'égalité des variances) et le t-test (test d'égalité des espérances) ont été effectués pour agrandir la population puisqu'on était en présence de deux périodes successives non-homogènes.

5.4.4 Processus Bayésien

Ce processus est utilisé dans cette étude pour les vannes d'arrêts, puisqu'il permet de faire intervenir les données externes pour corriger les lacunes causées par un faible nombre de défaillances sur les équipements à l'étude. Un calcul Bayésien a été effectué pour le taux de défaillance, et un autre pour la probabilité de défaillance sur demande. Pour chacun des calculs différentes combinaisons entre les données internes et externes ont été faites. Il aurait été intéressant d'utiliser le processus bayésien pour jumeler les deux populations à l'étude et d'observer les résultats obtenus.

5.5 Suivi de la fiabilité opérationnelle

5.5.1 Suivi pour des équipements réparables

Dans cette étude il n'y a pas de suivi de fiabilité pour des équipements réparables soit d'un processus de poisson non homogène.

5.5.2 Vérifier la constance du taux de défaillance

Dans l'étude effectuée en 2004, les tests de Mann et de Laplace ont été appliqués pour toutes les vannes regroupées, alors que ces tests s'appliquent pour un seul équipement à la fois. De plus, les tests de Fisher-Snedecor ou khi-deux n'ont pas été effectués.

5.5.3 Détecter le point de vieillissement

Dans cette étude, il n'y a pas d'analyse du point de vieillissement, cependant les recommandations visent l'espacement entre les essais et suggèrent de suivre la fiabilité afin de détecter toute dégradation des équipements qui pourraient survenir suite à ces changements.

5.6 Optimisation de la fiabilité opérationnelle

Cette étude démontre l'impact des études des caractéristiques de fiabilité sur le suivi des essais et de la maintenance. En effet, une étude antérieure avait recommandée l'espacement des essais et celle-ci confirme que des essais trop fréquents entraînaient la dégradation des équipements. De plus, elles mènent vers des études futures d'analyses de sûreté [33].

Chapitre 6

VALIDATION DU PROCESSUS

Ce chapitre présente la validation du processus de suivi de la fiabilité opérationnelle à l'aide de l'étude sur les vannes motorisées d'arrêts du RUC et du RTA. Cette validation comprend le résumé pour les étapes ayant déjà été réalisée dans l'étude et le détail pour les étapes et activités qui sont nouvelles en fonction de l'analyse effectuée au chapitre 5.

6.1 Conception du système de collecte de données

6.1.1 Déterminer les familles technologiques homogènes des équipements

Le Tableau 2 et le

Tableau 3 sont tirés de l'étude et présentent un résumé de la classification des vannes motorisées qui en font partie en fonction de leurs caractéristiques.

6.1.2 Déterminer la liste préliminaire des modes de défaillances

Avant de collecter et d'analyser les données de défaillances sur ces vannes, il est nécessaire d'étudier les principaux modes de défaillance et leurs mécanismes associés. Le Tableau 4 contient les principaux modes et ils sont décrits plus exhaustivement à l'Annexe I: Description des modes de défaillances.

Puisque le nombre de défaillances recueillies est faible, tous les modes de défaillance sauf fuite externe et interne seront jumelés et deviendront refus d'opérer.

Tableau 2 : Classification des vannes motorisées d'arrêt du RUC.

Numéro des vannes	Nombre de vannes	Fonction	Diamètre (pouces)	Modèle	Position en exploitation normale	Fréquence des essais (semaines)	
						Avant 96	Après 96
3432-MV39 à MV46	8	Vannes d'injection au caloporteur du RUC (isolation du RUC et du caloporteur)	10	Arrêt	Fermées (NC)	1/4	1/13
3432-MV59 à MV66	8	Vannes d'injection au caloporteur du RUC (isolation du RUC et du caloporteur)	10	Arrêt	Fermées (NC)	1/4	1/13
3432-MV31 et MV50	2	Vannes d'isolation circuit moyenne pression du RUC	12	Arrêt	Fermées (NC)	1/2	1/13
3432-MV79 et MV80	2	Vannes d'isolation circuit haute pression du RUC	12	Arrêt	Fermées (NC)	1/4	1/13
3432-MV71 et MV72	2	Vannes d'isolation circuit haute pression du RUC	12	Arrêt	Ouvertes (NO)	1/4	1/13
3332-MV1 et MV2	2	Vannes d'isolation système de pression du caloporteur	8	Arrêt	Ouvertes (NO)	1/4	1/13

Tableau 3: Classification des vannes motorisées d'arrêt du RTA.

Numéro des vannes	Nombre de vannes	Fonction	Diamètre (pouces)	Modèle	Position en exploitation normale	Fréquence des essais (semaines)	
						Avant 96	Après 96
3341-MV1	1	Vanne d'isolation	10	Arrêt	Fermées (NC)	1/4	1/4
3341-MV2	1	Vanne d'isolation	10	Arrêt	Fermées (NC)	1/4	1/4
3341-MV5	1	Vannes d'isolation	10	Arrêt	Fermées (NC)	1/4	1/4
3341-MV6	1	Vanne d'isolation	10	Arrêt	Fermées (NC)	1/4	1/4
3341-MV10	1	Vannes d'isolation	10	Arrêt	Fermées (NC)	1/4	1/4
3341-MV15	1	Vanne d'isolation	10	Arrêt	Fermées (NC)	1/4	1/4
3341-MV16	1	Vanne d'isolation	10	Arrêt	Fermées (NC)	1/4	1/4

Tableau 4 : Principaux modes de défaillances des vannes motorisées

Vanne	Mode de défaillance	Mécanismes de défaillance
Normalement fermée ou ouverte	Ouverture ou fermeture intempestive	Mise sous tension intempestive de l'activateur. Défaillance interne
	Refus d'ouvrir ou de fermer	Échec lors de la mise sous tension de l'activateur. Mécanisme de la vanne coincé-corrosion, etc. Mécanisme de la vanne coincé par des corps étrangers. Défaillance interne de l'activateur Contamination de l'activateur
	Refus de refermer ou de rouvrir après un essai	Échec lors de la mise sous tension de l'activateur. Mécanisme de la vanne coincé par des corps étrangers. Défaillance interne de l'activateur. Contamination de l'activateur.
	Fuite externe	Joints/garnitures usés, déformés ou endommagés. Fissuration du corps de la vanne.
	Fuite interne	«Control failure» pas totalement fermé. Support de la vanne usé ou endommagé.

6.1.3 Déterminer les caractéristiques de fiabilité à suivre

Puisque cette étude considère des équipements réparables les caractéristiques de fiabilité à suivre sont l'intensité de défaillance (ROCOF), la probabilité de défaillance à la sollicitation (γ) et la durée moyenne de réparation (MTTR). Dans les études sur les vannes motorisées antérieures, le taux de défaillances (λ) a été calculé, alors pour vérifier les équations présentées avec le processus d'analyse de la fiabilité opérationnelle, cette variable sera également traitée.

6.1.4 Déterminer les variables associées aux caractéristiques de fiabilité

n = nombre de défaillances observées (λ , γ , ROCOF)

N = nombre d'équipements (λ)

T = nombre d'années d'observation (λ)

N_d = nombre de sollicitations (γ)

t_i = temps de réparation observé pour la défaillance i (MTTR)

N_r = nombre de défaillances où un temps de réparation a été enregistré (MTTR)

6.2 Sélection d'un échantillon pertinent et collecte des données

6.2.1 Déterminer les familles statistiques homogènes des équipements

Pour les fins de cette étude, les vannes motorisées sont divisées en deux familles statistiques:

- les vannes d'arrêt du RUC (24 vannes)
- les vannes d'arrêt du RTA (8 vannes)

Cette division est basée sur la différence de conception de chaque type de vanne et de la périodicité des essais qui n'est pas la même sur chaque type de vannes depuis 1996. Cependant, elle ne prend pas en compte les conditions d'opération (confortables ou difficiles).

6.2.2 Estimer qualitativement la taille préliminaire de l'échantillon

Deux périodes d'exploitation sont analysées : la division est effectuée ainsi, car elle permet d'obtenir un échantillon crédible pour l'analyse statistique :

- de la mise en opération 1982 jusqu'à juin 1996
- de juin 1996 au 30 juin 2004.

La division en deux périodes est basée sur les changement de périodicité entre les essais effectué en juin 1996 suite à l'étude de 1995. À la même période on a instauré un programme de maintenance préventive. L'analyse statistique (ci-après) démontre la validité de cette approche pour les vannes d'arrêt car il s'agit de deux populations statistiques différentes.

Pour chacune des périodes la taille de l'échantillon N est égale à celle de la population puisque cette dernière est inférieure à 35 selon les règles de choix prédéterminées à l' Annexe C: calcul de la taille de l'Echantillon (N).

6.2.3 Faire la collecte de données des systèmes d'information existants pour une période donnée

L'Annexe J: Détail des défaillances des vannes du RUC et du RTA présente le détail des défaillances pour chaque vanne, trouvées en cherchant dans les DT, les FEP et les études déjà réalisées. Le Tableau 5 :contient la compilation par année des défaillances dues au temps et à la sollicitation par années pour les vannes du RUC et du RTA.

Tableau 5 : Nombre de défaillances par année dues au temps et à la sollicitation.

Vannes motorisées d'arrêt	RUC		RTA	
	Temps	Sollicitation	Temps	Sollicitation
1982	0	0	0	0
1983	0	1	0	0
1984	0	4	0	0
1985	0	4	0	1
1986	0	2	1	1
1987	0	0	0	0
1988	1	0	0	0
1989	0	1	0	0
1990	1	1	0	0
1991	1	1	0	0
1992	0	3	0	0
1993	0	1	0	0
1994	0	3	0	0
1995	1	2	0	0
1996	1	2	0	0
1997	0	0	0	0
1998	0	0	0	1
1999	0	0	1	0
2000	1	0	0	0
2001	3	0	0	0
2002	1	0	0	0
2003	1	0	1	0
2004	1	0	0	1
TOTAL	12	24	3	4

6.2.4 Analyser les défaillances

Le

Tableau 6 : présente les calculs des variables associées aux caractéristiques de fiabilité :

- Pour le taux de défaillance (λ)

Tableau 6 : Résultats des calculs des taux de défaillance

	n	N	T (ans)
RUC 1982-1996	5	24	13.75
RUC 1996-2004	7	24	8.25
RTA 1982-1996	1	8	13.75
RTA 1996-2004	2	8	8.25

- Tableau 7 contient les résultats pour la probabilité de défaillance à la sollicitation (γ)

Tableau 7 : Résultats des calculs des probabilités de défaillance sur demande

	n	N_d
RUC 1982-1996	25	4968
RUC 1996-2004	0	1200
RTA 1982-1996	2	1656
RTA 1996-2004	2	992

- Le Tableau 8 contient les résultats des calculs pour le MTTR

Tableau 8 : Résultats des calculs des taux de réparation.

	Σt_i (jours)	N_r
RUC 1982-1996	171.07	14
RUC 1996-2004	46	7
RTA 1982-1996	0	0
RTA 1996-2004	19	4

6.2.5 Statistiques descriptives

Lorsque toutes les données ont été recueillies et les calculs effectués, il est possible de classer les défaillances selon les familles statistiques définies à la section 6.2.1 et l'échantillon retenu à la section 6.2.2. Par exemple, la Figure 8 présente un histogramme regroupant les défaillances à la sollicitation de toutes les vannes motorisées du RUC de 1982 à juin 1996.

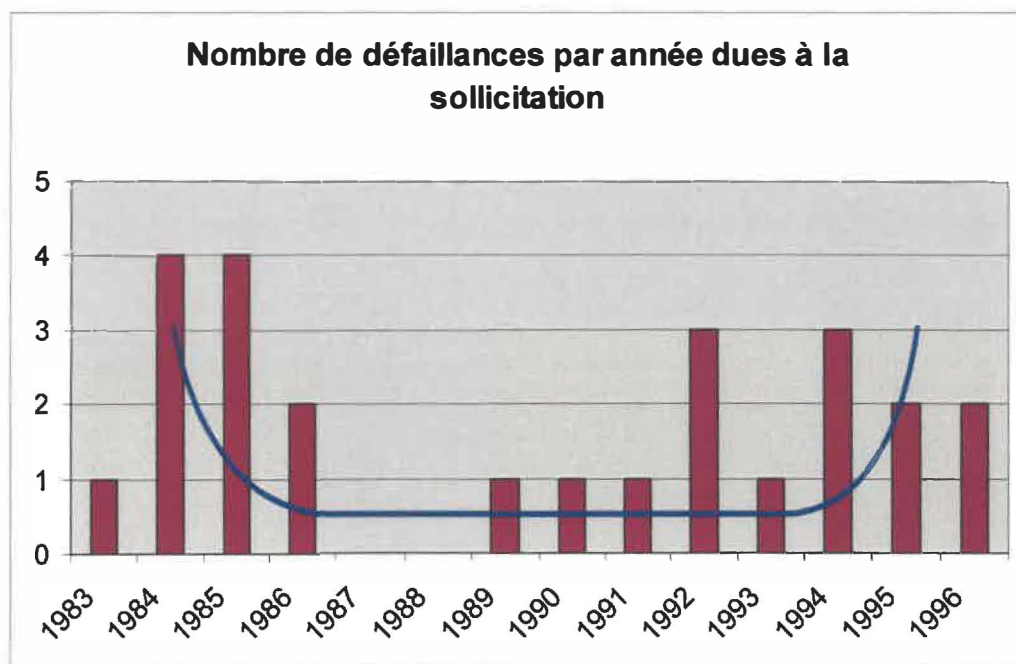


Figure 8 : Nombre de défaillances par années dues à la sollicitation

6.3 Calcul des caractéristiques de fiabilité

6.3.1 Estimation ponctuelle des caractéristiques de fiabilité (> 0 défaut)

Le Tableau 9 contient les caractéristiques de fiabilité calculées à partir des variables présentées à la section 6.2.4 :

Tableau 9 : Présentation des caractéristiques de fiabilité

	λ (déf / an)	y	MTTR (hrs)
RUC 1982-1996	0.01515	0.00503	12.22
RUC 1996-2004	0.03535	0.00058	6.57
RTA 1982-1996	0.00909	0.00121	N/A
RTA 1996-2004	0.03030	0.00202	4.75

6.3.2 Estimation par intervalle des caractéristiques de fiabilité

Les intervalles de confiance ont été calculés avec les niveaux de confiance spécifiés dans le chapitre 3 et les résultats sont présentés dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Résultats des calculs des intervalles de confiance et facteur d'erreur

	λ_{inf}	λ_{sup}	EF	Y_{inf}	Y_{sup}	EF
RUC 82-96	0,009362	0,02396	1,62	0,003499	0,006794	1,44
RUC 96-04	0,01967	0,05945	1,80	-----	0,00058	1
RTA 82-96	0,0006762	0,009074	13,4	0,0004978	0,002584	2,43
RTA 96-04	0,004164	0,02161	7,28	0,0008310	0,004313	2,43

6.3.3 Vérification de l'homogénéité des données

Dans l'étude effectuée en 2004, la vérification de l'homogénéité des données a été faite par l'utilisation du T-test et du F-test. Afin de valider le processus c'est la formule de comparaison de deux populations présentées dans le chapitre 3 qui a été utilisée. Cette étape permettra de vérifier si les données des deux échantillons distincts (82-96) et (96-2004) peuvent être

combinées dans un premier temps et par la suite si les deux familles statistiques (RUC/RTA) peuvent être regroupées. Le Tableau 11 présente les résultats obtenus pour cette étape. En plus de cette méthode fréquentiste, l'approche bayésienne a également été utilisée pour évaluer et vérifier l'homogénéité des données.

Première étape : Comparaison de deux moyennes observées

Tableau 11 : Résultats du test de comparaison de 2 moyennes observées

	$ t $	t (5%, ddl)	Résultats
λ (RUC ₈₂₋₉₆ /RUC ₉₆₋₀₄)	1.469221213	1.6787	$ t < t$ homogène
y (RUC ₈₂₋₉₆ /RUC ₉₆₋₀₄)	N/A ³	N/A	N/A
λ (RTA ₈₂₋₉₆ /RTA ₉₆₋₀₄)	0.97206151	1.7613	$ t < t$ homogène
y (RTA ₈₂₋₉₆ /RTA ₉₆₋₀₄)	0.52542589	1.7613	$ t < t$ homogène

Deuxième étape : Test de l'intervalle de confiance

Si la valeur du taux de défaillance des vannes du RUC₈₂₋₉₆ se retrouve dans l'intervalle de confiance du RUC₉₆₋₀₄, alors les deux échantillons peuvent être regroupés. La même interprétation peut être faite pour les vannes du RTA. Le Tableau 12 présente les résultats obtenus pour le test de l'intervalle de confiance.

Tableau 12 : Résultats du test des l'intervalles de confiance

	λ_{inf}	λ_{sup}	λ_{82-96}
RUC 96-04	0,01967	0,05945	0,01515
RTA 96-04	0,004164	0,02161	0,00909

Par les valeurs obtenues on observe que les populations du RUC ne peuvent être jumelées et que celles du RTA le peuvent pour le taux de défaillance. Puisque les données sont homogènes, mais que le facteur d'erreur est élevé pour certains échantillons, il faut agrandir l'échantillon tel que l'indique le processus et refaire les calculs des caractéristiques de fiabilité. Le Tableau 13 contient les résultats obtenus pour le calcul des caractéristiques de fiabilité

Calcul des caractéristiques de fiabilité RUC_{82-04} et RTA_{82-04} ,

Tableau 13 : Résultats du calcul des caractéristiques de fiabilité.

	λ (déf / an)	λ_{inf}	λ_{sup}	EF	y	y_{inf}	y_{sup}	EF	MTTR (hrs)
RUC 1982-2004	0,02273	0,01311	0,03682	1,7333	0,00058		0,00058		10,34
RTA 1982-2004	0,01705	0,002907	0,01044	5,8645	0,00151	0,000867	0,00254	2,0976	4,75

Vérification de l'homogénéité des données

On vérifie maintenant, si les deux échantillons RUC_{82-04} et RTA_{82-04} peuvent être combinés, les résultats sont présentés au Tableau 14.

³ On n'essaie pas de combiner les deux période pour la probabilité de défaillance à la sollicitation, puisque le programme d'essais a été modifié, on considère la valeur de la deuxième période comme étant la bonne.

Tableau 14 : Résultats du test de comparaison de 2 moyennes observées

	$ t $	t (5%, ddl)	Résultats
λ (RUC ₈₂₋₀₄ /RTA ₈₂₋₀₄)	0.3967248	1.6973	$ t < t$ homogène
γ (RUC ₈₂₋₀₄ /RTA ₈₂₋₀₄)	0.020977195	1.6787	$ t < t$ homogène

Puisque $|t| < t$ (5%, ddl), la différence entre les deux populations n'est pas significative, pour λ , ce qui permet de combiner les valeurs de RUC₈₂₋₀₄ et RTA₈₂₋₀₄.

Calcul des caractéristiques de fiabilité RUC₈₂₋₀₄ et RTA₈₂₋₀₄ combinés.

La dernière étape pour le calcul des caractéristiques de fiabilité, consiste à faire les calculs en combinant les données du RUC et du RTA. Les résultats sont présentés dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Résultats du calcul des caractéristiques de fiabilité RUC/RTA

	λ (déf / an)	λ_{inf}	λ_{sup}	EF	y	y_{inf}	y_{sup}	EF	MTTR (hrs)
RUC / RTA	0,02131	0,01313	0,03109	1,7333	0,00058	---	0,00058	---	1.62

6.3.4 Estimation Bayésienne

Puisqu'il n'y a pas beaucoup de défauts sur les équipements observés, il est pertinent d'utiliser l'approche bayésienne pour valider le regroupement des données. Le Tableau 16 présente la synthèse des résultats obtenus à l'aide du logiciel Fiabayes [30] pour le taux de défaillance, alors que le Tableau 17 y présente ceux pour la probabilité de défaillance sur demande. Le détail du processus bayésien se trouve à l'Annexe K: Détail du calcul bayésien

Tableau 16 : Calcul Bayésien pour le taux de défaillance

	SANS BAYÉSIEN			AVEC BAYÉSIEN			
Période	λ (déf / an)	λ_{inf}	λ_{sup}	λ (déf / an)	λ_{inf}	λ_{sup}	Poids
RUC 82-96 + RUC 96-04	0,02273	0,01311	0,03682	0.02273	0.0131	0.0345	0
				0.0219	0.0129	0.0327	2
RTA 82-96 + RTA 96-04	0,01705	0,002907	0,01044	0.0170	0.00872	0.0243	0
				0.0162	0.00851	0.0229	2
RUC 82-04 + RTA 82-04	0,02131	0,01313	0,03109	0.0269	0.0166	0.0393	0
				0.0426	0.078	0.0168	3

Tableau 17 : Calcul Bayésien pour la probabilité de défaillance sur demande

	SANS BAYÉSIEN			AVEC BAYÉSIEN			
Période	y	y _{inf}	y _{sup}	y	y _{inf}	y _{sup}	Poids
RUC 82-96 + RUC 96-04	0,00058		0,00058	0.00413	0.00289	0.0056	0
				0.00411	0.00285	0.00555	2
RTA 82-96 + RTA 96-04	0,00151	0,000867	0,00254	0.00170	0.00102	0.00231	0
				0.00164	0.00101	0.00222	2
RUC 82-04 + RTA 82-04	0,00058		0,00058	0.00335	0.00240	0.00442	0
				0.00327	0.00229	0.00439	2

6.4 Suivi de la fiabilité opérationnelle

6.4.1 Suivi de la fiabilité des équipements irréparables

Méthode Kaplan-Meier

Il est préférable de choisir cette méthode pour le suivi de la fiabilité des équipements irréparables lorsque le nombre de défaillance est inférieur à 20. Pour cet exemple, ce sera le cas des défaillances dues au temps du RUC qui sera étudié. Le Tableau 18 contient les résultats des calculs effectués à l'aide de la méthode Kaplan-Meier.

Tableau 18 : Résultats obtenus avec la méthode Kaplan-Meier

Intervalle d'observation (années)	Nombre de défaillances (d_j)	r_j	d_j/r_j	$R(t_i)$
1982-1985	0	24	0	1
1985-1988	0	24	0	1
1988-1991	2	24	0,083333	0,916667
1991-1994	1	24	0,041667	0,958333
1994-1997	2	24	0,083333	0,916667
1997-2000	0	24	0	1
2000-2003	5	24	0,208333	0,791667

Avec ces résultats, il est possible de tracer un graphique pour l'analyse des données. Dans un premier temps on enlève la donnée de 1997-2000, car elle constitue un point aberrant compte tenu des résultats antérieurs et on obtient la courbe de fiabilité présentée à La Figure 9. Par contre, si on enlève la donnée obtenue pour la période 2000-2003, on obtient une courbe de fiabilité constante comme le montre la Figure 10.

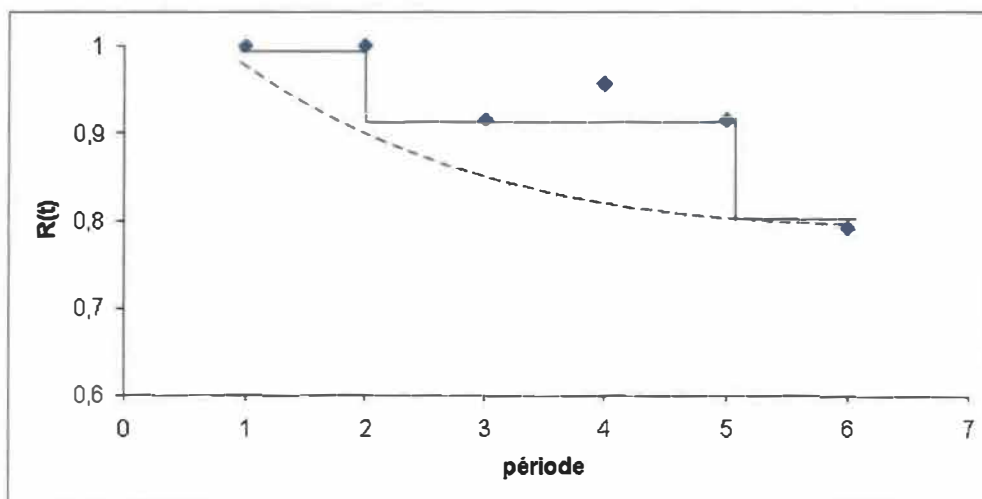


Figure 9 : Courbe de fiabilité obtenue avec la méthode Kaplan-Meier (sans 1997-2000)

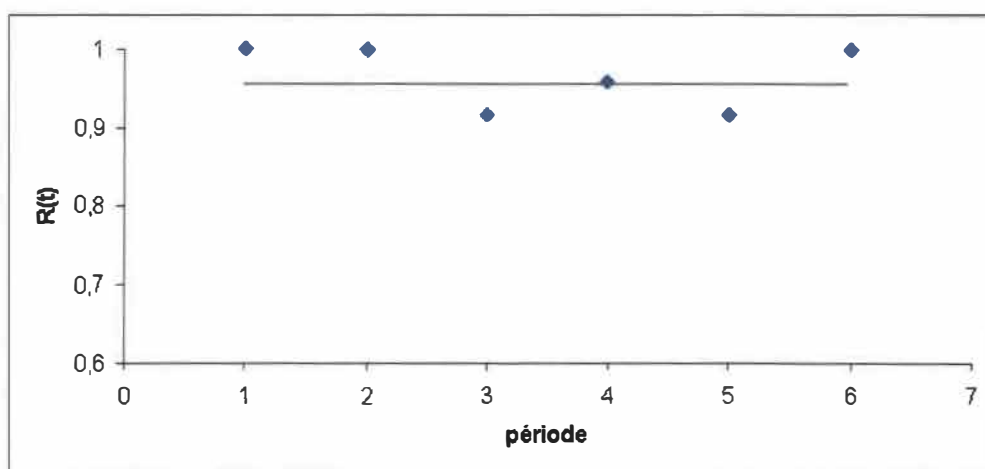


Figure 10 : Courbe de fiabilité obtenue avec la méthode Kaplan-Meier (sans 2000-2003)

Méthode Actuarielle

Cette méthode doit être habituellement choisie lorsque le nombre de défaillances est supérieur à 20. Ce sera donc les défaillances dues à la sollicitation du RUC qui seront considérées pour cette validation. Le Tableau 19 présente les résultats obtenus suite aux calculs effectués avec la méthode actuariale. Les résultats démontrent que la méthode est valide lorsqu'il y a plus de 20 défaillances. En effet, le taux de défaillance est plus élevé pour la première période (défauts de

jeunesse) et par la suite il décroît pour les deux périodes suivantes avant de remonter à la dernière période (vieillessement).

Tableau 19 : Résultats obtenus avec la méthode actuariale

Intervalle d'observation d_{ik} (années)	Nombre de défaillances n_{ok}	Nombre d'équipements en marche au début de l'intervalle N_k	$\lambda_k = n_{ok}/(N_k * d_{ik})$	Nombre théorique de défaillances $n_{ik} = N_k * \lambda_{moyen} * d_{ik}$
1982-1986	9	24	0,093750	6,25
1986-1990	3	24	0,031250	6,25
1990-1994	6	24	0,062500	6,25
1994-1998	7	24	0,072917	6,25

En ce qui a trait au suivi de la fiabilité des systèmes réparables, ceci constitue une limite de l'étude. Pour des raisons de coûts/bénéfices, cette partie ne sera pas validée dans la présente étude.

6.4.2 Vérifier la constance du taux de défaillance

Test de Mann

Pour effectuer le test de Mann, il faut avoir au minimum quatre défauts, ce qui limite le nombre de vannes sur lequel on peut utiliser le test. Il y a donc une seule vanne permettant de valider la présence du test de Mann à l'intérieur du processus soit la vanne 3432-MV41, pour la probabilité de défaillance à la sollicitation. Puisque le calcul des caractéristiques de fiabilité a été fait en premier lieu selon deux périodes distinctes (82-96 et 96-04) on utilise ces mêmes périodes pour le test de Mann et ensuite on essaie différentes combinaisons de période, où est observé une variation dans l'occurrence des défauts afin de voir si le test est valide.

Tableau 20 : Résultats des calculs du test de Mann

Période	Nombre de défauts	Seuil critique 5% (s)	Valeur calculée (v)	Résultats	
1982-1996	9	9	19	$v > s$	$\gamma = \text{constant}$
1982-2004	9	9	19	$v > s$	$\gamma = \text{constant}$
1982-1990	6	2	7	$v > s$	$\gamma = \text{constant}$

Les résultats présentés dans le Tableau 20 démontrent que ce test n'est pas valable, lorsque le nombre de défauts est peu élevé, puisque en regardant les défaillances on voit que ce n'est pas constant.

Test de Laplace

Tableau 21 : Résultats des calculs du test de Laplace

Période	Nombre de défauts	U	Seuil critique 5% (s)	Résultats	
1982-1996	9	2.84	1.65	$U < 1.65$	$\gamma = \text{constant}$
1982-2004	6	-1.22	1.65	$U < 1.65$	$\gamma = \text{constant}$

Les résultats présentés dans le Tableau 21 démontrent que ce test n'est pas valable, lorsque le nombre de défauts est peu élevé. D'ailleurs, pour les vannes du RTA, aucune n'a eu assez de défauts pour appliquer les tests de Mann et de Laplace. Afin de valider l'utilité de ces tests lorsqu'il y a plusieurs défaillances sur un équipement, des données ont été tirées d'une autre étude [28]. Le paragraphe qui suit présente brièvement l'étude et les équipements considérés et le Tableau 22 et le Tableau 23 présentent les résultats obtenus.

Les données sont extraits d'une étude pour des équipements du système d'alimentation en eau de la centrale nucléaire de Gentilly-2. L'équipement retenu est un motofiltre qui permet de filtrer l'eau brute d'alimentation. Il y a eu neuf défaillances sur les filtres retenus pour la période d'observation de juillet 1992 à avril 2005.

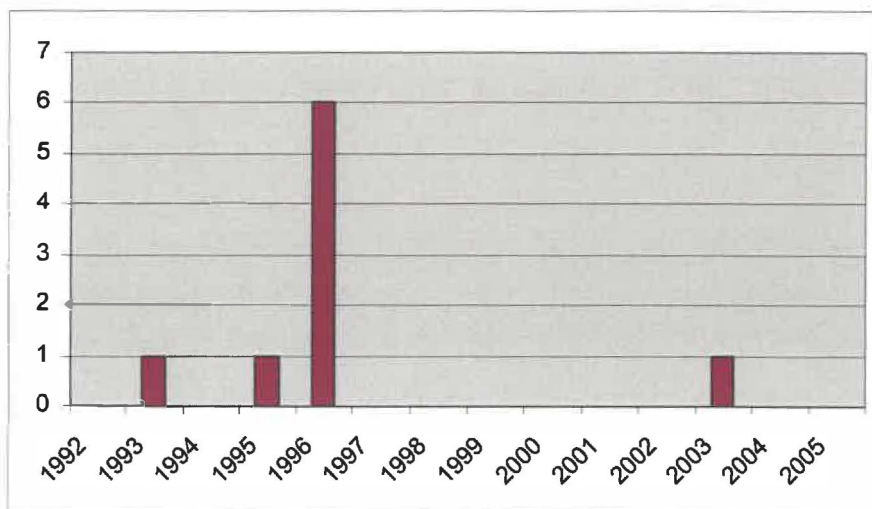


Figure 11 : Nombre de défaillances en fonction de l'année pour le filtre FR-50

Tableau 22: Résultats des calculs du test de Mann pour le motofiltre

Période	Nombre de défauts	Seuil critique 5% (s)	Valeur calculée (v)	Résultats	
1992-2005	9	9	5	$v < s$	$\gamma \neq \text{constant}$

Tableau 23: Résultats des calculs du test de Laplace pour le motofiltre

Période	Nombre de défauts	U	Seuil critique 5% (s)	Résultats	
1982-1996	9	-4.25	1.65	$U < 1.65$	$\gamma = \text{constant}$

Le résultat du test de Mann indique que le taux de défaillance par année n'est pas constant et lorsque l'on observe la Figure 11, on voit que la distribution des défaillances n'est pas constante. Ceci valide donc l'utilité du test de Mann lorsqu'il y a plusieurs défauts sur un même équipement. Pour ce qui est du test de Laplace, ce calcul permet de trouver une autre limite à ce test, il n'est pas applicable lorsque plusieurs défauts se produisent de façon rapprochée, car les temps interarrivées sont petits et alors l'équation donne des résultats faibles qui aboutissent au calcul final en un taux de défaillances constant, comme on le constate au Tableau 23.

Test de Fisher-Snedecor

Ce test s'applique à l'ensemble des équipements faisant partie d'un échantillon à l'étude. Il compare deux groupes et permet d'établir si le taux de défaillance est constant entre ces deux groupes. Dans le cas des vannes motorisées, on prend les deux périodes pour lesquelles les caractéristiques de fiabilité ont été préalablement calculées soit 1982-1996 et 1996-2004.

Tableau 24 : Résultats des calculs du test de Fisher-Snedecor

	F_0	F_i	F_s	Résultats	
RUC / Temps	2.33	1.08	0.84	$F_0 > F_s$	$\lambda \neq \text{constant}$

Les résultats obtenus pour le RUC/temps sont concluants, puisque le nombre de défauts observés est plus grand pour la deuxième période qui est plus courte. Cependant, le test ne s'applique pas pour le RUC/demande, puisque la deuxième période comporte 0 défauts.

Test du khi-deux pour un petit nombre de défauts

Cette méthode a été utilisée pour évaluer la constance pour l'ensemble des équipements et les résultats sont présentés au Tableau 25.

Tableau 25 : Résultat des calculs pour le test de khi-deux (RUC)

Période	$\chi^2_{\alpha/2, 2d'}$	$\chi^2_{1-\alpha/2, 2d'}$	χ^2	Résultats	
Demande : 1982-1996	24.43	59.34	41.99	$\chi^2_{\alpha/2, 2d'} < \chi^2 < \chi^2_{1-\alpha/2, 2d'}$	$\gamma = \text{constant}$
Temps: 1982-1996	2.18	17.53	7.76	$\chi^2_{\alpha/2, 2d'} < \chi^2 < \chi^2_{1-\alpha/2, 2d'}$	$\lambda = \text{constant}$
Temps: 1996-2004	4.41	21.03	1.56	$\chi^2 < \chi^2_{\alpha/2, 2d'}$	$\lambda \neq \text{constant}$ (croissant)

6.4.3 Détecter le point de vieillissement

Afin de détecter le point de vieillissement, la première analyse à faire est de trouver quelle distribution correspond à la courbe de défaillances grâce à la méthode graphique qui permet de visualiser l'évolution des défaillances. On trouve pour cet exemple que celle de Weibull a le meilleur coefficient de corrélation tel que démontré à la Figure 12.

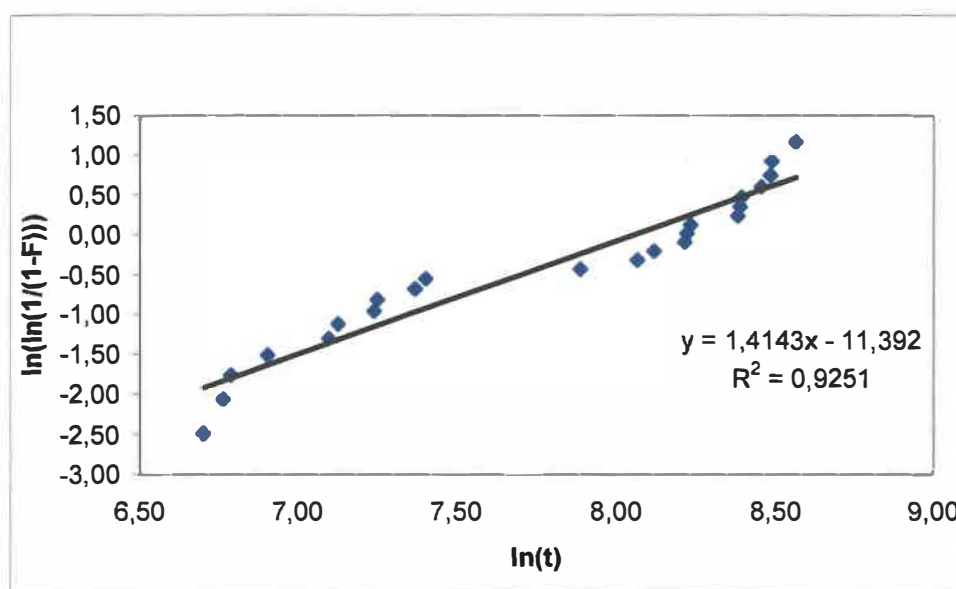


Figure 12 : Graphique de Weibull des défaillances par sollicitation (82-96)

$m' > 1$ = période de vieillissement

À partir des données, on peut tracer la courbe de fiabilité pour la période étudiée comme le montre la Figure 13.

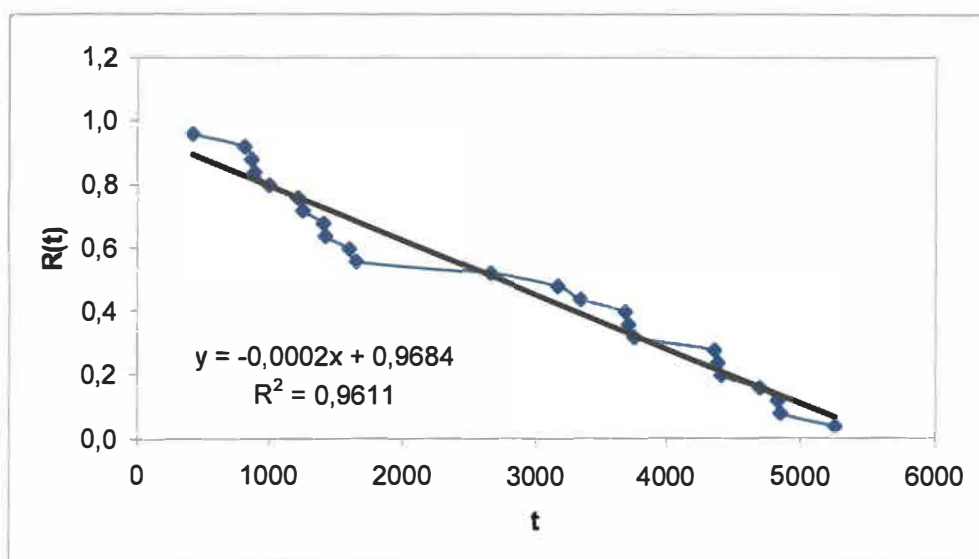


Figure 13 : Fiabilité des vannes motorisées du RUC à la sollicitation (82-96)

Le même exercice peut-être fait pour les défaillances dépendantes du temps comme le démontre les Figure 14 et Figure 15. Les autres distributions et leur coefficient de corrélation sont présentées à l'Annexe L : DISTRIBUTIONS POUR L'ANALYSE DE VIEILLISSEMENT.

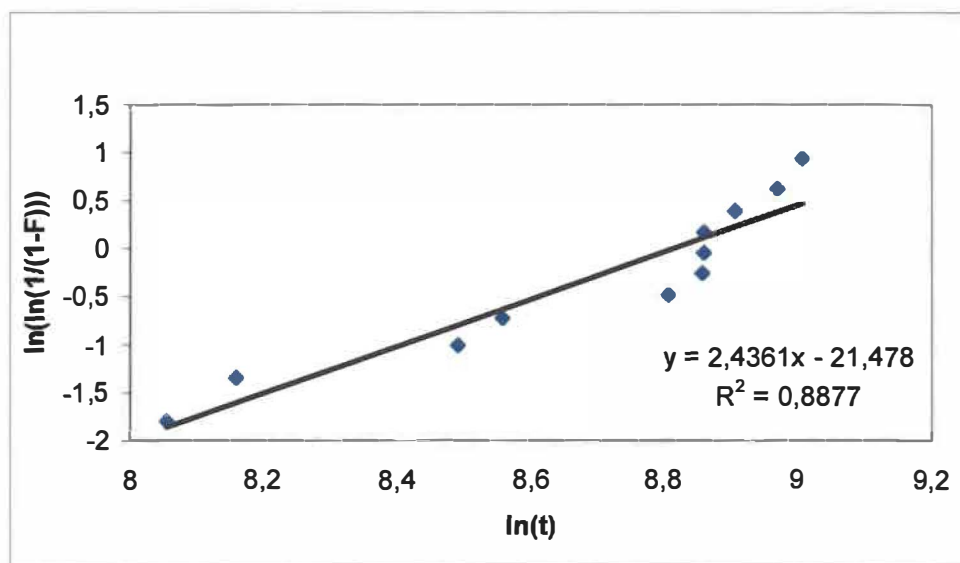


Figure 14 : Graphique de Weibull pour les défaillances sur le temps (82-04)

$m > 1$ = période de vieillissement

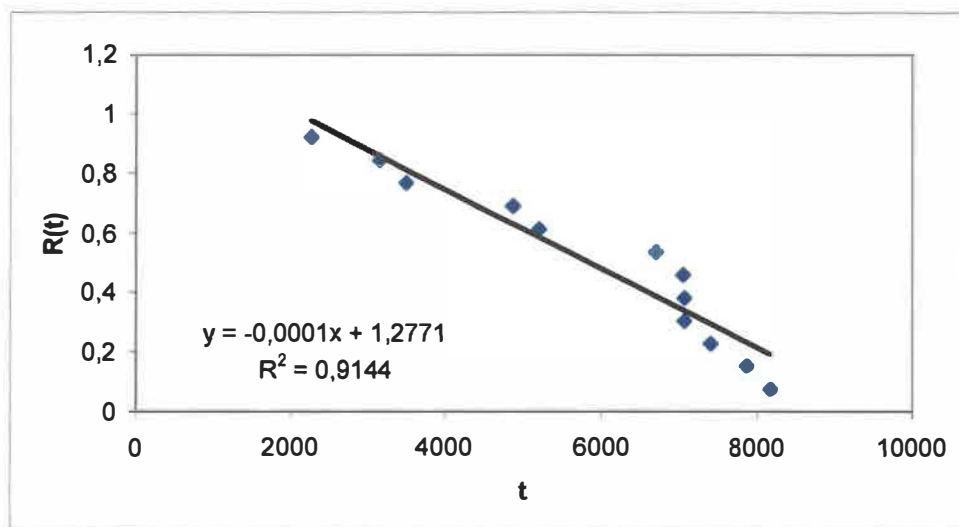


Figure 15 : Fiabilité des vannes sur le temps

6.5 Optimisation de la fiabilité opérationnelle

Pour valider cette section du processus, l'étude sur les vannes motorisées ne permettait pas de tirer des conclusions, alors c'est une autre étude sur les turbines à gaz de la centrale de Bécancour [37] qui a été utilisée. Cette étude porte sur quatre équipements identiques et nouveaux mis en service en 1992 et la synthèse des données recueillies est présentée dans le Tableau 26. Les caractéristiques recherchées avec cette étude sont le taux de défaillance en fonctionnement malgré le peu de défaillances relevées, la probabilité de réussite au démarrage et ainsi améliorer le programme de maintenance. La troisième caractéristique recherchée est la disponibilité dont le principal contributeur est la maintenance préventive.

Tableau 26 : Synthèse des données recueillies lors de l'étude sur les TAG

Total des 4 équipements	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Moyenne	
											3 ans	10 ans
Indisponibilités volontaires (heures)	1375	2319	3291	1387	2863	2532	2877	2852	2192	3647	2897	2534
Indisponibilités involontaires (heures)	47.5	11.2	6.5	228.6	17.8	16.9	0.00	25.0	312.4	58.4	131.9	72.4
Total des indisponibilités (heures)	1423	2330	3297	1616	2880	2549	2877	2877	2505	3705	3029	2606
Nombre de démarrage total	119	115	121	124	125	121	123	140	145	125	136.67	125.8
Nombre de démarrage total réussi	114	113	117	122	124	121	123	138	141	124	135	124
Nombre de refus total de démarrer	5	2	4	2	1	0	0	2	4	1	1.67	1.8
Nombre d'heures de fonctionnement	83.6	62.9	121.8	72.9	176.8	135.1	90.3	152.3	172.7	85.8	136.9	115.4
Nombre de défauts en fonctionnement	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.33	0.2

D'après les données présentées au Tableau 26, il a été possible de tracer les graphiques (

Figure 16 et

Figure 17) de l'évolution de la réussite au démarrage et de la disponibilité dans le temps. C'est ainsi que l'on perçoit l'utilité d'obtenir les caractéristiques de fiabilité puisqu'en augmentant la maintenance de quelques heures (ce qui réduit la disponibilité), on augmente la probabilité de réussite au démarrage.

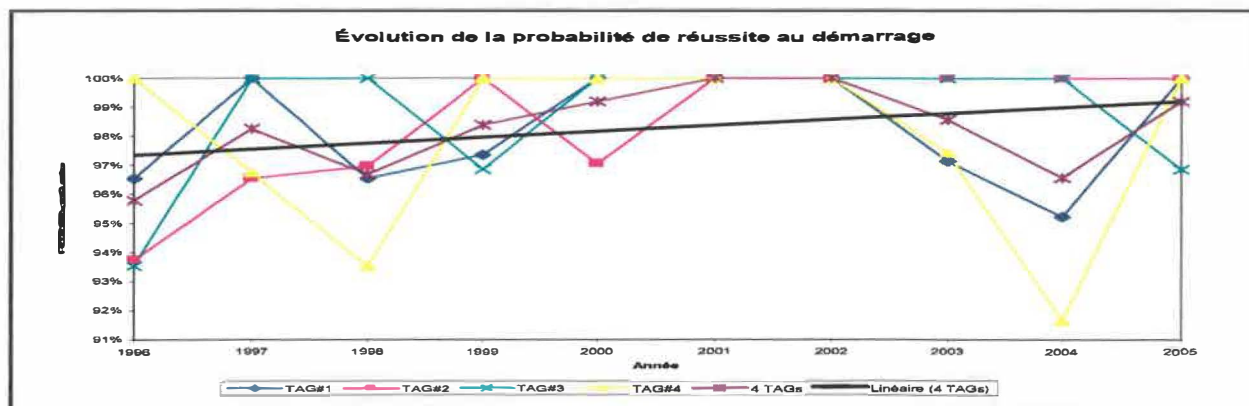


Figure 16 : Évolution de la probabilité de réussite au démarrage des TAG

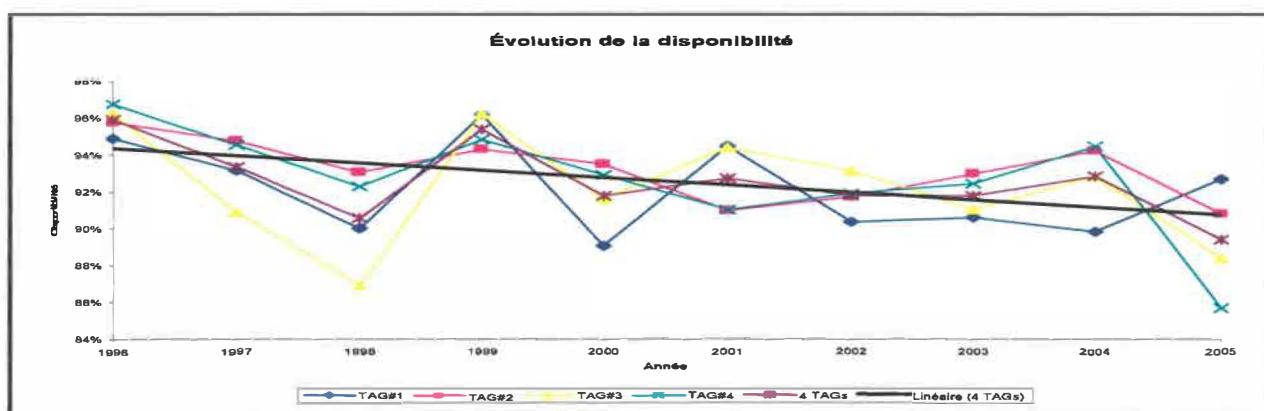


Figure 17 : Évolution de la disponibilité des TAG

Chapitre 7

ANALYSE DES RÉSULTATS

La validation du processus de suivi opérationnel à l'aide de l'étude sur plusieurs équipements en exploitation depuis 20 ans, permet de conclure que plusieurs des étapes et des tests proposées dans le processus théorique sont valides et peuvent être utilisés dans un contexte d'exploitation.

La première partie de conception du système de collecte des données était déjà réalisée lors des études, mais le processus a permis de le définir et de lui déterminer une structure. Cela permet de constater l'importance du manuel d'équipements qui divise les équipements en deux catégories, soit les équipements d'instrumentation et contrôle et les équipements électromécaniques. La première catégorie représente 80% de l'ensemble des équipements, mais comprend environ 5 à 10% de la totalité des indisponibilités, ce sont des équipements de base, peu coûteux et peuvent donc facilement être redondant. Les équipements électromécaniques, quant à eux, représentent 20% de la population et comprennent 90 à 95% de l'ensemble des indisponibilités. Ce sont des systèmes complexes, très coûteux ce qui entraîne moins de redondance. Avec ces systèmes, il faut s'assurer d'être constant dans le découpage des frontières et limite des équipements (exemple de la vanne motorisée : vanne, moteur, logique locale,...).

Le manuel des équipements vise également à s'assurer que les modes de défaillances soient définis de façon cohérente et il faut être certain d'en avoir un nombre adéquats pour représenter la catégorie des équipements. Cette règle est également relié au nombre de défaillance et à la qualité de l'information, car parfois cela représente une charge trop lourde de travail pour obtenir de l'information ou encore l'information disponible n'est pas assez précise.

En ce qui concerne la deuxième partie, à partir de la littérature, il a été possible de concevoir une démarche pour le calcul de la taille de l'échantillon en fonction de la quantité et de la catégorie d'équipements faisant partie des familles technologiques déterminées à la première partie. À partir des résultats obtenus, il est prouvé qu'un point déterminant est de s'assurer que pour l'échantillon choisi, on ait tous les défauts, dégradations et défaillances ainsi que suffisamment d'informations pour l'analyse et qu'on puisse bien les classer selon la catégorie. Les résultats de la recherche démontrent aussi que pour les équipements électromécaniques il faut tous les prendre, alors que pour les autres équipements il faut suivre le processus de sélection d'un échantillon établi lors de la conception du processus. De plus, l'établissement d'un critère de décision à l'aide d'un diagramme afin de déterminer ce qui est un défaut et ce qui est une défaillance se reflète dans les résultats obtenus.

Les résultats obtenus pour la troisième partie, soit le calcul des caractéristiques de fiabilité, valident le processus, puisque le taux de défaillance calculé est le même que celui de l'étude réalisée en 2004 [38]. Cependant, pour les intervalles de confiance, on obtient des résultats différents, puisque les niveaux de confiance utilisés ne sont pas les mêmes. En effet, le processus suggère d'utiliser les niveaux de confiance trouvés dans la littérature de l'industrie. Dans le cas étudié, on remarque que certains résultats ne se trouvent pas à l'intérieur de l'intervalle de confiance, alors qu'ils y étaient dans l'étude antérieure. Cela démontre l'importance de prendre un niveau de confiance plus petit lorsque la quantité de défaillances est faible afin de ne pas accepter de valeurs non représentatives. Pour la vérification de l'homogénéité des données, les tests utilisés de comparaison de deux moyennes observées et de l'intervalle de confiance nous donnent des résultats valides. À partir de ces résultats, il est possible d'agrandir l'échantillon.

Quant au processus Bayésien, la validation du processus a permis de valider qu'il est possible d'utiliser les calculs Bayésien lorsqu'on est en présence de deux populations de la même usine, ou de deux échantillons de la même période, il est possible de l'appliquer, mais lorsque les deux populations proviennent d'usines différentes, il est difficile de l'appliquer, car il faut s'assurer que les caractéristiques comme les frontières des équipements et les modes de défaillances sont les mêmes.

Les résultats de la quatrième partie sur le suivi de la fiabilité opérationnelle ont permis de valider plusieurs tests statistiques pour vérifier la constance du taux de défaillance et détecter le point de vieillissement. Pour les tests de Mann et de Laplace, puisque ceux-ci s'appliquent seulement pour un équipement à la fois, ils sont valides à condition d'avoir plusieurs défaillances. Dans le cas du test de Laplace, si le nombre de défaillances est élevé, mais que les temps interarrivées sont petit, alors le test n'est pas valide. Le test de khi-deux est valide pour les échantillons avec une petite quantité de défaillances tandis que le test de Fisher-Snedecor semble être valide en toute situation et s'avère donc être le test le plus robuste. L'analyse de Weibull est celle à utiliser pour détecter le point de vieillissement.

CONCLUSION

Ce travail développe un processus permettant d'obtenir des caractéristiques de fiabilité de qualité qui permettent de porter un jugement sur la fiabilité des équipements actuelle et future et ce, dans un contexte d'exploitation. Ces données servent à l'évaluation de la fiabilité, de la maintenabilité et de la disponibilité des systèmes pour estimer ou réévaluer le risque que représente un complexe industriel à risque comme une centrale nucléaire.

La méthodologie utilisée pour ce projet de recherche a permis d'élaborer un manuel théorique permettant de rassembler tous les éléments théoriques nécessaires à l'élaboration du processus. La deuxième étape de la méthodologie a servi à concevoir le processus de suivi de la fiabilité opérationnelle et la dernière étape, la validation du processus.

Le deuxième objectif principal de ce travail de recherche était de connaître la fiabilité des équipements pour en assurer le suivi et par conséquent, améliorer le programme de maintenance. Cela permet de mieux gérer les retraits volontaires pour entretien ou modification comme par exemple, lorsqu'il y a deux équipements redondants dépendant de la fiabilité de l'un et de l'autre, cela permet de les retirer un à la fois pour une période déterminée.

La validation effectuée a permis d'obtenir des résultats concluants quant à la valeur du processus établi et à sa pertinence pour l'obtention de caractéristiques de fiabilité d'équipements en exploitation. Le processus simplifiera la démarche pour la création d'une base de données de la fiabilité à la centrale Gentilly 2, qui est une nouvelle exigence dans le domaine nucléaire.

RECOMMANDATIONS

La première recommandation de ce travail concerne les équipements réparables. Ce nouveau concept dans l'industrie est inclut dans le processus mais n'a pas été traité car il constitue un sujet spécifique à lui seul. Les caractéristiques à traiter pour ce type d'équipements sont l'intensité de défaillance et le taux de réparation. Le suivi de la fiabilité de ces équipements se fait par les modèles loglinéaires et de puissance. Cette partie fut exclut du projet car un seul un auteur [4] explique cette notion qui n'est pas appliquée par aucun des principaux référentiels dans le domaine (EPRI, WANO, NRC, EDF). Il s'avère donc important de comprendre les impacts et conséquences de cette notion sur les résultats.

La deuxième recommandation concerne le jumelage des résultats de ce projet de recherche à ceux de travaux précédents pour arriver à un projet d'optimisation de la périodicité des entretiens préventifs. Le travail développé dans la référence [25] a comme objectif d'assurer le maintien de la fiabilité intrinsèque des systèmes et de mesurer l'effet des scénarios de la maintenance préventive sur leurs caractéristiques de fiabilité. Quant au travail développé dans la référence [36], il a pour but de développer une méthodologie permettant d'identifier, de classer et d'attribuer les objectifs des systèmes importants pour la sûreté afin de faire l'évaluation de la criticité des équipements. Le présent travail est un processus permettant de suivre la fiabilité opérationnelle des équipements afin de s'assurer que le changement de périodicité n'affecte pas leur fiabilité et leur disponibilité en fonction de leur criticité et selon les nouveaux mécanismes de dégradation. Suite à ces trois travaux, il s'avère pertinent de créer un nouveau projet pour optimiser la périodicité des entretiens préventifs en trouvant les critères de tolérance en fonction de la criticité des équipements et de leur taux de défaillance.

RÉFÉRENCES

1. Atwood, C. L., LaChance, J. L., Martz, H. F., et al. (2003).NUREG/CR-6823 SAND2003-3348P. Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment.U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research
2. Anders, G. J. et Silva, A. M. L. d. (2000). Cost Related Reliability Measures for Power System Equipment. IEEE Transactions on power systems **15**(2): 654-660.
3. Aupied, J. (1994). Retour d'expérience appliqué à la sûreté de fonctionnement des matériels en exploitations. Paris, Eyrolles.380 p.
4. Baillargeon, G. (2002). Probabilités et Statistique avec application en technologie et ingénierie. Trois-Rivières, Les Éditions SMG.728 p.
5. Blanks, H. (1992). Reliability in procurement and use. Chichester, John Wiley & Sons Ltd. 356p.
6. Commission Électrotechnique Internationale(1986).Publication 863. Présentation des résultats de la prévision des caractéristiques de fiabilité, maintenabilité et disponibilité.Première édition.
7. Commission Électrotechnique Internationale (1990). CEI 50(191), Norme internationale, 1^{ère} édition.
8. Commission Électrotechnique Internationale(1993).CEI 300-3-2. Gestion de la sûreté de fonctionnement.Première édition.
9. Commission Électrotechnique Internationale(1997).CEI 60605-6. Essais de fiabilité des équipements - Tests de validité des hypothèses du taux de défaillance constant ou de l'intensité de défaillance constante.Deuxième édition.

10. Commission Électrotechnique Internationale(1997).CEI 61650. Techniques d'analyse des données de fiabilité - Procédures pour la comparaison de deux taux de défaillance constants et de deux intensités de défaillance (événements) constantes.Premières éditions.
11. EIREDA, European Industry Reliability Data Bank, Volume 2, 2^{ème} edition, 1995
12. EPRI, Guide for Predicting Long-Term Reliability of Nuclear Plant systems. Structures and Components.. Palo Alto.CA. and Wolf Creek Nuclear Operating company. Burlington. KS:2002.1002954.
13. Fleming, K. N. (2004). "Markov Models for Evaluating Risk-Informed in-Service Inspection Strategies for Nuclear Power Plant Piping Systems." Reliability Engineering and System Safety 83: 27-45.
14. Fleming, K. N. et Lydellb, B. O. Y. (2004). "Database development and uncertainty treatment for estimating pipe failure rates and rupture frequencies." Reliability Engineering and System Safety 86: 227-246.
15. Goldberg et ass., System Engineering Toolbox for Design-Oriented Engineers, NASA Reference Publication 1358, december 1994
16. Houasnia, T. (1999) Pondération des taux de défaillances des équipements qui opèrent dans des milieux hostiles. UQTR, 113 p.
17. Huffman, K. (2004).1009615. Equipment Reliability Implementation Strategy.EPRI
18. Institut de sûreté de fonctionnement, Sûreté de fonctionnement et maîtrise des risques – La maintenabilité, 1999
19. Keller, W. et Modarres, M. (2005). "A historical overview of probabilistic risk assessment development and its use in the nuclear power industry: a tribute to the late Professor Norman Carl Rasmussen." Reliability Engineering and System Safety 89: 271-285.
20. Lannoy, André, « Analyse quantitative et utilité du retour d'expérience pour la maintenance des matériels et la sécurité », Éditions Eyrolles, 1996.

21. Lannoy, A. et Proccacia, H., « Méthodes avancées d'analyse des bases de données du retour d'expérience industriel », Éditions Eyrolles, 1994.
22. Lewis, E. E. (1996). Introduction to Reliability Engineering. New-York, John Wiley & Sons, Inc.435 p.
23. Martz, H. F. et Kvam, P. H. (1996). "Detecting trends and patterns in reliability data over time using exponentially weighted moving-averages." Reliability Engineering and System Safety 51: 201-207.
24. Melo, A. C. G. et Pereira, M. V. F. (1995). "Sensitivity Analysis of Reliability Indices with Respect to Equipment Failure and Repair Rates." IEEE Transactions on Power Systems 10(2): 1014-1022.
25. Messaoudi D., (2005). Élaboration d'un processus de fiabilité des équipements: application à l'espace des arrêts planifiés. Université du Québec à Trois-Rivières.
26. Monchy, F., La fonction maintenance, 2ième edition, Masson, 1991
27. Monchy, François, « Maintenance : Méthodes et organisations », 2ième édition, Dunod, 2003.
28. Mimeault A., (2005). Étude d'analyse et de fiabilité : Principaux équipements du système d'alimentation en eau de la centrale nucléaire Gentilly 2., Johnston-Vermette.
29. NASA (1998).NASA-STD-8729.1. Planning, Developing and Managing an Effective Reliability and Maintainability (R&M) Program.National Aeronautics and Space Administration
30. Note technique, Rappels de théorie de la fiabilité et utilisation du logiciel FIABAYES, Centre nucléaire de production d'électricité de Saint-Laurent-des-Eaux. Octobre 1994
31. Ontario-Hydro, Component Reliability Data for CANDU Nuclear Stations, OH86296, 1986
32. Painton, L. et Campbell, J. (1995). "Genetic Algorithms in Optimization of System Reliability." IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY 44(2): 172-177.

33. Petrilli, M.-A., Huynh, H. M. et Vaillancourt, R. (2005).MG-16-45. Analyses de sûreté.Hydro Québec, Centrale nucléaire de Gentilly-2
34. Pörn, K. (1996). "The two-stage Bayesian method used for the T-Book application." Reliability Engineering and System Safety 51: 169-179.
35. Ringler, J., Précis de Probabilités et de Statistiques à l'usage de la fiabilité, Éditions Octares, 1996.
36. Therrien S., (2006). Développement d'une méthodologie pour déterminer les objectifs de fiabilité des systèmes importants pour la sûreté d'une centrale nucléaire de type CANDU. Université du Québec à Trois-Rivières.
37. Therrien, S. (2006). Évaluation des caractéristiques de fiabilité des turbines à gaz de la centrale de Bécancour, Hydro-Québec, Centrale nucléaire Gentilly 2.
38. Therrien, S. (2004). Projet d'application : Études sur les vannes motorisées d'arrêt du RUC et du RTA de la centrale Gentilly-2, Université du Québec à Trois-Rivières.
39. Vaillancourt, R. et Houasnia, A. (2005).G2-PI-AF-101. Évaluation des caractéristiques de fiabilité d'un équipement ou d'une fonction.Hydro-Québec, Centrale nucléaire Gentilly 2
40. Villemeur, A. (1988). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Paris, Eyrolles.795 p.
41. Yang, J.-E., Hwang, M.-J., Sung, T.-Y., et al. (1999). "Application of genetic algorithm for reliability allocation in nuclear power plants." Reliability Engineering and System Safety 65: 229-238.

ANNEXE A: NOTIONS PREALABLES

A.1 Entité

Une entité se définit comme tout élément, composant, sous-système, système, dispositif, équipement, unité fonctionnelle que l'on peut considérer individuellement. La notion d'entité est utilisée pour améliorer et simplifier la compréhension et la définition des termes en fiabilité. Par ce fait, elle montre la partie subjective associée aux termes composant, sous-système, système, dispositif et équipement.

A.2 Système

Un système se définit comme un ensemble déterminé d'éléments discrets (ou composants) interconnectés ou en interactions. Le terme déterminé signifie que le système est identifiable (établissement de ses frontières). Si la nature physique d'un sous-système ou d'un composant se modifie à la suite d'une défaillance, le système est lui-même modifié.

Les principales caractéristiques d'un système sont :

- Ses fonctions (fonctions ou missions principales et secondaires, leur degré d'importance),
- Sa structure (les composants avec leurs interrelations et leur localisation),
- Ses conditions de fonctionnement (états de fonctionnement, changements de configuration),
- Ses conditions d'exploitation (cycle de charge, conditions de surveillance, conditions d'interventions, spécifications techniques d'exploitation),
- L'environnement (autres systèmes, les opérateurs humains, l'environnement proprement dit).

Les analyses de fiabilité s'adressent uniquement aux systèmes cohérents. Un système est cohérent si :

- La panne de tous les composants entraîne la panne du système;
- Le fonctionnement de tous les composants entraîne le fonctionnement du système;
- Lorsque le système est en panne, aucune défaillance supplémentaire ne rétablit le fonctionnement du système, et;
- Lorsque le système est en fonctionnement, aucune réparation n'induit la panne du système.

Les systèmes se classent dans trois grandes catégories :

1. Irréparable : Lorsqu'une défaillance du système survient, celle-ci ne peut être réparée.
2. Réparable et surveillé : La défaillance du système est réparable et celle-ci est découverte dès son occurrence et la réparation est entreprise immédiatement afin de remettre le bien dans un état de bon fonctionnement. Ceci soit en réparant l'unité défaillante ou en la remplaçant par une nouvelle entité, semblable ou équivalente du point de vue de la sûreté de fonctionnement.
3. Testé périodiquement : Le système est en attente et est soumis à des essais selon une fréquence définie.

A.3 Composant

Un composant se définit comme la plus petite partie d'un système qu'il est nécessaire et suffisant de considérer pour l'analyse. On distingue quatre types de composants:

A.3.1 Composants électroniques

Ils constituent des populations de composants identiques, de tailles statistiques élevées et non réparables. Ces facteurs combinés permettent l'application avec efficacité des méthodes statistiques pour l'évaluation de leur fiabilité. (Exemples : diode, transistors)

A.3.2 Composants électriques

Ils constituent des populations de composants de tailles statistiques élevées et sont réparables. Le fait que ces composants soient réparables, introduit une difficulté pour l'évaluation de leur fiabilité, puisqu'il faut déterminer comment considérer ces composants après une réparation et si cette dernière constitue une remise à neuf. Ceci dépend de la nature de la panne et de la réparation effectuée. (Exemples : ligne électrique, transformateur)

A.3.3 Composants électromécaniques actifs

Ils constituent des populations de composants identiques de faibles tailles statistiques et sont réparables. Comme précédemment, la réparation de ses composants ne constitue pas toujours une remise à neuf.

Ces composants comprennent un nombre important de pièces élémentaires. Ceci introduit une multiplicité de mode et de causes de défaillances possibles. On observera fréquemment des dégradations des performances plutôt que des pannes franches.

Fréquemment, ces composants diffèrent d'une installation à une autre, voire d'un système à un autre. Le fait que la population de composants identiques est de faible taille statistique conduit à des périodes d'observation longues si l'on veut évaluer leur fiabilité avec une marge d'incertitude faible. (Exemples : motopompes, disjoncteurs)

A.3.4 Composants mécaniques passifs

Ils sont difficilement réparables et les sollicitations vont les amener à travailler essentiellement en fatigue. Les paramètres qui influent de manière prépondérante sur le comportement de ces matériels sont les contraintes externes liées aux conditions de fonctionnement. Leurs caractéristiques et leurs performances sont souvent propres à des

systèmes ou à des installations industrielles. (Exemples : tuyauteries, éléments de support, pièces de structure)

ANNEXE B : NOTIONS DE FIABILITE

B.1 Principaux concepts

B.1.1 *Fiabilité*

Caractéristique d'une entité (E), exprimée par la probabilité qu'elle accomplisse une fonction requise dans des conditions données, pendant un temps donné [22].

$$R(t) = P [E \text{ non défaillante sur } [0, t]]$$

$$\text{Avec : } R(0) = 1 \text{ et } R(\infty) = 0$$

La fiabilité se définit par quatre concepts :

- *La probabilité* : Exprime les chances de réussite de l'accomplissement de la fonction d'une entité.
- *L'accomplissement d'une fonction requise* : La fonction de l'entité doit être définie de façon précise afin de connaître son rôle.
- *Les conditions données* : Elles sont relatives à l'environnement et à l'utilisation. Ce sont les contraintes physiques, chimiques, électriques et mécaniques subies par l'entité : conditions du milieu ambiant, actions provoquées par son interaction avec d'autres dispositifs.
- *Le temps* : S'exprime par le nombre de cycles, par une distance parcourue ou par l'âge atteint.

Il existe différents types de fiabilité :

- *La fiabilité opérationnelle* : qui résulte de mesures en exploitation et de l'analyse d'entités identiques dans des conditions réelles d'utilisation.

- *La fiabilité prévisionnelle* : qui estime une fiabilité à partir de considérations sur la conception du système et la fiabilité de ses composants.
- *La fiabilité extrapolée* : qui résulte d'une extension, par extrapolation ou interpolation, de la fiabilité opérationnelle à des durées ou des conditions de contrainte différentes.

B.1.2 *Disponibilité*

Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions données et à un instant donné. Au sens mathématique, la disponibilité se mesure par la probabilité qu'une entité soit en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions données et à un instant donné. Selon les entités, la notion de période de temps sera remplacée par celle du nombre de cycle, du nombre de sollicitations ou de la distance parcourue.

$$D(t) = P [E \text{ non défaillante à l'instant } t]$$

B.1.3 *Maintenabilité*

Aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits [18].

Au sens mathématique, la maintenabilité se mesure par la probabilité que la maintenance d'une entité accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits, soit achevée au temps t , sachant que l'entité est défaillante au temps $t=0$.

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

B.1.4 *Interrelations entre fiabilité, disponibilité et maintenabilité*

La **Figure 18** illustre les relations entre la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité.

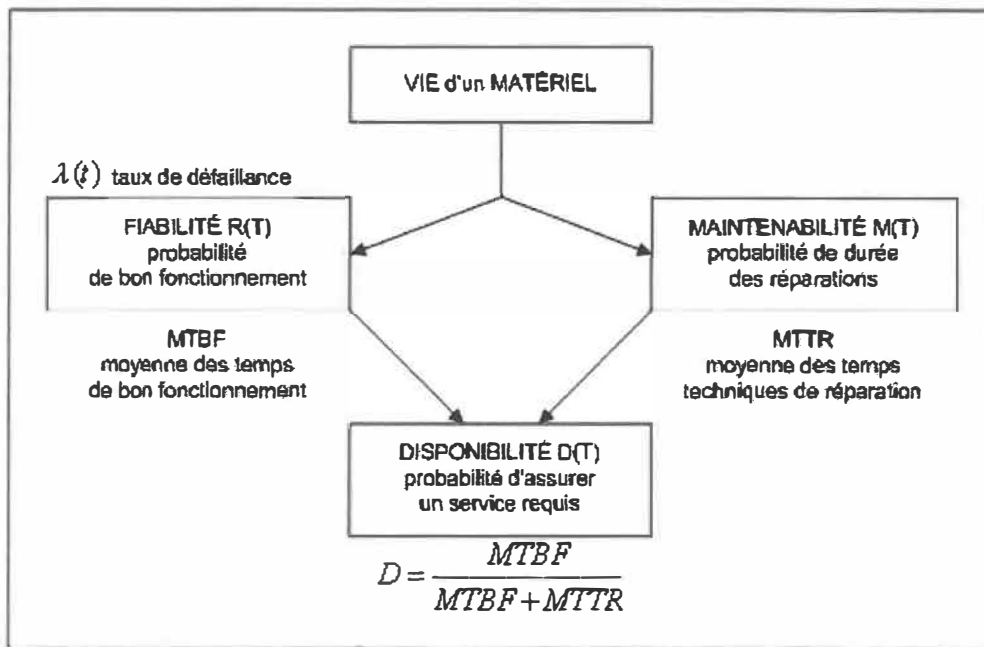


Figure 18 : Interrelations entre fiabilité, maintenabilité et disponibilité (extrait de [26])

B.1.5 Défaillance

Une défaillance est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise.

Il existe plusieurs types de défaillances, comme le démontre la **Figure 19**.

- *Progressive* : Défaillance due à une évolution dans le temps des caractéristiques d'une entité. En général, une telle défaillance peut être prévue par un examen ou une surveillance antérieure
- *Soudaine* : Défaillance qui ne se manifeste pas par une perte progressive des performances et qui ne pouvait être prévue par un examen ou une surveillance.
- *Partielle* : Défaillance résultant d'une déviation d'une des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, mais telle qu'elle n'entraîne pas une disparition complète de la fonction requise.

- **Complète** : Défaillance résultant de déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées telle qu'elle entraîne une disparition complète de la fonction requise.
- **Catalectique** : Défaillance à la fois soudaine et complète
- **Par dégradation** : Défaillance qui est à la fois progressive et partielle. Avec le temps, une telle défaillance peut devenir une défaillance complète.

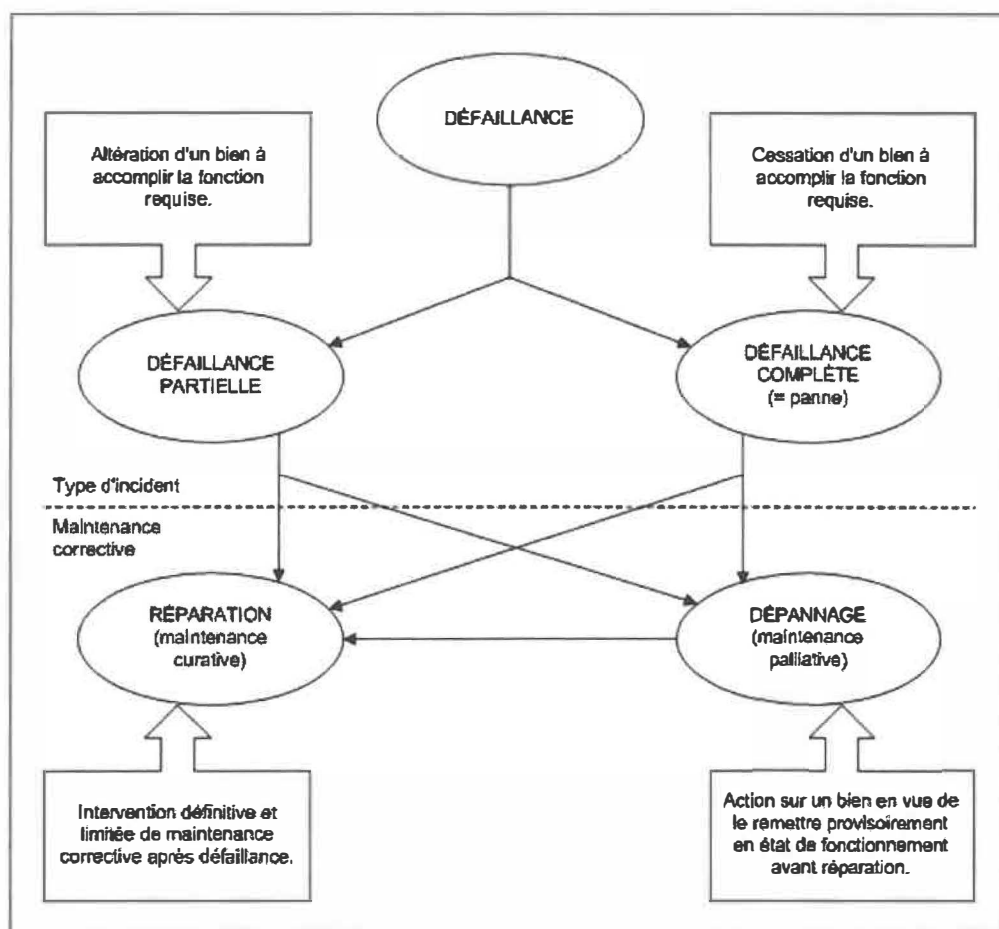


Figure 19 : Types de défaillance (extrait de [26])

B.1.6 *Défaut*

Un défaut est un écart dépassant les limites acceptables dans des conditions données entre la caractéristique d'une entité et la caractéristique voulue. Un défaut peut mais ne conduit pas nécessairement à une défaillance et un défaut d'un composant ou d'un système peut ne pas affecter l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise.

B.1.7 *Panne*

La panne est l'inaptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance. Les pannes se classent en quatre catégories :

- *Panne intermittente* : Panne d'une entité subsistant pendant une durée limitée après laquelle l'entité redevient apte à accomplir une fonction requise sans avoir été soumise à une action de maintenance corrective.
- *Panne fugitive* : Panne d'une entité qui est intermittente et difficile à constater.
- *Panne permanente* : Panne d'une entité qui persiste tant que des opérations de maintenance corrective n'ont pas eu lieu.
- *Panne latente* : Panne qui existe mais qui n'a pas encore été détecté.

B.1.8 *Modes, causes et mécanismes de défaillance*

Un mode de défaillance est la manifestation extérieure d'un phénomène physique anormal, par laquelle on constate la détérioration ou la perte d'au moins une des caractéristiques de fonctionnement d'une entité.

Une défaillance résulte de causes qui se définissent comme des circonstances liées à la conception, la fabrication ou l'emploi. Ces causes se manifestent par l'intermédiaire d'un mécanisme de défaillance qui se définit comme tout processus physique, chimique ou autre qui entraîne une défaillance.

Un mode de défaillance modifie l'état du composant, i.e. l'ensemble des paramètres caractérisant le fonctionnement de ce composant. Pour chaque type de matériels, un certain nombre de modes de défaillance est déterminé à l'avance.

Dans une étude de fiabilité de système, on s'intéressera aux modes de défaillance d'un composant qui sont supposés avoir un impact sur le fonctionnement du système auquel il est connecté.

ANNEXE C: CALCUL DE LA TAILLE DE L'ÉCHANTILLON (N)

La calcul de la taille de l'échantillon (N) se fait en fonction de la grosseur de la population (P). En effet, selon que la population soit petite ou grande, ce ne sont pas les mêmes règles de sélection qui doivent s'appliquer. De plus, la taille de l'échantillon est ajustée en fonction du taux de défaillance générique (λ), et l'objectif est de considérer toute la population lorsque $\lambda_{\text{générique}}$ est de l'ordre de 10^{-6} ou plus petit. Le tableau suivant présente les règles de choix de la taille de l'échantillon :

Valeur de $\lambda_{\text{générique}}$ (an)	TAILLE DE L'ÉCHANTILLON		
	$0 < P \leq 35$	$35 < P \leq 500$	$500 < P$
$\lambda < 10^{-6}$	$N=P$	$N=P$	$N=P$
$10^{-6} < \lambda \leq 1$	$N=P$	$^4N=0.089554P * \lambda^{-0.1699}$	$^5N=0.044777P * \lambda^{-0.1699}$

À partir du N trouvé on effectue les calculs des caractéristiques de fiabilité et on vérifie par la suite les données trouvées avec le facteur d'erreur (K). Voici les critères de K basés sur l'objectif qu'un modèle d'arbre de défaillance n'aura pas plus qu'un facteur 10 de différence entre la probabilité calculée et celle réelle.

⁴ Pour une population de 35 à 500, utiliser cette formule, mais prendre un minimum de $N=20$ ou $N=P$ lorsque la valeur obtenue est supérieure à P.

⁵ Pour une population de 500 et plus, utiliser cette formule, mais prendre un minimum de $N=100$ ou $N=P$ lorsque la valeur obtenue est supérieure à P.

	$\lambda_{95\%} / \lambda_{5\%}$	Max [$\lambda_{95\%} / \lambda_{\text{calculé}}$; $\lambda_{\text{calculé}} / \lambda_{5\%}$]
Acceptable	$K \leq 10$	$K \leq 5$
Souhaitable	$K \leq 5$	$K \leq 2.5$

Si la valeur de K ne répond pas aux critères, on recommence le calcul des caractéristiques avec un échantillon plus grand de 0.5N et on effectue des itérations jusqu'à ce qu'un facteur K acceptable soit calculé.

ANNEXE D: DETAIL DES CALCULS DES CARACTERISTIQUES DE FIABILITE

Cette annexe présente les détails des calculs des caractéristiques de fiabilité présentées au chapitre 3. Le Tableau 27 présente la synthèse du détail des calculs.

D.1 Hypothèses de calcul

Les modèles de fiabilité basés sur le taux de défaillance aléatoire sont les plus utilisés. Les principales hypothèses de calcul associés aux études sont:

- Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est indépendant de l'âge du système.
- Pour le système qui opère sur demande, la défaillance à la nième demande est indépendante de celles de la n-1 demande.
- Pour le système opérant en continu, ceci représente un $\lambda(t)$ constant.

D.2 Probabilité de défaillance

D.2.1 Calcul du taux de défaillance estimé λ .

Le nombre de défaillances est distribué suivant une loi de Poisson. Le taux de défaillance exprime le nombre de défaillances prévues d'un composant pour une période donnée. Il s'exprime en défaut par année et se calcule selon l'équation suivante:

$$\lambda = \frac{n}{N \cdot T} \quad (1)$$

où : λ : taux de défaillance observé

n : nombre de défaillances observées

N : nombre de principaux composants identiques

T : nombre d'années d'observation.

Tableau 27 : Synthèse des équations pour le calcul des paramètres de fiabilité (extrait de [39])

Objectif mesuré	Indice de mesure	Calcul	
PROBABILITÉ DE DÉFAILLANCE	Taux de défaillance en fonctionnement λ	$\lambda = \frac{n}{N \cdot T}$; si $n > 0$	n : nombre de défaillances observées
	Limites de confiance $\lambda_{inf}, \lambda_{sup}$	$\lambda_{50\%} = \frac{0,693}{N \cdot T}$; si $n = 0$	N : nombre de principaux composants identiques
		$\lambda_{inf} = \frac{\chi^2\left(\frac{\alpha}{2}, 2n\right)}{2N \cdot T}$	T : nombre d'années d'observation.
		$\lambda_{sup} = \frac{\chi^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}, 2n + 2\right)}{2N \cdot T}$	$\chi^2(\nu)$: loi Khi carrée
PROBABILITÉ DE DÉFAILLANCE SUR DEMANDE	Taux de défaillance sur demande γ	$\gamma = \frac{n}{N_d}$; si $n > 0$	n : nombre de défaillances sur demande observées
	Limites de confiance $\gamma_{inf}, \gamma_{sup}$ (si $N_d - N > 18$)	$\gamma_{50\%} = 1 - (0.5)^{1/N_d}$; si $n = 0$ N.B : $\gamma_{50\%} = \frac{0.693}{N_d}$; si $N_d >> 0$	N_d : nombre de sollicitations
		$\gamma_{inf} = \frac{\chi^2\left(\frac{\alpha}{2}, 2n\right)}{2N_d}$	$\chi^2(\nu)$: loi Khi carrée
		$\gamma_{sup} = \frac{\chi^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}, 2n + 2\right)}{2N_d}$ $\alpha = 10\%$	
NIVEAU DE CONFIANCE	Taux de défaillance observé, calculé avec un niveau de confiance $(1 - \alpha)$ selon le nombre de défaillances observées	Niveau de confiance $(1 - \alpha)$	
		0,6 (60%)	n (nombre de défaillances)
		0,8 (80%)	≤ 5
		0,9 (90%)	5 à ≤ 10
PRÉCISION DES RÉSULTATS	Facteur d'erreur EF	$EF = \max\left[\frac{\lambda_{inf}}{\lambda}, \frac{\lambda_{sup}}{\lambda}\right]$; $\alpha = 10\%$	
EFFICACITÉ DU SERVICE D'ENTRETIEN	MTTR : moyenne de temps techniques de réparation.	$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^j t_j}{N_r}$	t_j : temps de réparation observé pour la défaillance j. N_r : Nombre de défaillances où un temps de réparation a été enregistré.

D.2.2 Intervalle de confiance

Pour chaque taux de défaillance observé, il est requis de spécifier un intervalle de confiance à un niveau de confiance donné. Celui-ci se calcule avec les équations ci-dessous pour un niveau de confiance de $(1-\alpha)$:

Pour la limite inférieure :

$$\lambda_{\text{inf}} = \frac{\chi^2\left(\frac{\alpha}{2}, 2n\right)}{2N \cdot T} \quad (2)$$

Pour la limite supérieure :

$$\lambda_{\text{sup}} = \frac{\chi^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}, 2n + 2\right)}{2N \cdot T} \quad (3)$$

avec : $\alpha = P[\lambda \notin [\lambda_{\text{inf}}, \lambda_{\text{sup}}]]$ et

1 - La limite supérieure de l'intervalle de confiance est obtenue à partir de la loi χ^2 à $2n+2$ degrés de liberté pour des tests de type I [23].

2 - Si le niveau de confiance $(1-\alpha)$ est 90%, alors $\alpha/2 = 0.05$. La notation utilisée dans ce document correspond dans la plus part des tabulation utilisées de la distribution χ^2 , dont α représente l'aire entre 0 et χ^2 avec :

- $\chi^2(v)$: est déduit de la loi de χ^2 (khi-carré) à v degrés de liberté [23]. (les valeurs de χ^2 sont documentées dans la plupart des références statistiques). On trouve à la fin de ce chapitre les valeurs de cette loi.
- α : valeur du niveau de confiance désirée (le niveau de confiance est égal à $(1-\alpha)$)
- n : nombre de défauts observés.

Le rapport $\frac{\lambda_{\text{sup}}}{\lambda_{\text{inf}}}$ présente la plage d'incertitude qui définit la précision des résultats.

Note 1:**1. Équations utilisées au Canada**

Les équations (2) et (3) correspondent aux équations utilisées dans les banques européennes et américaines [23]. La banque de données [18] utilise l'équation (4) pour les bornes inférieures et supérieures avec les différentes valeurs de α . Cette approche donne une plage d'incertitude plus étroite.

$$\lambda_{\inf/\sup} = \frac{\chi^2\left(\frac{\alpha}{2}, 2n+2\right)}{2N \cdot T} \quad (4)$$

2. Nombre de défaillances nul :

Lorsque le nombre de défaillances en fonction du temps est zéro, la limite inférieure est égale à zéro. Pour la limite supérieure, on calcule la limite du taux de défaillance selon la formule suivante :

$$\lambda_{\sup, \text{unilatéral}} = -\frac{\ln(1-\alpha)}{N \cdot T} \quad (5)$$

où: N : nombre de principaux composants identiques

Dans la pratique des centrales nucléaires, le taux de défaillance d'un nombre de défaillances nul, est estimé à 50% d'intervalle de confiance [24]. La relation (5) devient:

$$\lambda_{\sup, \text{unilatéral}} = \frac{0,693}{N \cdot T} [\text{déf} / \text{année}] \quad (6)$$

D.3 Probabilité de défaillance sur demande (solicitation)**D.3.1 Calcul de la probabilité de défaillance γ**

Le nombre de défaillances sur demande (solicitations) est distribué selon une loi binomiale. La probabilité de défaillance sur demande s'estime par :

$$\gamma = \frac{n}{N_d} \quad (7)$$

où : γ : taux de défaillance observé

n : nombre de défauts sur N_d demandes

N_d : nombre de demandes

D.3.2 Intervalle de confiance

L'intervalle de confiance pour cette distribution est donné par la résolution du système d'équations (8), (9).

Pour la limite inférieure :

$$\gamma_{\inf} = \sum_{i=n}^{N_d} C_{N_d}^i \gamma_{\inf}^{N_d-i} = \frac{\alpha}{2} \quad (8)$$

Pour la limite supérieure :

$$\gamma_{\sup} = \sum_{i=0}^n C_{N_d}^i \gamma_{\inf}^{N_d-i} = \frac{\alpha}{2} \quad (9)$$

avec : $\alpha = P[\gamma \notin [\lambda_{\inf}, \lambda_{\sup}]]$ et $C_{N_d}^i = \frac{N_d!}{i!(N_d-i)!}$

Les limites inférieures et supérieures peuvent être déterminées en utilisant le tableau "limites de confiance bilatérale pour les distribution binomiale en utilisant α approprié. On fait la lecture des valeurs en fonction du nombre de défaillances et de différence entre le nombre de sollicitations et le nombre de défaillance $N_d - n$.

Selon EPRI [12], les limites supérieures et inférieures peuvent être calculées d'après les équations (10) et (11) lorsque la différence $N_d - n > 18$ (nombre de demandes excède la limite dans le tableau de calcul des conversions binomiales). Ces équations sont une approximation acceptable pour les équations (8) et (9). Dans ce cas, T est remplacé par N_d et n représente le nombre de défaillances causées par demande.

$$\gamma_{inf} = \frac{\chi^2\left(\frac{\alpha}{2}, 2n\right)}{2N_d} \quad (10)$$

$$\gamma_{sup} = \frac{\chi^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}, 2n + 2\right)}{2N_d} \quad (11)$$

Note 2:

1. Nombre de défaillances nul sur N_d demandes:

Pour zéro défaillances sur N_d demandes, les limites de confiance bilatérales.

$$\gamma_{inf} = 0 \quad (12)$$

$$\gamma_{sup} = 1 - \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{N_d}} \quad (13)$$

Dans la pratique dans les centrales nucléaires, le taux de défaillance pour un nombre de défaillances nul, est estimé à **50%** d'intervalle de confiance [24].

$$\gamma_{sup} = 1 - (0.5)^{1/N_d} \quad (14)$$

Des que N_d devient très grand, cette dernière formule s'écrit également [24] :

$$\gamma_{50\%} = \frac{0,693}{N_d} \quad (15)$$

D.4 Niveau de confiance

La pratique actuelle en vigueur dans les banques de données canadiennes est de calculer le taux de défaillance observé avec un intervalle ou niveau de confiance α de 90%.

Pour les banques de données EIREDA et le logiciel FIABAYES [30], ils utilisent les critères suivants :

Niveau de confiance (1- α)	Nombre de défauts
0,6 (60%)	≤ 5
0,8 (80%)	5 à ≤ 10
0,9 (90%)	> 10

D.5 Facteur d'erreur

On estime l'homogénéité de la distribution d'un taux de défaillance ou d'une probabilité de défaillance sur demande en calculant le facteur d'erreur "EF". Dans les banques de données canadiennes le facteur d'erreur se calcule comme suit :

$$EF = \frac{\lambda_{95\%}}{\lambda_{50\%}} \quad (15)$$

$\lambda_{95\%}$ représente le taux de défaillance à 95% de niveau de confiance.

$\lambda_{50\%}$ représente le taux de défaillance pour un nombre de défaillances nul.

La banque de donnée EIREDA évalue le facteur d'erreur du taux de défaillance calculé dans (1) et l'intervalle de confiance dans (2) et (3) avec l'équation suivante :

$$EF = \max \left[\frac{\lambda_{\cdot}}{\lambda_{\inf}}, \frac{\lambda_{\sup}}{\lambda} \right] \quad (16)$$

N.B: La même équation s'applique pour la probabilité de défaillance sur demande, en remplaçant λ par γ .

MTTF

Le *Mean Time To Failure* est la durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance et s'estime par :

$$\mu = T/n$$

où : μ : MTTF

T : Temps d'opération total de toutes les entités testées

n : Nombre de défaillance

N : Nombre d'entités testées

ANNEXE E: PRINCIPALES LOIS UTILISEES EN FIABILITE

La littérature documente abondamment l'application des lois de survie (ou de mortalité) en fiabilité. Cette annexe présente sommairement l'application des principales lois utilisées en fiabilité.

E.1 Loi binomiale

La loi binomiale s'utilise pour modéliser les dispositifs monocoups (initiateurs pyrotechniques, allumage d'un moteur fusée, organe de commutation), caractérisés par une probabilité de non fonctionnement p , ou en techniques d'échantillonnage basées sur le contrôle par attributs (i.e. une pièce est conforme ou non conforme).

E.2 Loi de Poisson

La loi de Poisson s'applique tout particulièrement au cas des dispositifs dont les pannes ont un caractère aléatoire (composants électroniques) et qui sont caractérisées par un taux de défaillance constant.

E.3 Loi exponentielle

La loi exponentielle représente correctement la distribution des durées de vie individuelle lorsque :

- les défaillances sont indépendantes et imprévisibles, et leur génération obéit à un processus de Poisson;
- le taux de défaillance est constant et égal, i.e. si un système a survécu au temps t , sa probabilité de survie pour l'incrément de temps suivant est la même que s'il vient juste d'être mis en service.

Remarques :

- La loi exponentielle s'applique particulièrement aux défaillances aléatoires observables sur les composants ou matériels au cours de leur vie utile, c'est à dire

après la disparition des défauts de jeunesse et avant l'apparition des défauts d'usure.

- Elle est un cas spécial des lois Gamma et Weibull.
- Elle est utilisée pour les mécanismes qui sont si complexes que plusieurs détériorations avec des taux de défaillances différents sont présents (composants électro-mécaniques).
- Lorsque des composants d'un système obéissent à une loi exponentielle, ce système obéit aussi à la loi exponentielle. Son taux de défaillance est alors la somme des taux de défaillances de ses composants. Dans ce cas, l'hypothèse est faite que les défaillances entre composants sont indépendantes.

E.4 Loi normale

La loi normale s'applique tout particulièrement à la durée de vie des dispositifs dont les caractéristiques fonctionnelles sont altérées par un nombre important de causes indépendantes (agents d'environnement, type d'utilisation, ...) agissant de manière additive.

Exemples typiques :

- Durées de vie liées à l'usure de matériels mécaniques, nombre de cycles de charges/décharges supportable par des accumulateurs, nombres de manœuvres supportables par des relais électromécaniques, etc.;
- Distribution statistique de la résistance à la contrainte d'éprouvettes constituées d'un même type de matériau.

Note : Il est souvent nécessaire d'effectuer une troncature préalable des queues de distribution de la loi normale (par exemple au-delà de $\pm 4\sigma$ par rapport à la moyenne) afin d'éliminer les valeurs irréalistes (exemple : valeurs négatives d'une durée de vie)

E.5 Loi log-normale

La loi log-normale s'applique particulièrement au cas de la durée de vie des matériaux travaillant en fatigue sous l'action répétée de contraintes mécaniques d'amplitude constante. Elle s'applique aussi à la durée de vie de composants optoélectroniques tels que les diodes laser (en rapport avec la réduction progressive du pouvoir émissif).

En maintenabilité, la loi log-normale traduit en général assez fidèlement la distribution des temps de réparation nécessaires pour remettre en état de fonctionnement un dispositif donné. En électronique, les valeurs du paramètre σ varient sensiblement de 0,6 pour une réparation par module à 1,4 pour une réparation au niveau du composant.

E.6 Loi de Weibull

La loi de Weibull est particulièrement adaptée aux modèles de survie dans le domaine de la fiabilité en raison de la souplesse offerte par l'existence des 3 paramètres β , η et γ . Elle peut représenter toutes les phases de vie d'un matériel. Elle peut être utilisée avec deux paramètres (β et η) ou les trois.

β est le paramètre de forme et le paramètre le plus important de la loi de Weibull. En effet, il joue sur la variation du taux de défaillance et permet ainsi de modéliser alternativement les trois phases de la courbe en baignoire :

- Si $\beta > 1$, le processus de mortalité est associé à un phénomène d'usure caractérisant particulièrement les ensembles mécaniques (roulements, moteurs) ou la partie remontante de la courbe en baignoire dans le cas de l'électronique.
- Si $\beta = 1$, le processus de mortalité est associé aux pannes aléatoires observables en période de vie utile de la courbe en baignoire. La loi de Weibull se confond alors avec la loi exponentielle.

- Si $\beta < 1$, la loi de Weibull traduit le processus d'élimination progressive des pannes de jeunesse dans le cas des composants électroniques ou le processus de rodage dans le cas des ensembles mécaniques.

η est un simple paramètre de temps appelé aussi durée de vie caractéristique.

γ est le paramètre de localisation et correspond à une simple translation. Le problème d'estimation est plus difficile ainsi que celui de l'interprétation. En règle générale, on peut dire :

- Une valeur positive de γ caractérise les mécanismes dont les seules défaillances envisageables sont liées à l'usure et ne se manifestent ainsi qu'au-delà d'une durée de fonctionnement préalable égale à γ , ce qui entraîne : $R(t) = 1$ pour $t < \gamma$.
- Une valeur négative de γ traduit selon les cas, l'existence d'un mélange de populations (ou de mécanismes de défaillances différents) ou d'un phénomène de latence, révélateur d'un déverminage ou d'un rodage qui aurait été effectué avant $t=0$.

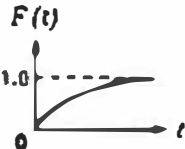
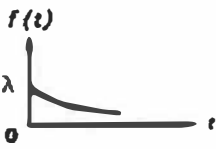
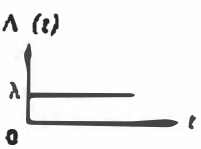
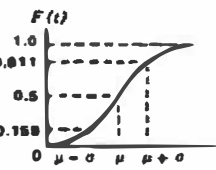
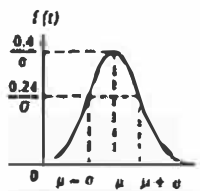
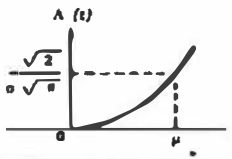
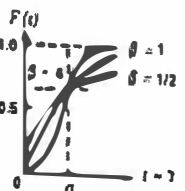
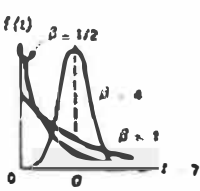
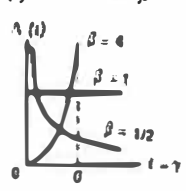
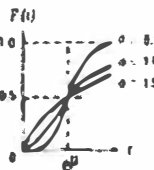
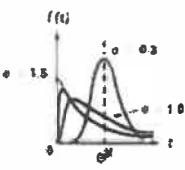
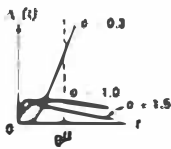
E.7 Loi gamma

La loi gamma, à l'instar de la loi de Weibull, peut être utilisée pour représenter toutes les phases de vie d'un matériel. Elle est considérée comme une généralisation de la loi exponentielle et une alternative à la loi de Weibull.

La loi gamma étant une conjuguée naturelle de la loi de Poisson, elle est souvent utilisée comme distribution a priori du taux de défaillance λ dans une modélisation bayésienne portant sur un processus de mortalité régi par la loi de Poisson.

Le Tableau 28 présente une synthèse des caractéristiques de fiabilité des principales lois et la Figure 20 fait une synthèse des lois et modèles à utiliser selon que l'on est en présence d'un système réparable ou non. Quant à la Figure 21, elle présente un tableau comparatif des lois usuelles de fiabilité et de maintenabilité.

Tableau 28 : Caractéristiques des principales lois (adapté de [3])

	$F(x) = P[X < x]$ Fonction de Répartition	$f(x) = dF(x)/dx$ Densité de probabilité	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)}$ Taux de défaillance	MTTF
E X P O N E N T I E L L E	Lois continues $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ $R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}$ 	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ 	$\lambda(t) = \lambda$ 	$\frac{1}{\lambda}$
N O R M A L E	Normale réduite et centrée $F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$ 	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$ 	$\lambda(t) = \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}{1 - \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt}$ 	μ
W E I B U L L	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\sigma}\right)^\beta}$ β = paramètre de forme σ = paramètre de forme γ = paramètre de forme 	$f(t) = \frac{\beta}{\sigma} \left(\frac{t-\gamma}{\sigma}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\sigma}\right)^\beta}$ 	$\lambda(t) = \frac{\beta}{\sigma} \left(\frac{t-\gamma}{\sigma}\right)^{\beta-1}$ $\lambda(t)$ croissant si $\beta > 1$ $\lambda(t)$ constant si $\beta = 1$ $\lambda(t)$ décroissant si $\beta < 1$ 	$\gamma + \sigma^\beta \left(\frac{1+\beta}{\beta}\right)$
L O G - N O R M A L E	Normale réduite et centrée $F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log t - \mu}{\sigma}\right)^2} dt$ 	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right]$ 	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)}$ 	$e^{\left[\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right]}$

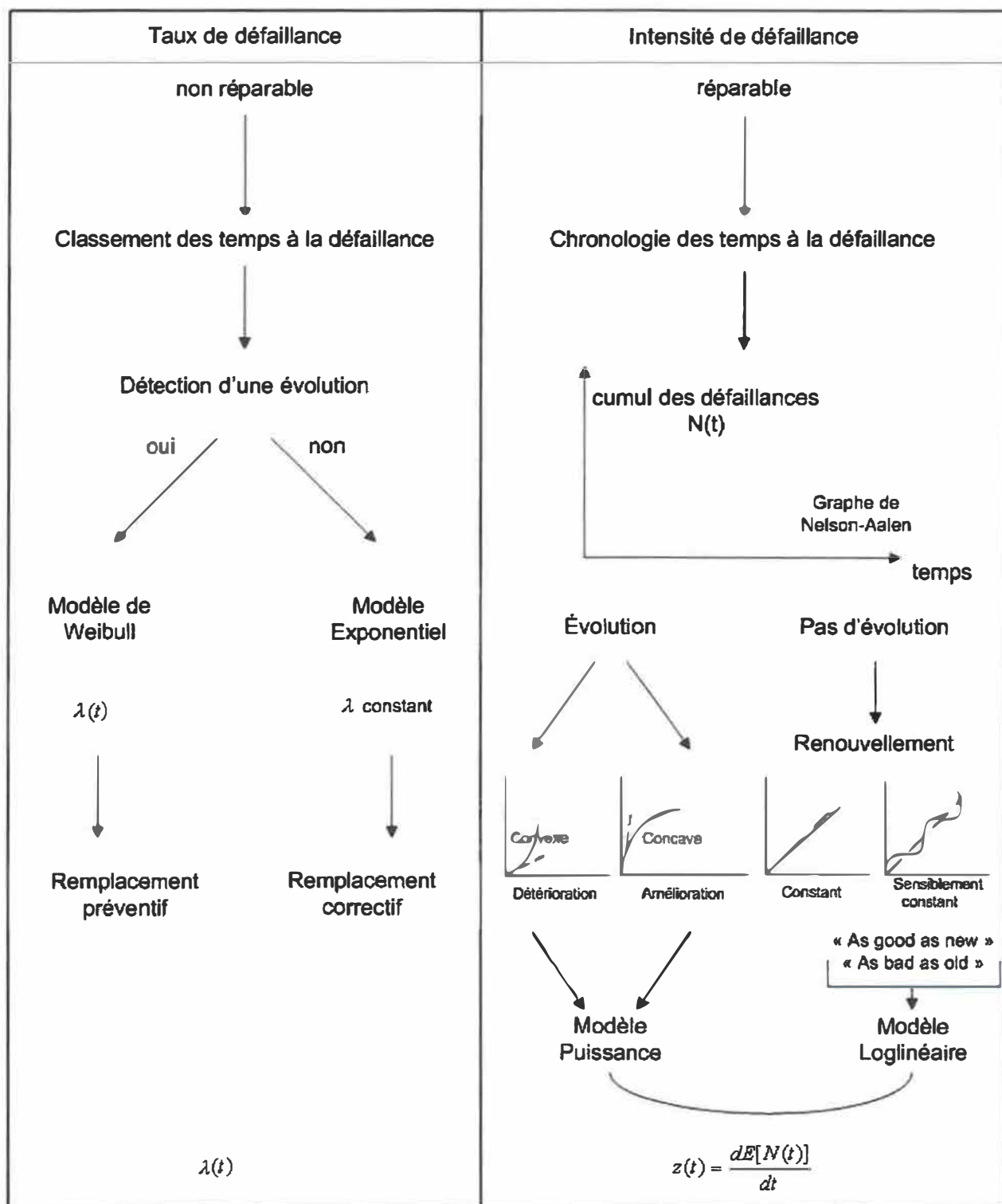


Figure 20 : Comparaison des concepts (extrait de [20])

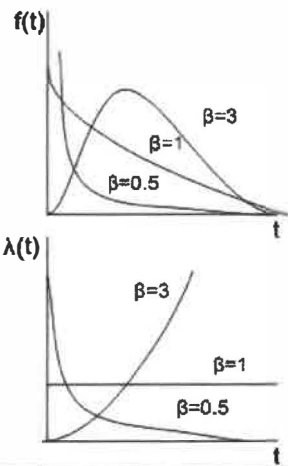
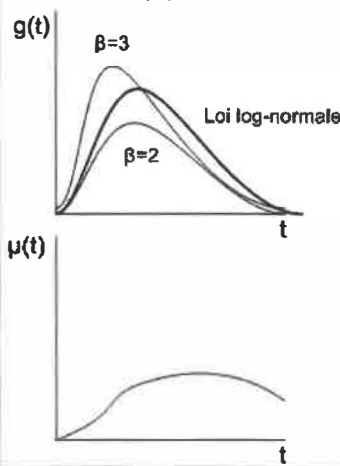
Fiabilité	Maintenabilité
Probabilité de « durée de bon fonctionnement »	Probabilité de « durée de réparation »
Variable aléatoire: temps de fonctionnement	Variable aléatoire: temps de réparation
$R(t) = P(T_r > t)$	$M(t) = P(T_r < t)$
Densité de probabilité du temps avant défaillance: $f(t)$	Densité de probabilité du temps de réparation: $g(t)$
Fiabilité: $R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$	Maintenabilité: $M(t) = \int_t^{\infty} g(t) dt = 1 - e^{-\int_0^t \mu(\tau) d\tau}$
Taux de défaillance ($\lambda(t)$): $\lambda(t) dt = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$	Taux de réparation ($\mu(t)$): $\mu(t) dt = \frac{g(t)}{1 - M(t)}$
MTBF = mean time between failures: $MTBF(t) = \int_t^{\infty} t * f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$	MTTR = mean time to repair: $MTTR(t) = \int_t^{\infty} t * g(t) dt$
Relation fondamentale: $f(t) = \lambda(t) * e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$	Relation fondamentale: $g(t) = \mu(t) * e^{-\int_0^t \mu(\tau) d\tau}$
Lois usuelles: si λ constant, loi exponentielle: $R(t) = e^{-\lambda t}$ si $\lambda(t)$ est variable, loi Weibull (loi à 3 paramètres)	Lois usuelles: si μ =constant, loi exponentielle: $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$ si $\mu(t)$ est variable, loi log-normale (distribution fréquente des durées d'interventions de maintenance), paramètres m et σ
	
Application: systèmes réparables ou non	Application: systèmes réparables

Figure 21: Loi de fiabilité (extrait [27])

ANNEXE F: TESTS D'HYPOTHÈSES

F.1 Tests de « goodness of fit »

F.1.1 Test du khi-deux

Cette méthode peut-être utilisée lorsqu'il y a au moins 20 défaillances. Elle peut également servir à vérifier la constance du taux de défaillance (voir section 3.6.2.1). Les valeurs sont groupées en k catégories n'ayant pas nécessairement la même grandeur et la statistique suivante peut être calculée :

$$\chi^2 = \sum_1^n (O_i - E_i)^2 / E_i$$

où :

O_i = nombre d'observations dans la catégorie i

E_i = nombre attendu dans la catégorie i selon la distribution de l'hypothèse.

La statistique χ^2 est distribuée suivant χ^2 avec $2v$ degrés de liberté égale à k moins le nombre de constantes dérivées à partir des données observées pour être capable de calculer les valeurs E_i . Chaque catégorie doit contenir au moins cinq valeurs et ne doit pas être sélectionnée dans le but d'inclure ou d'exclure des données particulières. La règle suivante peut être utilisée pour décider du nombre k de catégorie :

$$k = 3.3 \log n + 1$$

La statistique calculée est comparée avec $\chi^2_{1-\alpha, v}$, où α est le niveau de confiance pour lequel l'hypothèse est vérifiée. Si la statistique calculée excède $\chi^2_{1-\alpha, v}$, l'hypothèse pour le niveau de confiance α .

F.1.2 Test de Kolmogorov-Smirnov

Ce test est utile lorsque le nombre d'observations est petit. La méthode est la suivante :

- 1) Compiler les données en ordre ascendant d'occurrence.
- 2) Calculer $(F_i - G_i)$ où F_i = meilleure estimation de $F(t_i)$ basée sur l'ordre observé et utilisant l'équation $F_i = (i - 0.3)/(n+0.4)$ et $G_i = F(t_i)$ si la distribution posée comme hypothèse est applicable où n = taille de l'échantillon.
- 3) Identifier la valeur la plus grande entre $(F_i - G_i)$ et comparer avec la valeur appropriée donnée dans la table KS [5]. La table donne le maximum acceptable $(F_i - G_i)$ comme une fonction du nombre total d'observations et de niveau de confiance.
- 4) Accepter la distribution posée en hypothèse si la plus grande valeur de $(F_i - G_i)$ n'excède pas la valeur de la table KS. Sinon, rejeter.

N.B. Lorsque les paramètres de la distribution suggérée sont déterminés à partir de données observées, Blanks [5] note que les valeurs critiques du KS devraient être diminuées en multipliant par 0.7 pour les paramètres de Weibull autour de 3.0, par 0.75 pour les paramètres de 1.5 à 3.0 et par 0.8 pour les paramètres plus petits que 1.5.

F.1.3 Tests pour la constance du taux de défaillance

F.1.3.1 Test du khi-deux

Le but de ce test est de valider l'hypothèse d'un taux de défaillance constant pour le cas où le nombre de défaillances constaté est supérieur à 50. Soit :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^u \frac{(O_i - e)^2}{e}$$

Si $\chi^2 > \chi^2_{0,9}(v = u - 1)$, l'hypothèse d'un taux de défaillance constant est rejetée.

Avec :

U = nombre d'intervalles.

O_i = nombre de défaillances attendues (par la théorie).

e = nombre de défaillances attendues.

Dans le cas où le nombre de défaillances est compris entre 3 et 50, utiliser le test suivant.

$$\chi^2 = 2 \sum_{k=1}^d \ln \left[\frac{T^*}{T_k} \right]$$

avec :

d = nombre de défaillances à prendre en compte si le test de validité est fait à un moment qui coïncide avec une défaillance $d = r-1$ sinon $d = r$.

T^* = temps total d'essai cumulé à prendre en compte jusqu'au test de validité.

T_k = temps d'essai cumulé à prendre en compte jusqu'à K .

Dans le cas d'un taux de défaillance constant χ^2 est distribué suivant χ^2 (2d) à 2d degré de liberté. Si $\chi^2 < \chi^2_{0,05}$, l'hypothèse d'un taux de défaillance constant est rejetée.

F.1.3.2 Test de Mann

Ce test sert à déterminer si des résultats sur les défaillances d'une série d'équipements semblables en exploitation sont conformes à une loi exponentielle avec un taux de défaillance constant. Ce test est suffisamment robuste pour déterminer si le taux de défaillance est croissant. Dans le cas d'un résultat conduisant à la conclusion d'un taux apparemment

décroissant, un test complémentaire (de Proschan-Pyke) est nécessaire pour confirmer ce résultat.

Soit N équipements semblables sur lesquels ont été relevées les défaillances. On en compte j_m sur le $j^{\text{ème}}$ équipement.

- Si le taux de défaillance de l'ensemble des équipements est constant, un tracé du nombre d'intervalles entre défaillances, supérieurs au temps indiqué en abscisse, doit donner une exponentielle.
- La comparaison de cette courbe obtenue avec l'exponentielle théorique de constante de temps égale à la durée moyenne des intervalles, permet déjà de voir si le taux de défaillance peut être considéré comme constant.

L'objectif du test de Mann est de vérifier pour l'ensemble des équipements réparables pour lesquels on a des résultats d'exploitation, l'hypothèse H_0 d'un taux de défaillance constant contre l'hypothèse alternative H_1 : λ décroissant ou croissant.

- soit $t_{i,j}$ l'instant d'apparition de la $i^{\text{ème}}$ panne du $j^{\text{ème}}$ équipement;
- soit $T_{i,j} = t_{i,j} - t_{i-1,j}$ les durées des intervalles entre pannes;
- soit $N_{i,j}$ le nombre de valeurs $T_{k,j}$ supérieures à $T_{i,j}$ avec $k > j$.

Partant d'une valeur $T_{i,j}$, on examine toutes les valeurs des intervalles entre pannes arrivées après la date $T_{i,j}$. Pour i fixé, on fait le décompte de la quantité $N_{i,j}$ correspondant au nombre de valeurs $T_{k,j}$ pour les $k > i$. On procède de la sorte sur les valeurs de i allant de 1 jusqu'à $j_m - 1$ et on pose $N_j = \sum_i N_{i,j}$.

F.1.3.3 Test du Proschan-Pyke

Soit $\gamma_{i,j}$ les intervalles $T_{i,j}$ rangés par ordre décroissant. Soit $D_{i,j} = Y_{i,j} - Y_{i+1,j}$ les différences entre intervalles rangés consécutifs. Soit :

$$\overline{D}_{i,j} = i \times D_{i,j}$$

Comme dans le test de Mann, on considère maintenant $V_{i,j}$ le nombre des valeurs $\overline{D}_{k,j}$ supérieures à $\overline{D}_{i,j}$, pour les indices K supérieurs à i et on calcule de la même façon, et avec les mêmes formules, la quantité :

$$T = \frac{\sum_{j=1}^N (V_j + 0,5 - E[V_j])}{\sqrt{\sum_{j=1}^N V_j}}$$

Où : V_j jouant le rôle de N_j dans le test de Mann.

Si l'hypothèse H_0 est vérifiée, c'est-à-dire si le taux de défaillance apparemment décroissant est bien le fait d'un mélange de population à taux constant, alors cette valeur T est suffisamment fiable pour ne pas être en queue de la courbe représentative de la loi de Student.

Si l'hypothèse H_1 (λ décroissant) était vérifiée, les intervalles successifs $\overline{D}_{i,j}$ devraient être de plus en plus grands, augmentant ainsi V_j , donc T .

F.1.3.4 Test de Laplace

Le test de Laplace vérifie le changement de l'intensité de défaillance d'un équipement avec l'âge contre l'hypothèse nulle de la constance du taux de défaillance (i.e. un processus de Poisson homogène).

Pour un seul item les statistiques de Laplace peuvent s'écrire sous la forme :

$$U = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n'} T_i}{n'} - \frac{T'}{2} \right) \frac{(12n')^{1/2}}{T'}$$

où T_i = temps d'occurrence de la $i^{\text{ème}}$ défaillance, $n' = n$ pour les cas tronqués sur temps et $n' = n - 1$ pour les cas tronqués sur défaillances, où n = nombre total de défaillances, et $T' =$ temps d'opération total auquel le test d'hypothèse est réalisé. 'tronqué sur temps' signifie que le test d'hypothèse est réalisé à un temps ne correspondant pas à un temps d'occurrence d'une défaillance. 'Tronqué sur défaillance' signifie que le test est réalisé au un temps d'occurrence de la dernière défaillance de la période observée.

La statistique U compare la moyenne des temps d'occurrence des défaillances avec le point milieu de la période observée. Plus la croissance de l'intensité de défaillance est rapide, plus les temps d'occurrence des défaillances sont regroupées, augmentant ainsi U . La statistique U permet d'approximer la variation standard normale, l'approximation étant déjà proportionnel au niveau de confiance de 5% lorsque $n > 3$ avec le temps de troncature. Dans son ouvrage, Blanks [5] donne les valeurs critiques de U pour les différents niveaux de confiance.

F.1.3.5 Test de Fisher-Snedecor

L'analyse de Weibull permet de détecter une croissance du taux de défaillances λ . Cette analyse ainsi que la méthode non paramétrique de Kaplan-Meier permettent également de comparer deux populations de durées de vie.

Le test suivant est très utilisé dans le domaine du retour d'expérience. Il compare la fréquence de défaillance sur deux périodes différentes, mais de taille sensiblement identique, afin de

vérifier la constance du taux de défaillance. Si la fréquence est constante, ceci signifie qu'il n'y a pas eu évolution, c'est-à-dire dégradation ou, au contraire, amélioration du matériel.

On définit :

- T la période d'observation,
- k le nombre de défaillances observées sur T ,
- $\hat{\lambda}$ la fréquence de défaillances estimée,
- ν le nombre de degrés de liberté ($=2k$),
- α le niveau de confiance,
- 1 ou 2 désignant l'indice de la période.

On a :

$$\hat{\lambda} = \frac{\chi^2_{\alpha}(\nu)}{2T}$$

On peut calculer la fréquence de défaillance, observée sur les périodes 1 et 2, soit $\frac{k_1}{T_1}$ et $\frac{k_2}{T_2}$,

ainsi que le rapport des fréquences de défaillances :

$$F_0 = \frac{k_2 T_1}{k_1 T_2}$$

Le rapport de deux $\chi^2_\alpha(\nu)$ pondérés par leurs degrés de liberté suit une loi de Fisher-Snedecor

$F_\alpha(\nu_1, \nu_2)$:

$$F_\alpha(\nu_1, \nu_2) = \frac{\chi^2_\alpha(\nu_1)}{\chi^2_\alpha(\nu_2)} / \frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{1}{F_{1-\alpha}(\nu_2, \nu_1)}$$

On compare F_0 à :

- la valeur inférieure :

$$F_i = F_{1-\alpha}(\nu_1, \nu_2) = \frac{1}{F_{1-\alpha}(\nu_2, \nu_1)}$$

- la valeur supérieure :

$$F_s = F_\alpha(\nu_1, \nu_2)$$

Le test est le suivant :

- si $F_i < F_0 < F_s$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse; c'est-à-dire sur les deux périodes examinées, la fréquence de défaillance peut être considérée constante, au seuil α de signification;
- $F_0 \leq F_i$ ou $F_s \leq F_0$, on refuse l'hypothèse de constance, la valeur de F_0 n'est pas contenue dans l'intervalle; il y a une différence notable des valeurs de fréquence et donc une dégradation (ou une amélioration).

F.1.3.6 Test de Bartlett

Ce test a pour but de juger de la validité de l'hypothèse d'une loi exponentielle. Il permet également de détecter la croissance ou la décroissance d'un taux de défaillance. La formule de base du test de Bartlett est la suivante :

$$B_n = \frac{2n \left[\ln \left(\frac{t_n}{n} \right) - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln x_i \right) \right]}{1 + (n+1)/6n}$$

où : x_i = variable aléatoire représentant les temps entre défaillances

n = nombre de défaillances

$$t_n = \sum_{i=1}^n x_i$$

Sous l'hypothèse d'une distribution exponentielle B_r est distribué selon une loi de $\chi^2 - 12$ avec $D-1$ degré de liberté.

F.1.3.7 Test du MIL HDBK 189

Le but de ce test est de vérifier la croissance du taux de défaillance en fonction du type de troncature de la période de temps.

a. Tronqué sur temps

Durant une période de test T , N défaillances sont constatées aux temps $x_1 < x_2 \dots < x_n < T$.

$$\chi^2_{2n} = \frac{2N}{\hat{\beta}}$$

où :

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^n \text{Ln} \left[\frac{T}{\chi_i} \right]}$$

Sous l'hypothèse nulle de temps entre défaillances du type exponentiel, la statistique β estime le taux de croissance β .

$\beta = 1$ pas de croissance

$\beta < 1$ croissance positive

$\beta > 1$ croissance négative

b. Tronqué sur défaillance

Dans ce cas on calcule :

$$\chi^2_{2(N-1)} = \frac{2N}{\hat{\beta}} \hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^{n-1} \text{Ln} \left[\frac{\chi^n}{\chi^i} \right]}$$

ANNEXE G: DIAGRAMME DE DECISION POUR LA SELECTION DES DEFAILLANCES

Le processus qui suit permet d'identifier les défaillances observées sur les équipements à l'étude. Le système SIE émet une DT pour toutes les interventions effectuées sur les équipements. Il s'avère donc nécessaire de discriminer les DT afin d'obtenir les défaillances.

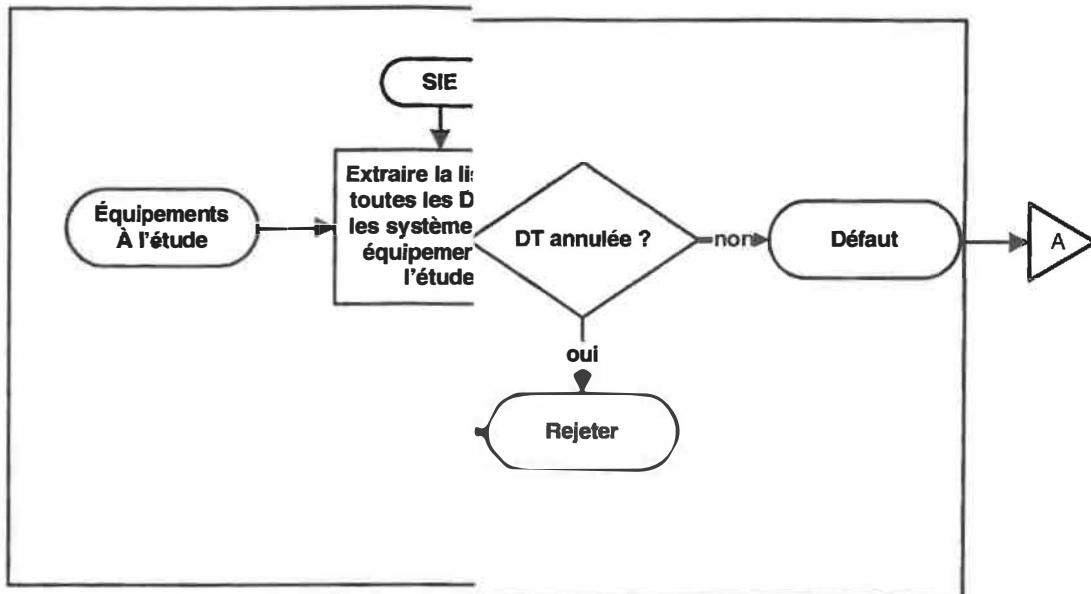
Définitions :

Défaillance : Une défaillance est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise.

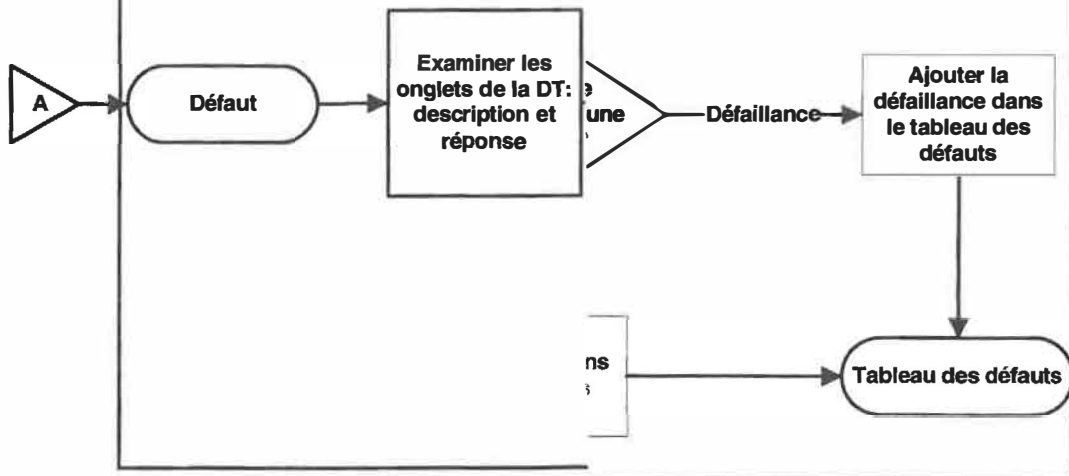
Défaut : Un défaut est un écart dépassant les limites acceptables dans des conditions données entre la caractéristique d'une entité et la caractéristique voulue. Un défaut peut mais ne conduit pas nécessairement à une défaillance.

Dégradation : Une dégradation est un écart entre la caractéristique d'une entité et la caractéristique voulue qui n'empêche cependant pas l'équipement de remplir sa mission.

La Figure 22 présente le diagramme de la procédure de traitement des DT.



Phase 2: Recherche et retenus



ANNEXE H: DESCRIPTION DES SYSTEMES ET DES EQUIPEMENTS A L'ETUDE

H.1 Description des systèmes

H.1.1 Système de refroidissement en temps d'arrêt (RTA)

Le système RTA a pour but de refroidir le combustible en période d'arrêt du réacteur. De plus, il est conçu pour permettre d'abaisser le niveau du caloporteur afin de pouvoir réaliser l'entretien des pompes principales du caloporteur et des générateurs de vapeur. Voici les principales fonctions assurées par ce système :

- Assurer le refroidissement du caloporteur à partir de 160°C jusqu'à 55° ou moins;
- Assurer le drainage partiel, le contrôle de niveau et le remplissage du caloporteur;
- Assurer en tout temps la purification de l'eau du caloporteur pendant le refroidissement de ce dernier avec les RTA sauf lorsqu'il est à son niveau d'entretien;
- Maintenir la température du caloporteur inférieure à 55°C en période d'arrêt pour une durée indéfinie;
- Refroidir le caloporteur à partir de 260°C en condition d'urgence et;
- Assurer l'extraction de l'antimoine du cœur du réacteur afin de réduire les champs de radiation autour du caloporteur suite au passage à niveau d'entretien.

Les informations sur le RTA ont été puisées dans la référence [3] pour toutes informations supplémentaires sur le système RTA, consultez cette référence.

H.1.2 Système de refroidissement d'urgence du cœur (RUC)

L'objectif du RUC est de combler les pertes d'inventaire du caloporteur et de refroidir rapidement le cœur du réacteur suite à un bris dans le circuit primaire du caloporteur dans le but de limiter

les rejets de substances radioactives. Cet objectif est atteint grâce à la détection de pertes de caloporteur (PERCA), par l'injection d'eau haute, moyenne et basse pression (HP, MP, BP) dans le caloporteur, par le refroidissement rapide des générateurs de vapeur (GV), par l'isolation des boucles du caloporteur et par le refroidissement de l'échangeur du RUC lors de l'injection d'eau à basse pression. Le RUC est composé de sept sous-systèmes ou circuits dont cinq sont décrits comme suit :

Circuit haute pression (HP) :

Le circuit HP du RUC a pour fonction principale d'assurer l'injection de l'eau haute pression dans le circuit de distribution commun suite à une PERCA ou un tremblement de terre. L'injection de l'eau HP constitue la première phase du refroidissement d'urgence du cœur.

Circuit moyenne pression (MP) :

Le circuit MP du RUC a pour mission d'injecter de l'eau moyenne pression dans le circuit de distribution commun lorsque la phase d'injection HP est terminée. L'injection de l'eau MP constitue la deuxième phase de refroidissement d'urgence du cœur. L'eau pour cette phase est fournie par le réservoir d'arrosage.

Circuit basse pression (BP) :

Le circuit de BP du RUC a pour mission d'injecter l'eau de basse pression dans le circuit de distribution commun lorsque la phase d'injection moyenne pression est terminée. L'injection de l'eau BP constitue la troisième phase de refroidissement d'urgence du cœur. L'eau pour cette phase est celle accumulée sur le planche du bâtiment réacteur (B/R) pendant les phases d'injection HP et MP.

Circuit de distribution commun :

Le circuit de distribution commun a pour but d'acheminer l'eau haute, moyenne et basse pression du RUC aux collecteurs de la boucle rompue du caloporteur suite à une perte de

caloporteur. L'acheminement de l'eau à la boucle rompue requiert l'ouverture d'au moins une des deux vannes motorisées de chaque collecteur d'entrée et de sortie du caloporteur.

Système d'isolation des boucles du caloporteur :

Le système d'isolation des boucles du caloporteur a pour mission de détecter une basse pression du caloporteur et d'initier automatiquement l'isolation des deux boucles du caloporteur. Cette isolation évite de vider la boucle intacte dans la boucle brisée en cas de PERCA. L'isolation des deux boucles est achevée en fermant les vannes motorisées qui isolent les deux boucles l'une et l'autre, et celles des circuits auxiliaires.

H.2 Description des équipements, activités et de leur environnement

Vannes d'isolation du RTA.

Fonction :

Les vannes d'isolation du RTA servent à isoler les différents circuits RTA du caloporteur.

Spécifications techniques :

Les huit vannes concernées sont des vannes d'arrêt motorisées à guillotine opérées par un actionneur électrique. Cependant, les vannes peuvent être actionnées manuellement en chantier. Ces vannes motorisées sont alimentées par une source électrique de 600V catégorie III. Les vannes d'isolation du RTA ont un diamètre de 10 pouces et sont normalement fermées.

Conditions d'utilisation :

Les vannes d'isolation sont opérées dans des conditions d'utilisation confortables c'est-à-dire qu'elles ne sont pas soumises à de grandes pressions ou dépressurisations.

H.2.1 Vannes d'arrêt motorisées du RUC

Les vannes 3432-MV79 et MV80

Fonction:

En condition normale d'opération, les vannes d'arrêt motorisées du RUC sont fermées pour isoler les réservoirs du circuit commun de distribution. Elles ouvrent lors d'une PERCA afin de permettre l'injection d'eau des réservoirs dans le circuit du caloporteur. De plus, elles se ferment lors d'un signal de bas niveau dans les réservoirs pour éviter d'injecter de l'air dans le caloporteur.

Spécifications techniques :

Elles sont normalement en position fermée et leur moteur est alimenté en tension 600 VCA. La commande des vannes est alimentée en tension 48 VCC. Si une perte d'alimentation électrique survenait, les vannes demeureraient à leur position.

Conditions d'utilisation :

Les vannes du RUC sont opérées dans des conditions d'utilisation confortables c'est-à-dire qu'elles ne sont pas soumises à de grandes pressions ou dépressurisations. De plus, elles opèrent à des températures variant entre 35° C et 50° C.

Les vannes 3432-MV71 et MV72

Fonction:

Ces vannes se ferment simultanément aux vannes 3432-MV79 et MV80 lorsque le signal de bas niveau des réservoirs survient à la fin de l'injection HP. En fait, elles garantissent l'isolation du RUC HP si une ou deux des vannes MV79 et MV80 étaient défaillantes de façon à éviter l'injection d'air dans le caloporteur. Finalement, elles permettent d'isoler les vannes MV79 et MV80 lors des opérations d'essais ou de maintenance de ces dernières.

Spécifications techniques :

Ces vannes sont identiques aux vannes 3432-MV79 et MV80. Cependant, elles sont normalement en position ouverte.

Conditions d'utilisation :

Les conditions d'utilisation pour ces deux vannes sont identiques aux vannes 3432-MV79 et MV80.

Les vannes 3432-MV31 et MV50**Fonction:**

Ces vannes se ferment simultanément avec les vannes 3432-MV79 et MV89 sur signal du bas niveau dans les réservoirs d'eau à la fin d'injection HP. Elles garantissent l'isolation du RUC HP en cas de défaillance d'une ou des vannes MV79 et MV80 afin d'éviter une injection d'air dans le caloporteur. De plus, elles permettent d'isoler les vannes d'injection HP MV79 et MV80 lors des procédures d'essai ou pour maintenance.

Spécifications techniques :

Les vannes 3432-MV31 et MV50 sont des vannes de 12 pouces. Elles sont normalement en position fermée et leur moteur est alimenté en tension 600 VCA. La commande des vannes est alimentée en tension 48 VCC. Si une perte d'alimentation électrique survenait, les vannes demeureraient à leur position.

Conditions d'utilisation :

Les conditions d'utilisation pour ces deux vannes sont identiques aux vannes 3432-MV79, MV71, MV72 et MV80.

Les vannes 3432-MV39 à MV46 et MV59 à MV66

Fonction:

En exploitation normale, ces vannes isolent le circuit caloporteur du RUC. Lors d'une PERCA, elles s'ouvrent pour permettre l'injection du RUC dans les collecteurs.

Spécifications techniques :

Ce sont des vannes d'arrêt (guillotine) de 10 pouces. Ces vannes sont normalement en position fermée. Leur moteur est alimenté en tension 250 VCC. Elles demeurent à leur position sur perte d'alimentation électrique.

Conditions d'utilisation :

Ces vannes d'isolation sont connectées directement aux collecteurs du circuit caloporteur. Les conditions d'opération sont une température d'environ 265°C et une pression d'environ 11Mpa sur un côté de la vanne. Toutefois, il y a de petites fuites d'eau lourde à travers ces vannes. La température et la pression sur les deux côtés de ces vannes sont respectivement de 265°C et 11 Mpa. Ces vannes sont donc opérées dans des conditions « difficiles ».

Les vannes 3332-MV1 et MV2

Fonction:

Lors de PERCA, elles ferment automatiquement sur signal d'isolation des boucles et isolent les deux boucles du circuit caloporteur l'une de l'autre ainsi que du pressuriseur.

Spécifications techniques :

Ce sont des vannes robinet de 8. Elles sont normalement en position ouverte et leur moteur est alimenté en tension 250 VCC. Lors d'une PERCA, les vannes ferment automatiquement au

signal d'isolation des boucles et s'isolent du circuit caloporteur l'une de l'autre ainsi que du pressuriseur.

Conditions d'utilisation :

Ces vannes d'isolation des boucles du caloporteur doivent fermer lors d'une PERCA peu importe le côté de la perte de pression. L'eau dans le caloporteur est à une température moyenne de 290°C et est pressurisée à 11 MPa. Ces vannes sont donc opérées en conditions « difficiles ».

ANNEXE I: DESCRIPTION DES MODES DE DEFAILLANCES

▪ **Ouverture ou fermeture intempestive**

Pour les vannes d'isolation motorisées, ce phénomène est souvent associé au mécanisme de l'actionneur qui est mis sous tension lorsque non requis. Lors de rares occasions, ce mode peut être causé par une défaillance du mécanisme interne de la vanne. Par exemple la tige de la vanne d'arrêt se brise et le pointeau qui tombe par gravité en position fermée. Par contre, des défaillances de ce genre arrivent très rarement et peuvent être écartées.

▪ **Refus d'ouvrir ou de fermer**

Ce mode peut être causé par toutes sortes de mécanismes de défaillance. Les commandes de la vanne peuvent ne pas mettre sous tension l'actionneur lorsqu'il le faut ou le diriger dans la mauvaise direction. Si la vanne n'est pas mise sous tension régulièrement, le mécanisme peut se coincer à cause de la corrosion ou, avec le temps, manquer de lubrification. Ainsi, l'actionneur n'appliquera pas assez de force pour se décoincer. Également, si le fluide est sale, des corps étrangers peuvent coincer le mécanisme. L'actionneur lui-même peut être défaillant ou peut se contaminer par des matières externes et cesser de fonctionner.

▪ **Fuite externe**

Ce mode est plus souvent associé à des fuites de petites quantités provenant des joints ou des garnitures. Ce genre de fuite arrive habituellement lorsque les joints ou les garnitures sont usés, déformés ou endommagés. L'usure et l'endommagement peuvent être reliés à des tests trop fréquents. La déformation des joints ou des garnitures peut être causée par une installation

inappropriée qui peut aussi entraîner des dommages. Les fuites peuvent aussi être causées par la fissuration ou la fracturation du corps de la vanne ou du bonnet.

- **Fuite interne**

Ce mode est habituellement causé par des défaillances d'instrumentation et de contrôle ou de l'usure ou des dommages au support de la vanne. Les défaillances d'instrumentation et de contrôle sont habituellement des défaillances des interrupteurs de fin de courses ou des interrupteurs de torque, qui limite la course de la vanne pour l'arrêter prématurément. L'usure ou les dommages au support de la vanne peuvent être causé par une sollicitation élevée de la vanne ou par des corps étrangers dans le fluide.

ANNEXE J: DETAIL DES DEFAILLANCES DES VANNES DU RUC ET DU RTA

Tableau 29: Défaillances des vannes motorisées d'arrêt du RUC

# Vanne	Classe vanne	Date de la défaillance	Mode de défaillance	Temps de réparation (heure)	Causées par le temps	Causées par la sollicitation
3432-MV40	Arrêt, 10", NC	2001-03-30	Refus d'opérer	4	oui	
		2001-04-21	Refus d'opérer	11	oui	
3432-MV41	Arrêt, 10", NC	1983-02-28	Refus d'opérer			oui
		1984-05-14	Refus d'opérer	40		oui
		1984-06-06	Refus d'opérer	8		oui
		1984-03-23	Refus d'opérer	20		oui
		1986-07-11	Refus d'opérer	2		oui
		1989-04-19	Refus d'opérer			oui
		1990-08-28	Refus d'opérer		oui	
		1991-08-08	Refus d'opérer		oui	
		1992-02-12	Refus d'opérer	6		oui
		1994-11-18	Refus d'opérer	16		oui
		1996-05-23	Refus d'opérer	4		oui
		2001-09-23	Refus d'opérer	4	oui	
		2002-03-24	Refus d'opérer	3	oui	
3432-MV42	Arrêt, 10", NC	1993-12-17	Refus d'opérer	8		oui
		1994-01-14	Refus d'opérer			oui
		2001-04-04	Refus d'opérer	6	oui	
3432-MV43	Arrêt, 10", NC	1990-09-17	Refus d'opérer			oui
		1991-03-8	Refus d'opérer	16		oui
3432-MV44	Arrêt, 10", NC	1988-03-21	Refus d'opérer		oui	
		1995-04-19	Refus d'opérer	3		oui
3432-MV61	Arrêt, 10", NC	1996-05-24	Refus d'opérer	6		oui
3432-MV62	Arrêt, 10", NC	2001-04-22	Refus d'opérer	2	oui	
3432-MV50	Arrêt, 12", NC	1985-10-29	Refus d'opérer			oui
		1985-05-30	Refus d'opérer	9		oui
3332-MV1	Arrêt, 8", NO	1984-09-23	Refus d'opérer			oui
		1985-11-12	Refus d'opérer			oui
		1992-04-22	Refus d'opérer			oui
		1986-05-23	Refus d'opérer			oui
3332-MV2	Arrêt, 8", NO	1992-03-09	Refus d'opérer			oui
		1994-02-07	Refus d'opérer			oui
		1995-03-30	Refus d'opérer	33		oui
		1996-04-01	Refus d'opérer	0.07	oui	
		2000-04-19	Refus d'opérer	16	oui	
3335-MV2	Soupape, 4", NO	1991-11-10	Refus d'opérer			oui
3432-MV79	Arrêt, 12", NC	2003-07-16	Bloquée ouverte à 25%		oui	

Tableau 30: Défaillances des vannes motorisées d'arrêt du RTA

# Vanne	Classe vanne	Date de la défaillance	Mode de défaillance	Temps de réparation (heures)	Causées par le temps	Causées par la sollicitation
3341-MV1	Arrêt, 10", NC	1986-03-26	Refus d'opérer	n/a		Oui
		1986-11-19	Refus d'opérer	n/a	Oui	
3341-MV5	Arrêt, 10", NC	1998-09-16	Refus d'opérer	4		Oui
		1999-06-16	Refus d'opérer	8	Oui	
3341-MV9	Arrêt, 10", NC	1985-10-29	Refus d'opérer	n/a		Oui
3341-MV16	Arrêt, 10", NC	2003-12-23	Refus d'opérer	1	Oui	
		2004-06-24	Refus d'opérer	6		Oui

ANNEXE K: DETAIL DU CALCUL BAYESIEN

K.1 Taux de défaillance (RUC 82-96 + RUC 96-04)

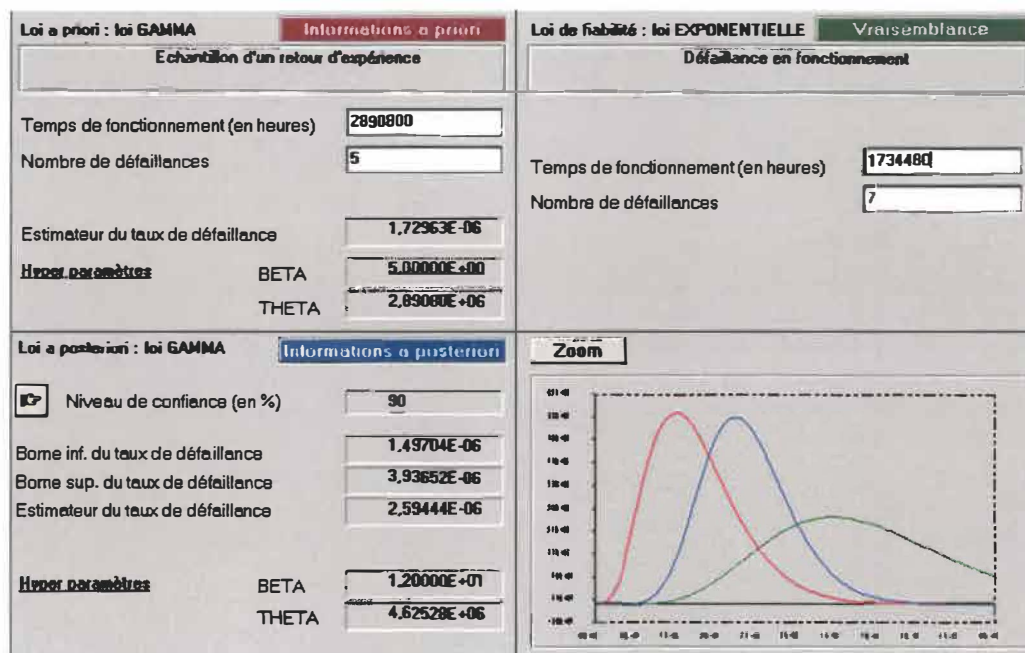


Figure 23 : Calcul Bayésien sans poids de λ pour RUC 82-96 + RUC 96-04

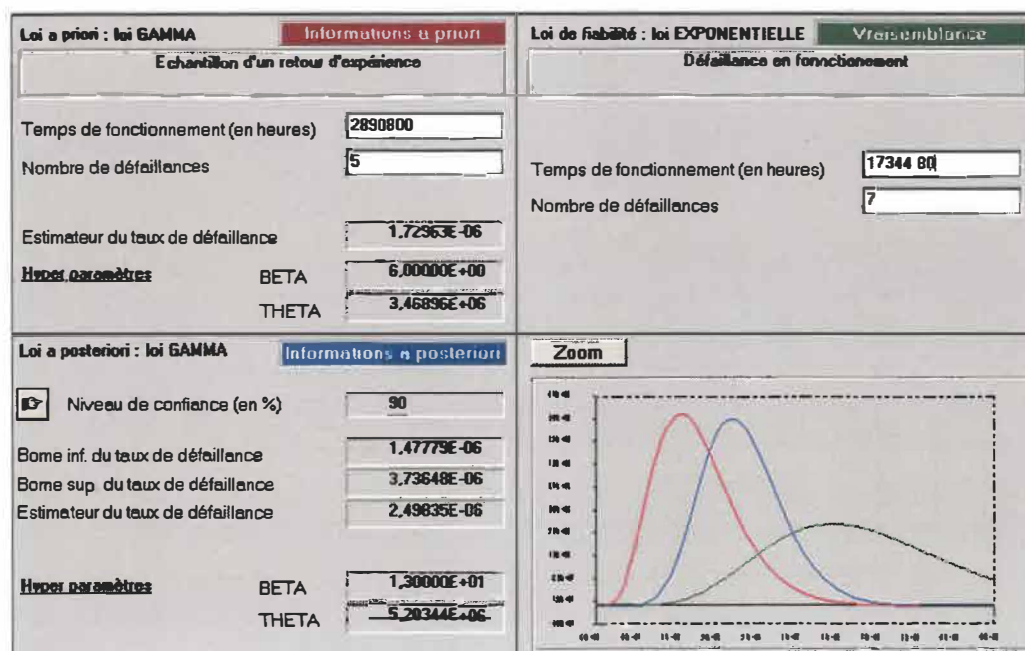


Figure 24 : Calcul Bayésien avec poids=2 de λ pour RUC 82-96 + RUC 96-04

K.2 Probabilité de défaillance sur demande (RUC 82-96 + RUC 96-04)

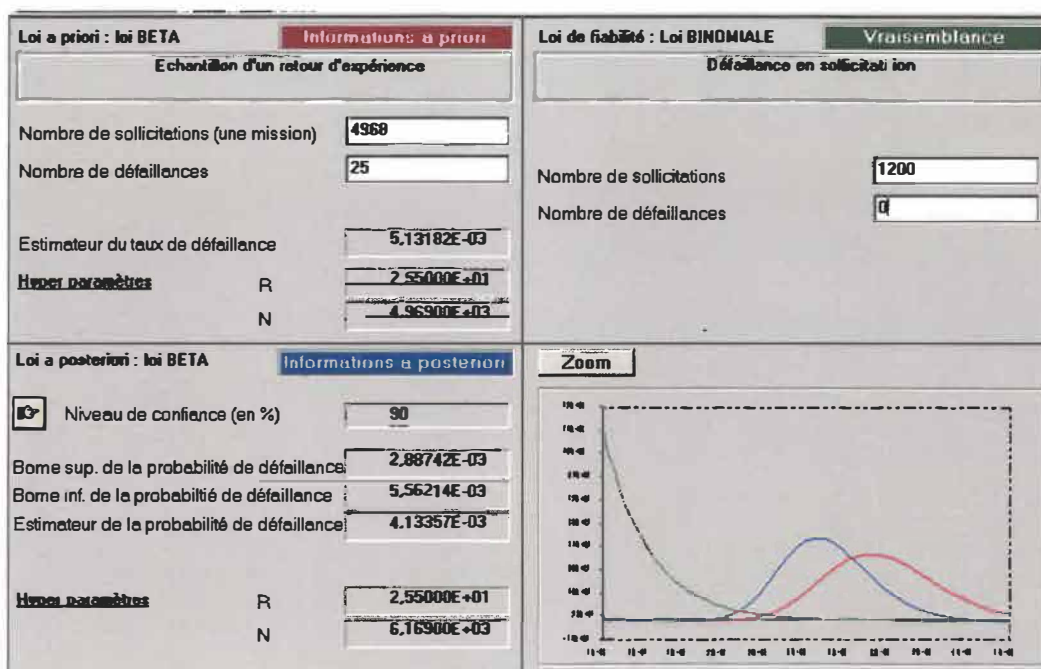


Figure 25 : Calcul Bayésien sans poids de γ pour RUC 82-96 + RUC 96-04

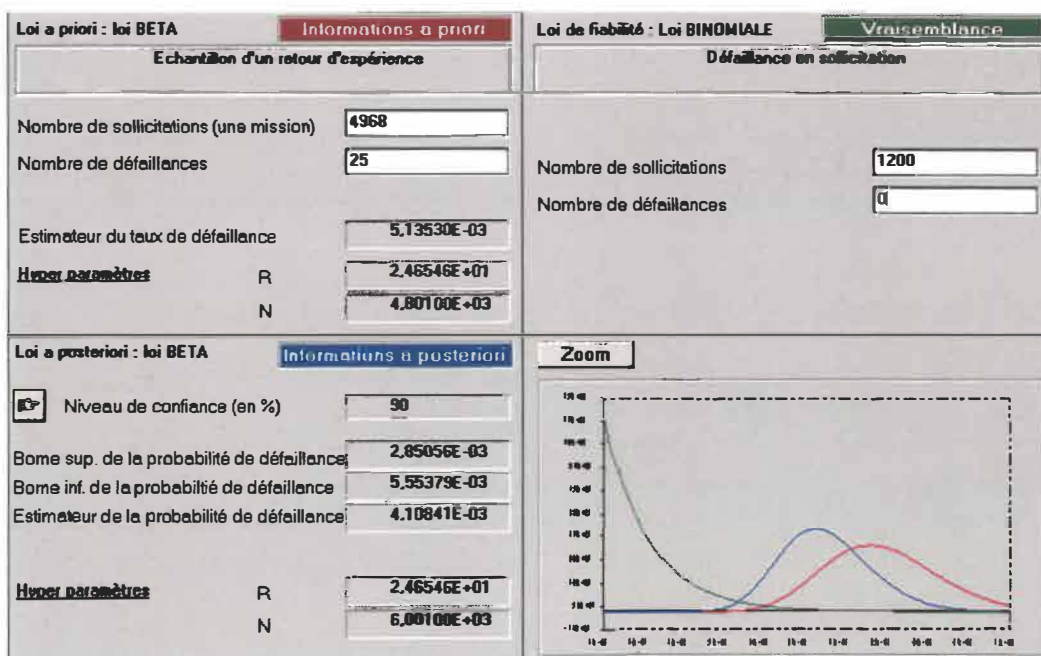


Figure 26 : Calcul Bayésien avec poids=2 de γ pour RUC 82-96 + RUC 96-04

K.3 Taux de défaillance (RTA 82-96 + RTA 96-04)

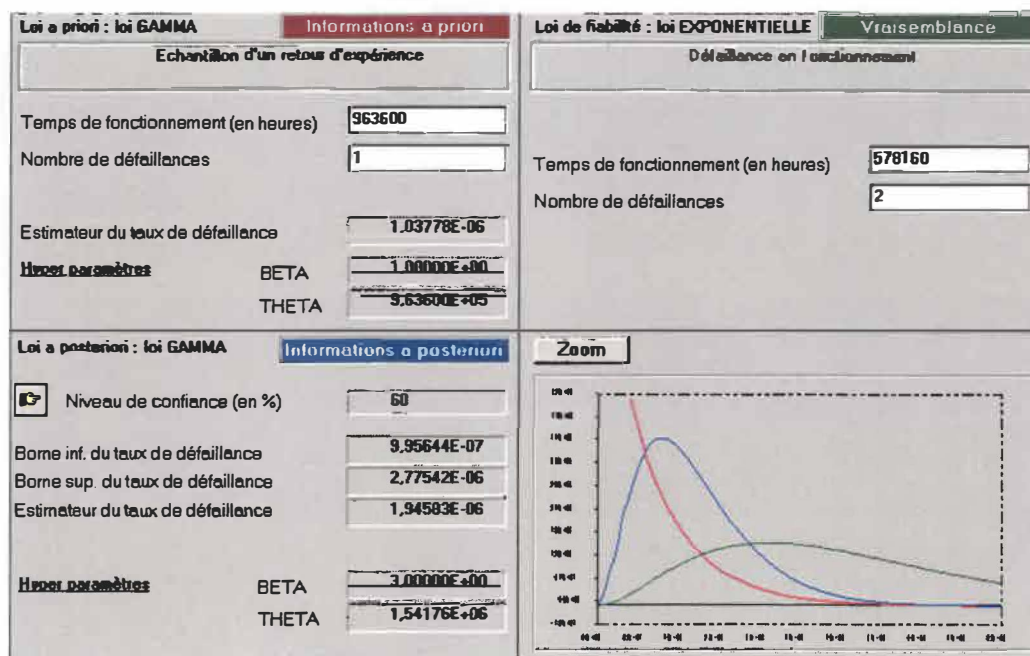


Figure 27 : Calcul Bayésien sans poids de λ pour RTA 82-96 + RTA 96-04

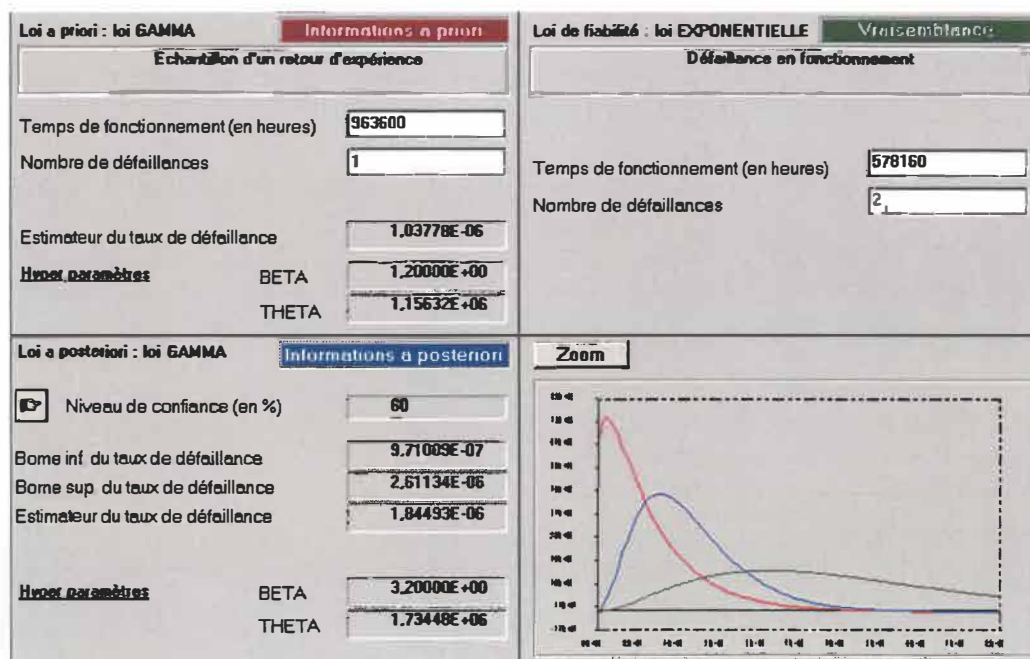


Figure 28 : Calcul Bayésien avec poids=2 de λ pour RTA 82-96 + RTA 96-04

K.4 Probabilité de défaillance sur demande (RTA 82-96 + RTA 96-04)

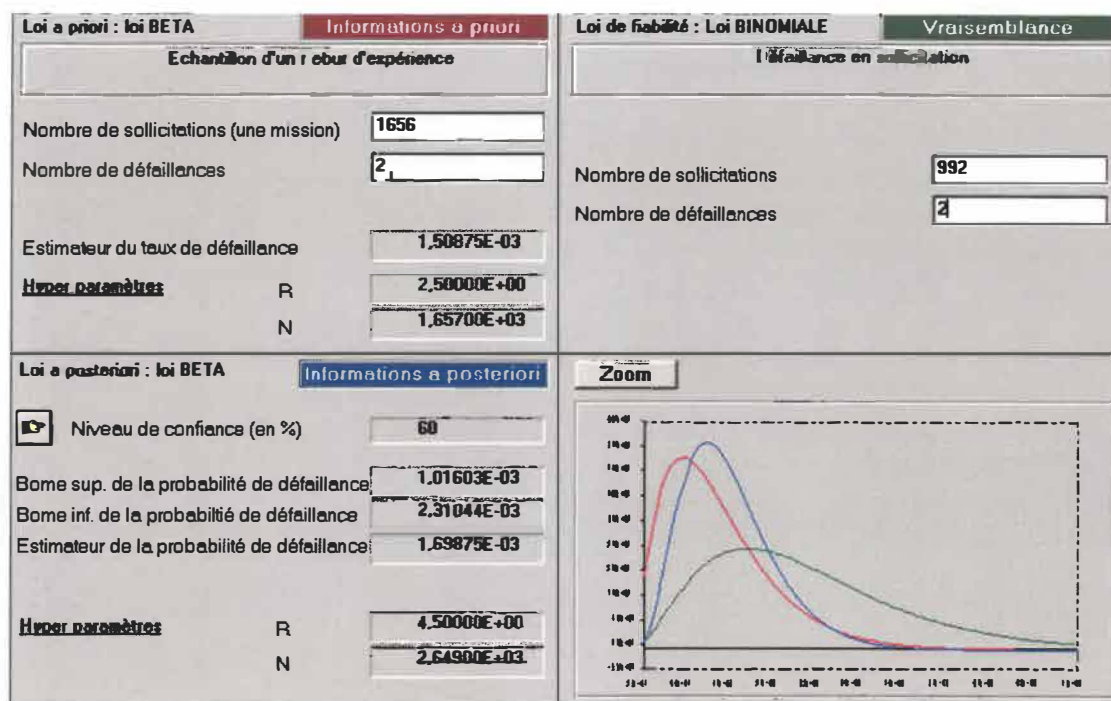


Figure 29 : Calcul Bayésien sans poids de γ pour RTA 82-96 + RTA 96-04

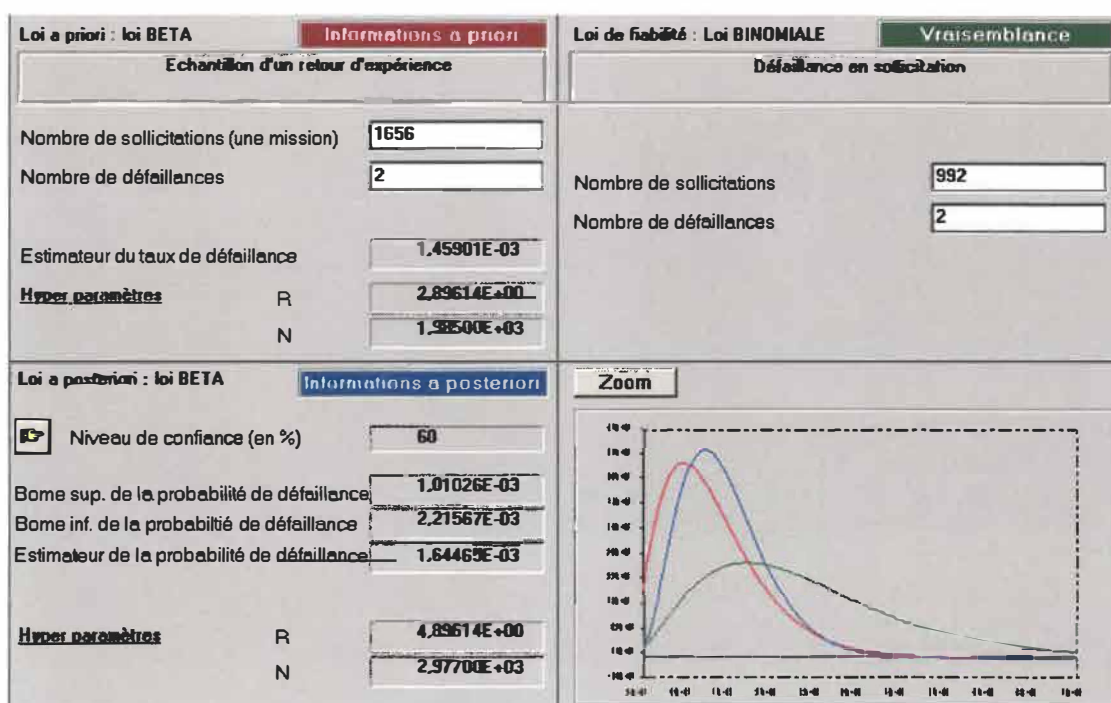


Figure 30 : Calcul Bayésien avec poids=2 de γ pour RTA 82-96 + RTA 96-04

K.5 Taux de défaillance (RUC 82-04 + RTA 82-04)

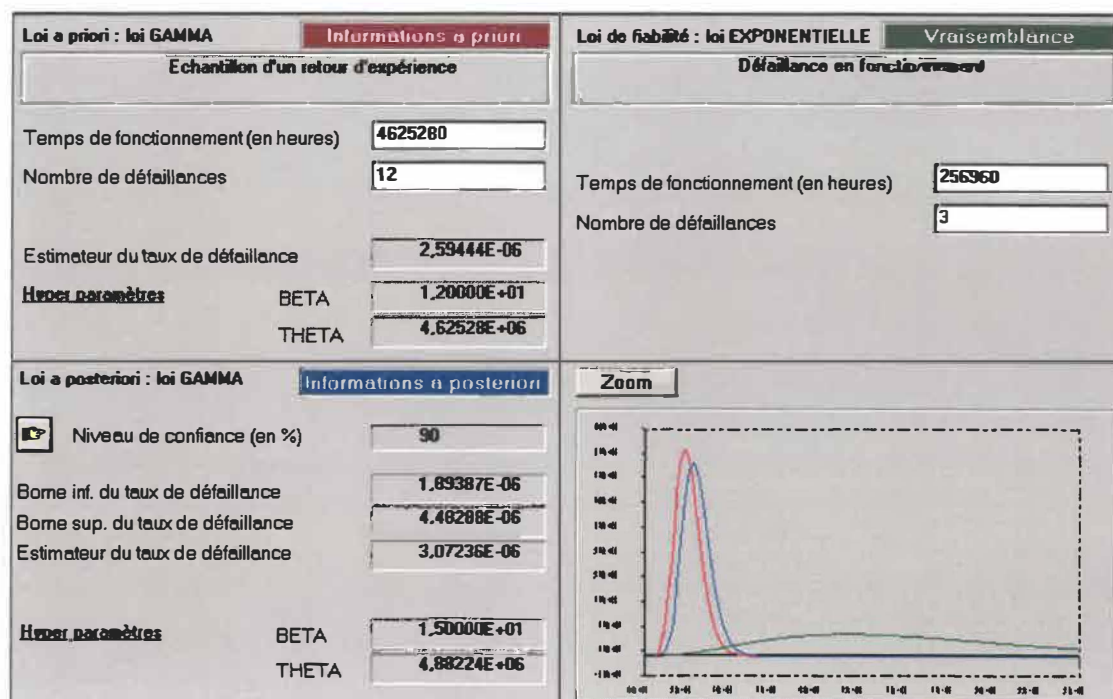


Figure 31 : Calcul Bayésien sans poids de λ pour RUC 82-04 + RTA 82-04

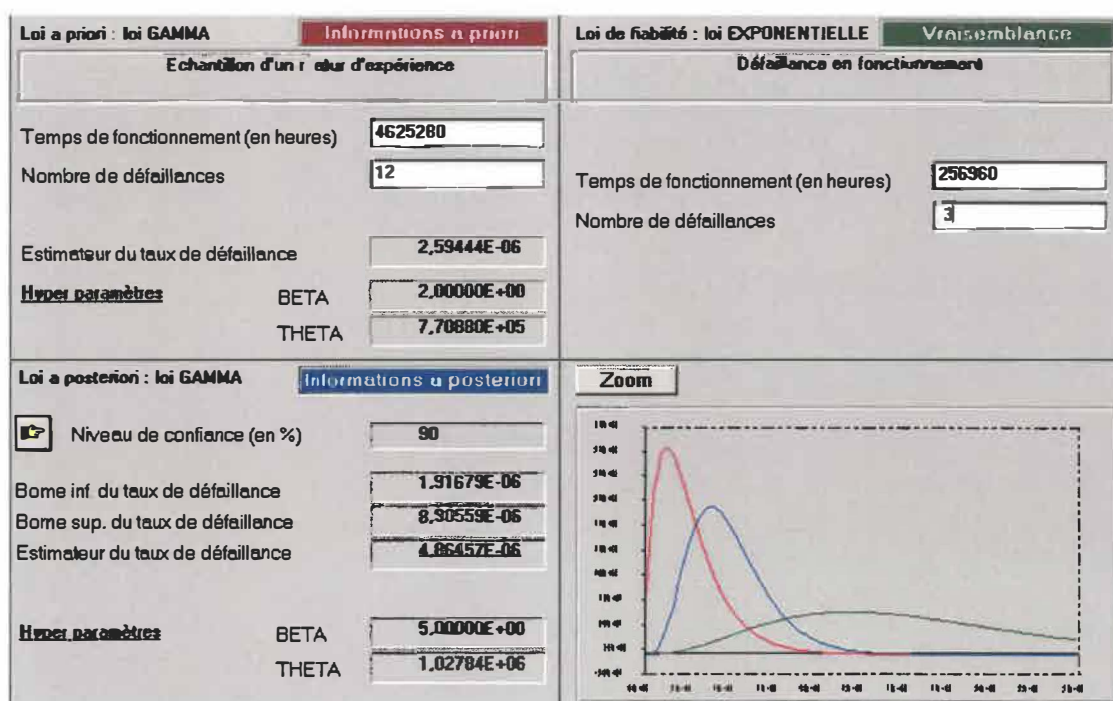


Figure 32 : Calcul Bayésien avec poids = 3 de λ pour RUC 82-04 + RTA 82-04

K.6 Probabilité de défaillance sur demande (RUC 82-04 + RTA 82-04)

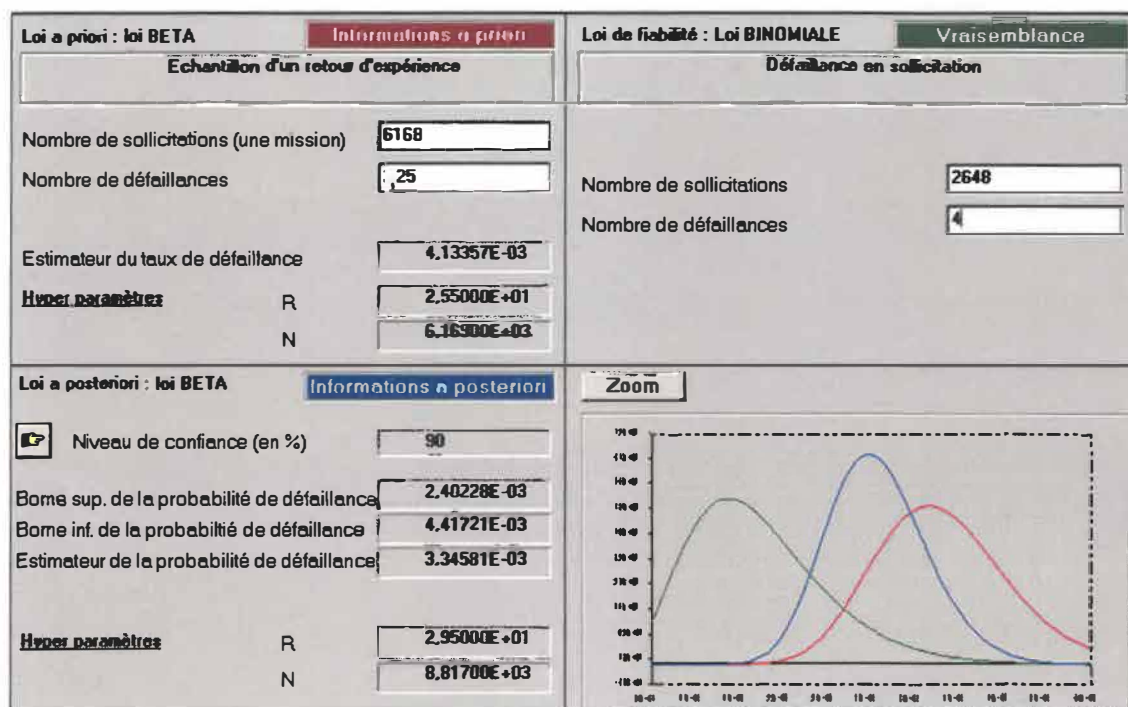


Figure 33 : Calcul Bayésien sans poids de γ pour RUC 82-04 + RTA 04-04

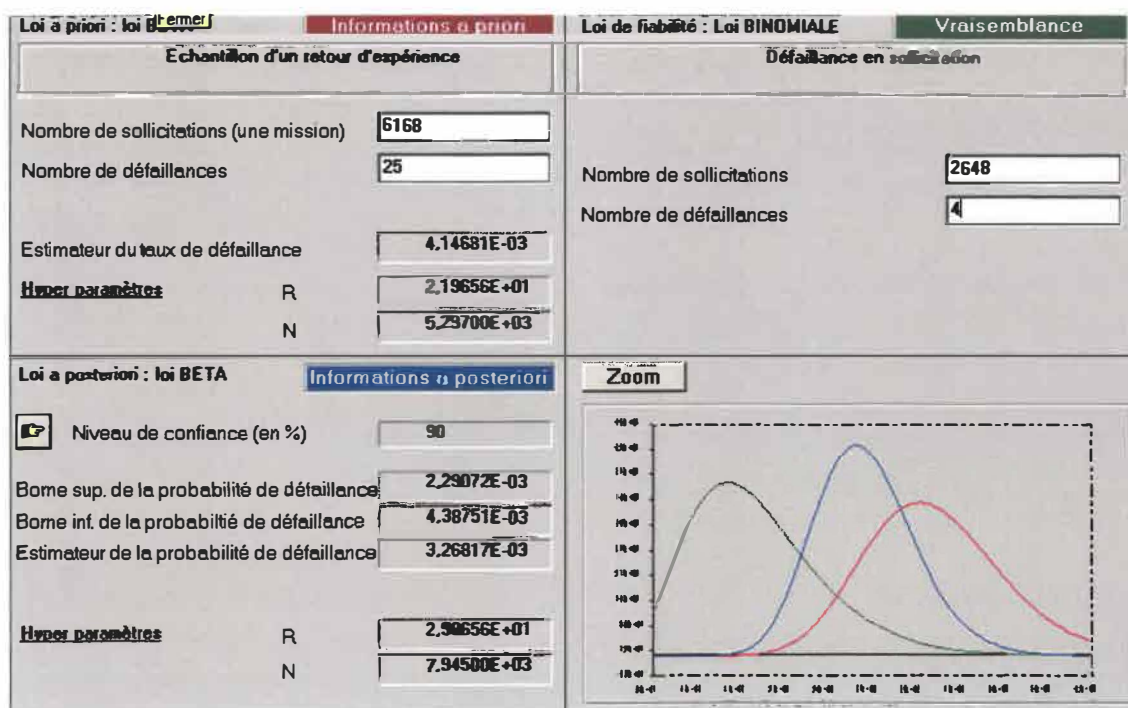


Figure 34 : Calcul Bayésien avec poids=2 de γ pour RUC 82-04 + RTA 82-04

ANNEXE L : DISTRIBUTIONS POUR L'ANALYSE DE VIEILLISSEMENT

Cet annexe présente les résultats obtenus en utilisant différentes distribution lors de l'analyse de vieillissement. Le Tableau 31 présente les données ayant servies pour tracer les différentes courbes permettant de détecter le vieillissement des équipements.

Tableau 31 : Données utilisées pour le tracé des distributions

i	t	$F(t) = i/(N+1)$	$x = LN(t)$	$y = LN(LN(1/(1-F)))$	R(t)	1/ 1-F(t)
1	2263	0,0769	7,7244	-2,5255	0,9231	1,0833
2	3153	0,1538	8,0561	-1,7898	0,8462	1,1818
3	3500	0,2308	8,1605	-1,3379	0,7692	1,3001
4	4863	0,3077	8,4894	-1,0004	0,6923	1,4445
5	5197	0,3846	8,5558	-0,7226	0,6154	1,6250
6	6686	0,4615	8,8078	-0,4797	0,5385	1,8570
7	7036	0,5385	8,8588	-0,2571	0,4615	2,1668
8	7053	0,6154	8,8612	-0,0455	0,3846	2,6001
9	7054	0,6923	8,8614	0,1644	0,3077	3,2499
10	7390	0,7692	8,9079	0,3827	0,2308	4,3328
11	7869	0,8462	8,9707	0,6271	0,1538	6,5020
12	8169	0,9231	9,0081	0,9421	0,0769	13,0039

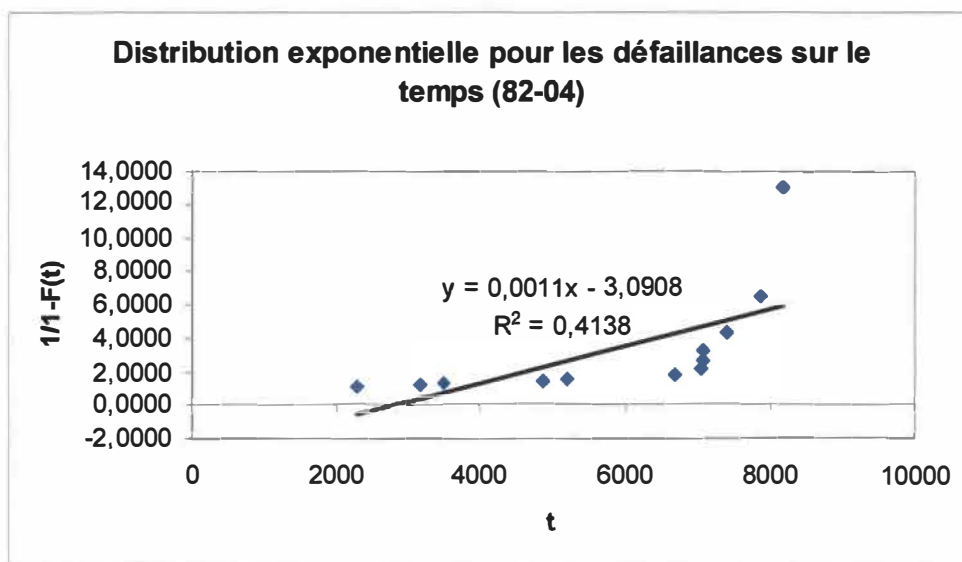


Figure 35: Distribution exponentielle

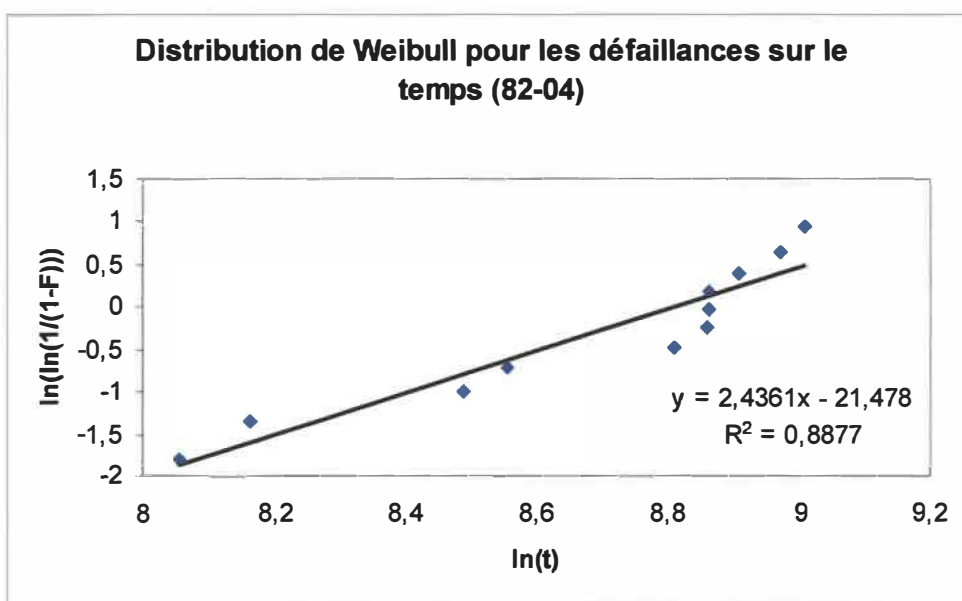


Figure 36: Distribution Weibull

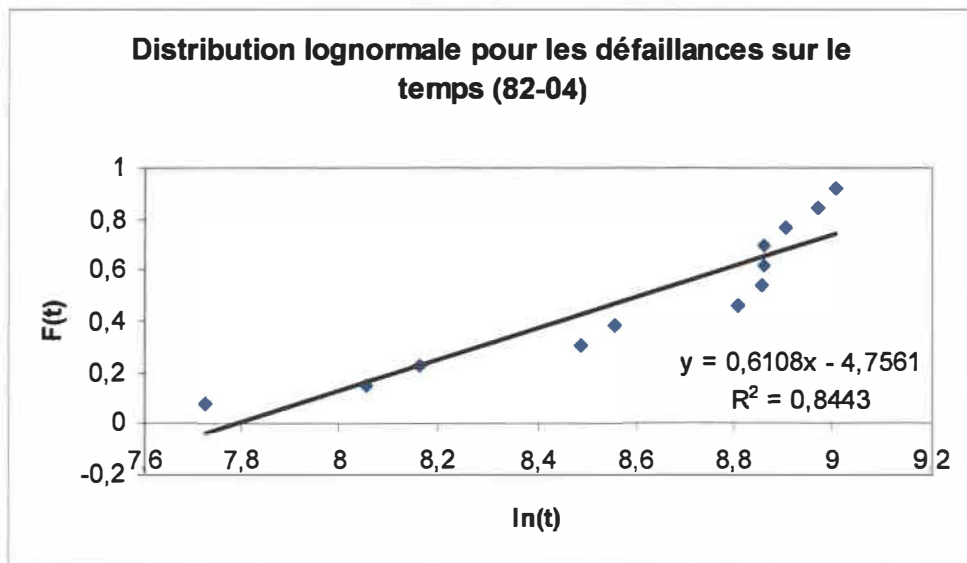


Figure 37: Distribution lognormale