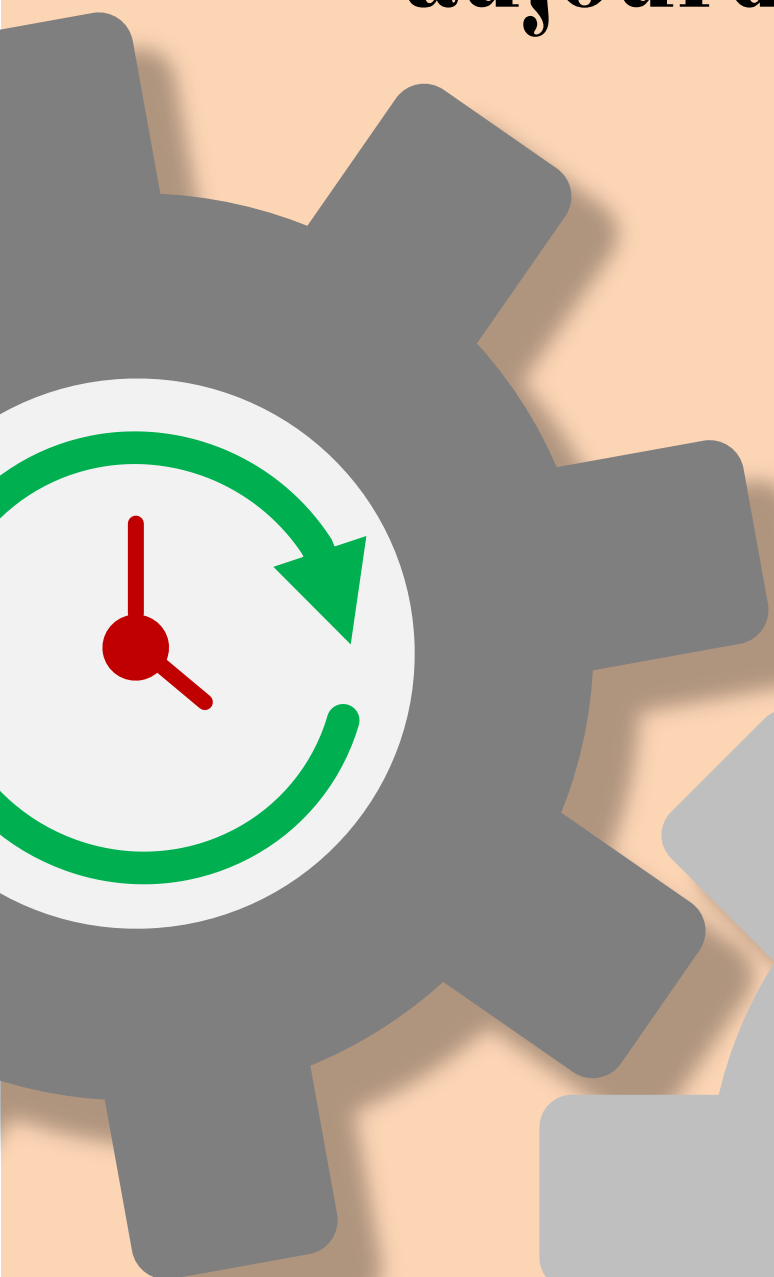


— Aurélien, Adrien et André Cabarbaye —

VERSION ENRICHIE

La fiabilité aujourd'hui

Collection
La fiabilité en pratique



CAD
Innov.

Cab Innovation Editeur

Préface

La fiabilité est aujourd'hui un enjeu majeur dans de nombreux domaines applicatifs. Fournir des produits performants dès la mise en service tout en optimisant les coûts de possession et en respectant rigoureusement les requis de sécurité nécessite l'implication et la mobilisation de nombreux métiers dans la chaîne de conception des produits. Pour répondre à ce besoin, de nombreux outils sont à disposition du fiabiliste, encore faut-il les connaître, les maîtriser, et les rendre accessibles et abordables aux différents interlocuteurs pour les faire adhérer et participer à la démarche.

Ce livre proposé par la famille Cabarbaye répond à cela en répertoriant des méthodes couvrant l'ensemble du cycle de développement d'un produit : de la phase de conception (études RAMS prévisionnelles, optimisation des systèmes, ...), en passant par la phase de tests (essais accélérés, essais aggravés, ...) pour finir par la phase d'exploitation (HUMS,...). De plus, enrichi par l'expérience et le recul d'André Cabarbaye, Expert Senior en sûreté de fonctionnement, ce recueil rappelle au lecteur l'existence et l'utilité des méthodes et concepts de base, tout en l'initiant aux méthodes plus récentes. Ainsi, il s'adresse à l'ensemble des fiabilistes et s'avère être d'une aide considérable notamment pour les néophytes.

Pour ce travail de synthèse, et l'opportunité donnée de collaborer à l'enrichissement de ce livre en échangeant avec les auteurs via la mise à disposition d'une version préliminaire, nous tenons à féliciter et à remercier l'ensemble des membres de Cab Innovation.

Maïder Estécahandy
RAM expert, Alstom Transport

Marion Soussens
RAMS Ingénieur, Alstom Transport

Avant-propos

Les produits de demain seront bien différents de ceux développés jusqu'alors. L'objectif n'est plus de concevoir un bon produit mais de proposer celui qui donne le plus de satisfaction au moindre coût durant toute sa durée d'utilisation, tout en répondant aux exigences de préservation de l'environnement et d'exploitation durable des ressources terrestres.

Habitué à gérer l'incertain, le fiabiliste occupe une place essentielle dans les équipes de conception pour répondre à ce challenge, sous réserve d'élargir son domaine de compétences.

Sa boîte à outils, qui contenait jusqu'alors quelques démarches méthodologiques et méthodes de probabilité et statistique, doit dorénavant se renforcer afin de maîtriser les dernières avancées du dimensionnement probabiliste, de l'optimisation multidisciplinaire, de l'intelligence artificielle ou du *Health Monitoring*¹.

Aussi, ce livre a pour ambition de devenir une encyclopédie de référence en fiabilité pour en améliorer les pratiques et faciliter les échanges. Il a bénéficié de l'apport de ses premiers lecteurs, dans sa version préliminaire, afin de répondre au mieux aux problématiques industrielles.

Appliqué et synthétique, il présente en 12 chapitres les différents aspects d'une science de l'ingénieur en pleine évolution.

Le lecteur trouvera tout d'abord une présentation des enjeux et la définition des concepts de la Sûreté de Fonctionnement dans le chapitre 1, puis une explication de la démarche et des différentes méthodes qualitatives utilisées pour identifier et maîtriser les risques techniques dans le chapitre 2.

Après un rappel détaillé des probabilités et statistiques dans le chapitre 3, le chapitre 4 traite de l'estimation quantitative des risques, avec divers modèles de fiabilité, d'accélération, de dégradation ou de maintenance, puis le chapitre 5 porte sur la modélisation et l'évaluation des systèmes à partir des caractéristiques de leurs constituants et des politiques de maintenance.

¹ *Health Monitoring* : suivi de l'état de santé recouvrant notamment la maintenance prédictive.

Le chapitre 6 présente les techniques de fiabilisation des systèmes au sein des différents métiers (électronique, mécanique, logiciel...) et le chapitre 7 porte sur la mise en œuvre des essais accélérés de durabilité et de fiabilité.

Les deux chapitres suivants portent sur des techniques relativement nouvelles, le Health Monitoring et la maintenance prédictive dans le chapitre 8, puis la réduction des marges par le dimensionnement probabiliste dans le chapitre 9.

Après une présentation des principes et méthodes d'optimisation, le chapitre 10 propose de les appliquer à la fiabilité, en collaboration avec les autres métiers de l'ingénierie.

Le chapitre 11 porte sur le management de la Sureté de Fonctionnement. Le lecteur y trouvera notamment un tableau récapitulatif des activités à mener en fonction du contexte de développement des projets (conception, test, exploitation).

Enfin le chapitre 12 traite de la normalisation dans les divers secteurs d'activité à risques.

Les lecteurs peuvent continuer à adresser leurs remarques et commentaires à notre éditeur (contact@cabinnovation.com) afin de contribuer à la mise à jour régulière imposée par le titre de cet ouvrage.

Par ailleurs, les cas traités dans le présent ouvrage seront explicités dans un document à paraître contenant une clé USB regroupant les fichiers EXCEL. Une version anglaise est également prévue prochainement.

Sommaire

<i>Préface</i>	7
<i>Avant-propos</i>	9
<i>Sommaire</i>	11
<i>Introduction</i>	13
<i>Chapitre 1 : Enjeux et concepts de base de la Sûreté de Fonctionnement</i> ..	19
<i>Chapitre 2 : Démarche et méthodes de la maîtrise des risques</i>	37
<i>Chapitre 3 : Probabilités et statistiques à l'usage du fiabiliste</i>	83
<i>Chapitre 4 : Estimation quantitative en Sûreté de Fonctionnement</i>	137
<i>Chapitre 5 : Evaluation de la Sûreté de Fonctionnement des systèmes</i>	183
<i>Chapitre 6 : Fiabilisation des systèmes</i>	251
<i>Chapitre 7 : Les essais de fiabilité</i>	279
<i>Chapitre 8 : Health Monitoring et maintenance prédictive</i>	317
<i>Chapitre 9 : Dimensionnement Probabiliste</i>	329
<i>Chapitre 10 : Optimisation des systèmes</i>	339
<i>Chapitre 11 : Management de la Sûreté de Fonctionnement</i>	371
<i>Chapitre 12 : Normalisation</i>	379
<i>Conclusion</i>	401
<i>Bibliographie</i>	403
<i>Table des matières</i>	407
<i>Table des illustrations</i>	425

Introduction

La maîtrise des risques recouvre l'ensemble des activités menées pour prévoir et évaluer des événements néfastes de toute nature, et pour s'en prémunir par des actions de prévention, cherchant à en diminuer l'occurrence, ou par des actions de protection, tentant d'en limiter les effets.

Cette aptitude à faire face au danger remonterait à l'origine de l'homme dont la survie a été conditionnée par sa capacité à se protéger des aléas de son environnement. Bien que cette capacité ne soit pas propre à l'espèce humaine, celle-ci a su progressivement adopter une démarche rationnelle de comportement dans l'incertain, après avoir longtemps considéré que les malheurs qui l'accablaient étaient d'origine divine.

Cette démarche renvoie aujourd'hui à une Science de l'ingénieur regroupée sous le vocable de Sûreté de Fonctionnement (SdF), enseignée dans les écoles d'ingénieurs et à l'Université, dont il est utile de préciser brièvement l'histoire avant de chercher à en approfondir les concepts.

L'Homme s'est toujours soucié de la fiabilité (aptitude d'un produit à accomplir une fonction requise pendant une certaine durée dans des conditions données) et de la sécurité (aptitude d'un produit à ne pas occasionner de dommages graves aux personnes, à l'environnement ou aux biens), probablement depuis la conception de ses premiers outils qu'il n'a cessé d'améliorer à partir d'un retour d'expériences (REX), tant issu de leur utilisation opérationnelle que des défaillances et accidents survenus.

Toutefois, les techniques de la Sûreté de Fonctionnement se sont développées tardivement par rapport aux autres techniques des sciences de l'ingénieur. Ainsi, la notion de durée de vie (pendant laquelle un produit est censé assurer sa mission) remonte au tout début de l'ère industrielle et concernait alors essentiellement des éléments mécaniques soumis à usure. La durée de vie des roulements à billes a notamment fait l'objet d'études poussées lors de l'expansion du chemin de fer.

L'apparition et le développement de l'électricité permirent de mettre en évidence l'impact de la redondance quand des ingénieurs mirent en parallèle des transformateurs et des lignes de transport afin de rendre plus fiable cette source d'énergie. Ce principe de redondance, qui consiste à mettre en œuvre plus d'un moyen pour assurer une fonction requise, augmente très significativement la fiabilité des produits en l'absence de mode commun (panne affectant simultanément plusieurs éléments en redondance) ou de panne latente (panne cachée ou non détectée d'un élément).

Ce principe de redondance fut notamment utilisé sur le Titanic, le plus grand navire de son temps qui sombra lors de sa première traversée en avril 1912. Doté d'un système de cloisonnement divisant la coque en seize compartiments plus ou moins étanches, celui-ci coula rapidement après avoir heurté un iceberg qui en éventra cinq d'affilée. Cette erreur de conception, mais également d'opération puisqu'une confiance excessive dans cette innovation fit choisir un itinéraire particulièrement dangereux contenant de nombreux blocs de glace à la dérive, entraîna la mort d'environ mille cinq cents personnes.

Le développement du transport aérien, très aléatoire à ses débuts, conduisit à imposer un recueil systématique d'informations statistiques sur la fréquence des défaillances des pannes de moteurs puis des accidents d'avions. C'est dans ce domaine que des premiers objectifs quantitatifs de fiabilité (10^{-5} par heure de vol toutes causes confondues) ont été proposés, dans des travaux publiés en 1939 et 1942 par l'*Aeronautical Research Council* de Londres.

A cette époque, la fiabilité et la sécurité étaient prises en compte de manière très intuitive à partir de la seule expérience des concepteurs. Elles relevaient plutôt d'un art que d'une technique scientifique et consistait à renforcer, parfois de manière inconsidérée, les pièces jugées critiques. Ce mode d'intervention se fondait sur un raisonnement erroné en fiabilité qui considérait que la résistance d'une chaîne était celle de son maillon le plus faible, comme dans le domaine de la résistance des matériaux (la cassure se produit sur ce maillon si on augmente progressivement la charge jusqu'à la rupture).

Les techniques de la sûreté de fonctionnement n'ont réellement émergé que durant la seconde guerre mondiale avec l'apparition de systèmes complexes assemblant un grand nombre de composants, notamment en Allemagne lors du développement des premiers missiles V1 et V2 (constitués de 2000 composants environ). Après de très nombreux échecs, une question s'imposait alors aux ingénieurs : est-il possible de prévoir et garantir la fiabilité d'un système lors de la conception et comment la mesurer ?

Fondée sur la notion de probabilité de défaillance, une mesure de fiabilité relative à une mission donnée fut alors proposée ainsi qu'un premier modèle de prévision permettant d'appréhender la fiabilité d'un système à partir de celle de ses composants élémentaires. La fiabilité d'une chaîne constituée d'éléments en série n'était plus alors égale à celle de son maillon faible mais au produit des fiabilités de tous ses éléments. La connaissance de ces dernières était généralement insuffisante pour obtenir une évaluation précise, mais il était enfin compris que la fiabilité des éléments devait être beaucoup plus élevée que la fiabilité attendue du système.

Cette nouvelle approche de la fiabilité fut reprise après la guerre aux Etats-Unis où un effort particulier d'amélioration de la qualité était mené, tant sur le plan de la conception des produits, par l'utilisation de matériels plus résistants et mieux adaptés, que de la vérification par des contrôles plus rigoureux. Cette évolution marquée notamment par l'instauration du contrôle-qualité fut à l'origine d'une très nette amélioration de la fiabilité des matériels à cette époque.

Cependant, la complexité croissante des matériels contraignit les ingénieurs à laisser le moins de place possible au hasard comme l'illustre la « loi de Murphy », exprimée par un ingénieur de l'aéronautique en 1949 : « *Si un ennui a la moindre chance de se produire, dites-vous qu'il se produira !* ». Les techniques de Sûreté de fonctionnement se développèrent alors rapidement outre-Atlantique en cherchant non seulement à répondre à des besoins de fiabilité et de sécurité mais aussi de disponibilité (aptitude d'un produit à accomplir une fonction requise à un instant donné) et de maintenabilité (aptitude d'un produit à être maintenu ou réparé). En effet, la disponibilité de matériels incorporant de plus en plus de composants s'avérait faible et les coûts de maintenance avaient tendance à exploser en raison de l'importance des équipes de réparation nécessaires et des niveaux de qualification requis. Ainsi, des études du *Department of Defense* montrèrent à cette époque que certains équipements de la marine n'étaient opérationnels qu'à 30 % du temps, et qu'il fallait dépenser chaque année deux dollars pour maintenir en état de fonctionner l'équivalent d'un dollar d'équipement électronique.

La complexification des matériels étant inéluctable pour répondre à des besoins toujours croissants, il apparut alors nécessaire de concevoir des équipements intrinsèquement fiables et d'améliorer significativement leur maintenabilité au sein des différents systèmes. Le *Department of Defense* imposa alors que la sûreté de fonctionnement soit considérée comme partie intégrante du cycle du développement de ses équipements, en particulier ceux qui comprenaient des composants électroniques. Une exigence de fiabilité fut systématiquement introduite dans les spécifications des produits, notamment sous la forme d'un MTTF minimum requis (*Mean Time To Failure* : durée moyenne avant la première défaillance), qui devait faire l'objet d'une démonstration selon des méthodes imposées par des normes. Un test en environnement sévère (incluant des hautes et basses températures, des vibrations et des chocs) fut également imposé à tous les nouveaux équipements afin de découvrir et corriger leurs points faibles avant le lancement de leur production en série. Une importance croissante fut également attachée aux problèmes de sécurité, tout particulièrement dans l'aéronautique et le nucléaire, et des efforts furent entrepris pour comprendre et se prémunir des erreurs humaines qui contribuaient assez largement aux défaillances des systèmes. Par analogie avec la fiabilité des composants, des estimations quantitatives de performances humaines furent

effectuées à cette époque même si elles se révélèrent rapidement sujettes à caution.

Les années 1960 connurent l'émergence de nouvelles techniques d'identification des risques suivant des démarches déductives (Arbre de Causes) ou inductive (AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité) qui donnèrent lieu à l'adoption de diverses normes internationales. Leur utilisation par la NASA fut considérée comme l'une des clefs du succès du programme Apollo, en ayant permis de maîtriser des risques a priori mal connus.

Durant les années soixante-dix, de gros efforts furent menés pour évaluer les risques encourus par les populations au voisinage des installations nucléaires, en considérant de très nombreux scénarios d'accidents liés à des défaillances de matériels ou à des erreurs d'opérateurs de conduite ou de maintenance. La probabilité annuelle de décès parmi les populations environnantes, à la suite à un accident conduisant à une dispersion de produits radioactifs, fut, dans un premier temps, estimée inférieure à celle due à des chutes de météorites. Mais ces résultats furent rapidement mis en doute avant que ne survienne l'accident de la centrale nucléaire de Three Miles Island qui, bien que ne faisant pas de victime, suscita une très vive émotion. Cet accident mis notamment en évidence l'importance des facteurs humains qui s'avèrent, à l'expérience, difficilement quantifiables car très dépendants des situations et des conditions environnementales et notamment de l'importance du stress subi par les individus. C'est également au cours des années soixante-dix que furent effectués les premiers travaux sur la fiabilité des logiciels, qui ont pris depuis une place prépondérante dans le contrôle des systèmes. Cette fiabilité est également difficilement quantifiable, en raison de la diversité des erreurs possibles et du caractère souvent indéterministe de leurs effets.

Depuis cette période, les techniques de sûreté de fonctionnement se sont largement diffusées dans les diverses branches industrielles telles que les transports ferroviaires, l'industrie automobile, la chimie, le domaine pétrolier et investissent aujourd'hui de nouveaux secteurs tels que la santé, l'agroalimentaire et le traitement des eaux. La Sûreté de Fonctionnement est ainsi devenue une véritable science de l'ingénieur avec ses concepts, ses mesures, ses méthodes et outils au sein d'une discipline transverse recouvrant certes des techniques de calculs probabilistes, mais aussi des démarches qualitatives d'identification et de maîtrise des risques de toute nature.

Cependant, dans une société qui n'accepte plus la fatalité et est régie par le principe de précaution, la quête du risque zéro s'avère vouée à l'échec, car celui-ci n'existe pas. Aussi, les techniques de maîtrise de risques peuvent-elles décevoir, notamment quand leur application s'avère douteuse.

L'explosion de la navette Challenger, la catastrophe de Tchernobyl et plus récemment celle de Fukushima constituent autant d'événements qui ont marqué l'opinion publique et engendré de la méfiance à l'égard des systèmes à risques, d'autant qu'un discours volontariste rempli de certitudes sur leur supposée maîtrise a trop souvent été entendu.

En dépit de ses limitations, la Sûreté de Fonctionnement reste une science vivante avec ses colloques et congrès qui révèlent régulièrement des pistes d'amélioration fructueuses et d'optimisation des systèmes contraints par des exigences de Sûreté de Fonctionnement. Parmi celles-ci, notons l'optimisation multidisciplinaire, le dimensionnement probabiliste, la planification optimale des essais ou le Health Monitoring (aide à la décision à partir de l'observation de l'état des systèmes dont notamment la maintenance prédictive) qui sont développés dans le présent ouvrage.

Par ailleurs, de nouveaux produits dotés d'intelligence artificielle nous promettent un avenir radieux. La voiture autonome, les drones, la surveillance et le contrôle automatisé dans de multiples domaines (médical, sécurité, etc.) ne peuvent être réellement bénéfiques que si leur Sûreté de Fonctionnement est parfaitement maîtrisée.

Enfin, l'épidémie de covid-19 est riche d'enseignement pour notre discipline. Outre le manque de résilience de nos sociétés, cette crise sanitaire révèle combien il est difficile d'improviser une réponse rationnelle quand survient l'imprévu. Cette difficulté est de plus renforcée quand des préconisations douteuses et des prévisions incertaines sur les effets de la crise génèrent une grande situation de stress.

Table des matières

Préface	7
Avant-propos	9
Sommaire	11
Introduction	13
Chapitre 1 : Enjeux et concepts de base de la Sûreté de Fonctionnement ..	19
1. Définition et enjeux.....	19
1. 1. Fiabilité	20
1. 2. Maintenabilité	20
1. 3. Disponibilité.....	21
1. 4. Testabilité.....	21
1. 5. Sécurité.....	22
1. 6. Durée de vie	22
1. 7. Durabilité	23
2. Les concepts de base	23
2. 1. Risque	23
2. 2. Notion de système.....	24
2.2.1. Limites	24
2.2.2. Fonctions	25
2.2.3. Structure.....	25
2.2.4. Conditions de fonctionnement	26
2.2.5. Conditions d'exploitation	26
2.2.6. Environnement.....	26
2.2.7. Soutien logistique intégré (SLI)	27
2. 3. Dysfonctionnement	27
2.3.1. Défaillance.....	27
2.3.2. Panne.....	28
2.3.3. Modes de panne	28
2.3.4. Taux de panne	29
2.3.5. Faute.....	29
2.3.6. Erreur.....	29
2.3.7. Défaut.....	29
2.3.8. Causes de panne	30
2.3.9. Effets.....	30
2.3.10. Scénario de défaillance	31

2. 4.	Réparation	31
2.4.1.	Maintenance corrective	32
2.4.2.	Maintenance curative	32
2.4.3.	Maintenance palliative.....	32
2.4.4.	Maintenance préventive	32
2.4.5.	Maintenance prévisionnelle ou prédictive	33
2.4.6.	Niveau de maintenance	33
2. 5.	Modèle conceptuel.....	34
2.5.1.	Modèles utilisés en Sûreté de fonctionnement	34
2.5.2.	Caractéristique des modèles.....	36
2.5.3.	Validation des modèle.....	36

Chapitre 2 : Démarche et méthodes de la maîtrise des risques 37

1.	Démarche générale de la maîtrise des risques	38
1. 1.	Démarche générale	38
1. 2.	Traitement des risques	39
1. 3.	Classification des risques.....	39
1. 4.	Identification des risques	42
1.4.1.	Retour d'Expérience (REX)	42
1.4.2.	Démarche déductive	43
1.4.3.	Démarche inductive	44
2.	Méthodes d'identification et de maîtrise des risques.....	45
2. 1.	Analyse Fonctionnelle	46
2.1.1.	Analyse Fonctionnelle Externe.....	46
2.1.2.	Analyse Fonctionnelle Interne	49
2. 2.	Analyse préliminaire des risques.....	51
2.2.1.	Décomposition fonctionnelle.....	51
2.2.2.	Décomposition en phases	53
2.2.3.	Décomposition en activités.....	53
2.2.4.	Mise en œuvre	53
2.2.5.	Avantages et limites	55
2. 3.	Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et criticité ...	56
2.3.1.	Principe	56
2.3.2.	Mise en œuvre	58
2.3.3.	Avantages et limites	61
2. 4.	Méthode de représentation arborescente.....	61
2.4.1.	Arbre de fautes.....	62
2.4.2.	Arbre des causes	66
2.4.3.	Arbre des conséquences	68
2. 5.	Analyse des dangers	69

2.5.1.	Etude de dangers des installations industrielles.....	71
2.5.2.	Etude de dangers relatifs à un produit.....	72
2.5.3.	Hazard and operability study (HAZOP).....	74
2.5.4.	Analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise....	75
2. 6.	Analyse de modes communs et de causes communes	76
2. 7.	Analyse d'interaction logicielle matérielle (HSIA)	77
2. 8.	Analyse de zone.....	77
2. 9.	Analyse du facteur humain.....	78
2. 10.	Analyse des contraintes.....	78
2. 11.	Analyse pire cas	79
2. 12.	Règles de conception.....	81

Chapitre 3 : Probabilités et statistiques à l'usage du fiabiliste 83

1.	Notions théoriques de base	83
1. 1.	Définitions et logique probabiliste	83
1.1.1.	Dénombrément.....	83
1.1.2.	Probabilité	84
1.1.3.	Opérations logiques	84
1.1.4.	Théorème des probabilités totales	86
1.1.5.	Théorème de Bayes.....	86
1.1.6.	Théorème de Bayes généralisé	87
1. 2.	Probabilité et statistique	88
1.2.1.	Variable aléatoire	88
1.2.2.	Espérance mathématique	89
1.2.3.	Variance, écart-type et moments	89
1.2.4.	Quantile.....	90
1.2.5.	Corrélation	91
1.2.6.	Loi de probabilité	93
1. 3.	Caractérisation de la fiabilité.....	94
1.3.1.	Fonction de survie.....	94
1.3.2.	Taux de défaillance.....	94
1.3.3.	Modèles non paramétriques.....	96
1.3.3.1.	Méthode des rangs.....	96
1.3.3.2.	Méthode de Kaplan Meier	97
1.3.4.	Lois de probabilité utilisées en fiabilité.....	98
1.3.4.1.	Loi de Bernoulli.....	98
1.3.4.2.	Loi Binomiale	98
1.3.4.3.	Loi de Poisson	98
1.3.4.4.	Loi exponentielle	99
1.3.4.5.	Loi de Weibull.....	99

1.3.4.6.	Loi normale (Laplace-Gauss)	100
1.3.4.7.	Loi normale centrée réduite.....	101
1.3.4.8.	Loi log-normale (Galton)	101
1.3.4.9.	Loi Gamma	101
1.3.4.10.	Loi du Khi-deux (Pearson).....	102
1.3.4.11.	Loi Bêta.....	103
2.	Estimation.....	103
2.1.	Intervalle de confiance	103
2.1.1.	Intervalle de confiance d'une valeur moyenne.....	104
2.1.1.	Intervalle de confiance de la variance ou de l'écart-type	105
2.1.2.	Intervalle de confiance d'une probabilité de défaillance.....	106
2.1.3.	Intervalle de confiance d'un taux de défaillance	107
2.1.4.	Estimation d'un quantile	108
2.1.5.	Méthode du Bootstrap.....	109
2.2.	Ajustement	110
2.2.1.	Méthode des moindres carrés	110
2.2.2.	Méthode des moments.....	111
2.2.3.	Ajustement graphique.....	111
2.2.4.	Maximum de vraisemblance	112
2.2.5.	Ajustement et intervalle de confiance	114
2.2.6.	Précision d'un ajustement.....	116
2.2.7.	Adéquation et test statistique.....	117
2.2.7.1.	Test du χ^2 (khi-deux) de Pearson	118
2.2.7.2.	Test de Kolmogorov-Smirnov.....	119
2.2.7.3.	Test de Cramer-Von Mises	119
3.	Simulation de Monte-Carlo	120
3.1.	Principe.....	120
3.2.	Simulation d'une variable aléatoire.....	121
3.3.	Précision des résultats.....	122
3.4.	Techniques de réduction de variance.....	124
3.4.1.	Echantillonnage stratifié.....	124
3.4.2.	Echantillonnage d'importance	126
4.	Inférence bayésienne	127
4.1.	Démarche fréquentielle et bayésienne	127
4.2.	Lois conjuguées	128
4.3.	Lois quelconques	131
5.	Théorie des valeurs extrêmes	132
5.1.	Analyse des maxima par intervalles	133

5. 2.	Analyse des valeurs au-dessus d'un seuil.....	134
Chapitre 4 : Estimation quantitative en Sûreté de Fonctionnement		137
1.	Du bon usage des évaluations quantitatives.....	137
2.	Caractéristiques de fonctionnement des systèmes	138
2. 1.	Systèmes réparables et non réparables	139
2. 2.	Taux de risque instantané.....	139
2. 3.	Durées caractéristiques	140
2. 4.	Probabilités caractéristiques liées à la sécurité.....	141
3.	Modèles de fiabilité.....	142
3. 1.	Composant élémentaire	143
3. 2.	Composant à plusieurs modes de panne	143
3. 3.	Méthode Contrainte / Résistance	145
3. 4.	Estimation d'un taux de risque instantané.....	147
3.4.1.	Exploitation d'un retour d'expérience.....	147
3.4.2.	Recueils de données de fiabilité	148
3.4.2.1.	Norme MIL-HDBK 217	148
3.4.2.2.	FIDES.....	149
3.4.2.3.	Recueil de fiabilité en mécanique	151
3.4.3.	Prise en compte d'une connaissance a priori	151
3. 5.	Fiabilité des logiciels.....	153
3. 6.	Modèles de croissance de fiabilité	155
4.	Modèles d'accélération	157
4. 1.	Modèles Standard de Vie Accélérée (SVA)	157
4. 2.	Lois d'accélération	159
4.2.1.	Loi d'Arrhenius (thermique)	159
4.2.2.	Loi de Norris Landzberg (cyclage thermique)	160
4.2.3.	Loi de Peck (humidité).....	161
4.2.4.	Loi de Basquin (vibration)	162
4.2.5.	Loi d'Eyring (thermoélectrique)	163
4.2.6.	E-model (panne de diélectrique)	163
4.2.7.	Modèle d'accélération lié aux rayons cosmiques	164
4. 3.	Lois d'accélération et mécanismes de défaillance	164
4. 4.	Prise en compte de stress variables (principe de Sedyakin)	166
4. 5.	Autres modèles d'accélération	167
4. 6.	Ajustement d'un modèle de fiabilité accéléré	168
5.	Modèle de dégradation	169
5. 1.	Dégradation croissante monotone (processus Gamma).....	171
5. 2.	Dégradation non monotone (processus de Wiener).....	174

5. 3.	Modèle à dégradation instantanée (choc)	177
6.	Modèles de maintenance	177
6. 1.	Processus de remplacement RP	178
6. 2.	Processus non homogène de Poisson NHPP	179
6. 3.	Processus de remplacement généralisé GRP	180
Chapitre 5 : Evaluation de la Sûreté de Fonctionnement des systèmes....		183
1.	Les différentes méthodes de modélisation et de traitement	183
2.	Modélisation statique des systèmes	185
2. 1.	Bloc Diagramme de Fiabilité.....	185
2.1.1.	Représentation et méthode de calcul	185
2.1.2.	Types et effets des redondances.....	187
2.1.3.	Application du théorème des probabilités totales.....	190
2.1.4.	Erreurs à éviter	192
2.1.5.	Avantages et limites du Bloc Diagramme de Fiabilité	194
2. 2.	Arbre de Fautes	195
2.2.1.	Représentation	196
2.2.2.	Traitements	197
2.2.2.1.	Coupes minimales	197
2.2.2.2.	Probabilité	197
2.2.2.3.	Facteurs d'importance	197
2.2.3.	Démarche d'élaboration des arbres.....	199
2.2.4.	Erreurs à éviter	201
2.2.5.	Avantages et limites de l'arbre de fautes	202
2. 3.	Estimation de la disponibilité opérationnelle	203
2.3.1.	Probabilité de rupture d'un stock de rechange	203
2.3.2.	Disponibilité d'un équipement avec rechanges	204
2.3.3.	Disponibilité opérationnelle d'un système	206
2.3.4.	Prise en compte d'une chronologie	206
3.	Modélisation dynamique des systèmes	207
3. 1.	Modélisation markovienne.....	207
3.1.1.	Graphe et matrice de Markov	208
3.1.2.	Traitement Markovien.....	211
3.1.3.	Démarche d'élaboration des modèles markoviens.....	213
3.1.4.	Exemples d'application.....	214
3.1.5.	Avantages et limites de la modélisation markovienne	218
3.1.6.	Méthodes palliatives	218
3.1.6.1.	Méthode des états fictifs.....	219
3.1.6.2.	Couplage entre modèles markovien et arbre de fautes..	222

3.1.6.3.	Génération automatique de modèles	222
3.1.6.4.	Traitement par phase.....	224
3.1.7.	Domaine d'emploi de la modélisation markovienne	225
3.1.8.	Autres membres de la famille Markovienne.....	227
3.1.8.1.	Processus de Décision Markovien (MDP).....	227
3.1.8.2.	Modèles de Markov Caché (MMC)	227
3.1.8.3.	Processus de décision partiellement observable.....	228
3.1.8.4.	Processus de Markov déterministes par morceaux	229
3.2.	Modélisation associée à la simulation	229
3.2.1.	Simulation des systèmes non réparables.....	230
3.3.	Simulation des systèmes réparables	233
3.3.1.	Simulation des modèles markoviens	234
3.3.2.	Réseaux de Petri stochastiques.....	234
3.3.3.	Modèle de simulation récursive.....	238
3.4.	Maîtrise de la complexité	242
4.	Autres méthodes de modélisation	245
4.1.	Modélisation basée sur un langage.....	245
4.2.	Réseaux bayésiens.....	246
4.2.1.	Dépendances entre les variables	247
4.2.2.	Calcul de probabilité	248
4.2.3.	Apprentissage automatique.....	250
Chapitre 6 : Fiabilisation des systèmes.....		251
1.	Principes généraux de fiabilisation des systèmes.....	251
1.1.	Robustesse.....	252
1.2.	Résilience.....	253
1.3.	Intégration	254
1.4.	Redondance.....	255
1.5.	Ségrégation.....	256
1.6.	Dissimilarité	257
1.7.	Criticité	257
1.8.	Testabilité.....	258
1.9.	Observabilité	258
2.	Fiabilisation au sein des différents métiers.....	258
2.1.	Electronique	258
2.1.1.	Composants discrets	258
2.1.2.	Composants intégrés.....	259
2.1.3.	Processeurs	259
2.1.3.1.	Chien de garde.....	259

2.1.3.2.	Dérive d'horloge.....	260
2.1.3.3.	Altération des données	260
2. 2.	Logiciel.....	261
2. 3.	Mécanique.....	265
2.3.1.	Exploitation du retour d'expérience.....	266
2.3.2.	Méthodes « constructeurs » ou normalisées	266
2.3.3.	Méthode Résistance/contrainte.....	267
2.3.4.	Modélisation des phénomènes de dégradation	268
2.3.4.1.	Modèles physiques de dégradation	269
2.3.4.2.	Modèles descriptifs de dégradation.....	270
2. 4.	Facteur humain.....	271
2. 5.	Sûreté et Sécurité	274
2. 6.	Systèmes autonomes.....	276
Chapitre 7 : Les essais de fiabilité		279
1.	Les différents types d'essais.....	280
1. 1.	Essais accélérés.....	280
1. 2.	Essais aggravés (HALT).....	280
1. 3.	Essais de déverminage (HASS).....	281
1. 4.	Essais d'endurance	281
1. 5.	Essais de fiabilité	281
2.	Conditions d'essais	282
2. 1.	Testabilité des produits.....	282
2. 2.	Conditions d'accélération des essais	283
3.	Mise en œuvre des essais accélérés	284
3. 1.	Questions préalables à se poser avant les essais	284
3. 2.	Du composant au produit.....	285
3. 3.	Du profil de vie aux conditions d'essais.....	286
3. 4.	Processus de mise en œuvre	288
3.4.1.	En l'absence de phénomène d'usure	289
3.4.2.	En présence de phénomène d'usure	290
3.4.3.	Avec des facteurs d'accélération inconnus	291
3. 5.	Stratégies d'évolution des stress en essais.....	292
3. 6.	Exploitation de données hétérogènes.....	293
3.6.1.	Cas d'un modèle de fiabilité.....	293
3.6.2.	Cas d'un modèle de dégradation	294
3. 7.	Démonstration de la tenue d'un objectif de fiabilité	296
3.7.1.	Cartes électroniques	297
3.7.2.	Equipements mécaniques	300

4. Dimensionnement optimal des essais	302
4.1. Dimensionnement avant essais.....	303
4.2. Planification durant les essais	304
4.2.1. D-Optimalité.....	305
4.2.2. Méthode Caboum	308
4.3. Optimisation globale d'une campagne d'essais	309
5. Système mono coup	309
5.1. Traitement des résultats d'essais.....	310
5.2. Les différents types d'essais	311
5.2.1. Méthode One-shot.....	311
5.2.2. Méthode Bruceton	311
5.2.3. Méthode des Probits.....	312
5.2.4. Méthode Neyer	312
5.2.5. Méthode Caboum	313
5.3. Méthode des essais durcis	314
Chapitre 8 : Health Monitoring et maintenance prédictive	317
1. Enjeux.....	317
2. Concepts et méthodes.....	319
2.1. Health Monitoring et prise de décision.....	319
2.2. Diagnostic	321
2.3. Pronostic.....	323
2.3.1. Potentiel restant d'un produit.....	323
2.3.2. Fiabilité en ligne d'un système	326
3. Démarche de mise en œuvre des HUMS.....	326
Chapitre 9 : Dimensionnement Probabiliste	329
1. Dimensionnement pire cas	329
2. Propagation des incertitude.....	331
3. Méthodes FORM – SORM	333
4. Dimensionnement probabiliste.....	336
Chapitre 10 : Optimisation des systèmes.....	339
1. Principe et méthodes d'optimisation	340
1.1. Concepts de base.....	340
1.1.1. Optimisation paramétrique.....	340
1.1.2. Formulation d'un problème d'optimisation	341
1.1.3. Exemple d'application	342

1. 2.	Méthodes d'optimisation	343
1.2.1.	Bref panorama des méthodes utilisées	344
1.2.2.	Algorithme de Nelder-Mead	346
1.2.3.	Algorithmes génétiques	347
1. 3.	Plans d'expériences	350
1.3.1.	Exploitation des résultats d'essais.....	350
1.3.1.1.	Modèle linéaire	351
1.3.1.2.	Modèle non linéaire	352
1.3.2.	Planification optimale des plans d'expériences	353
1.3.2.1.	D-Optimalité	353
1.3.2.2.	Méthode Caboum	354
1.3.2.3.	<i>Distribution homogène des conditions d'essais</i>	355
1. 4.	Optimisation robuste.....	355
2.	Optimisation vis-à-vis de la Sûreté de Fonctionnement	358
2. 1.	Processus d'Allocation	359
2.1.1.	Iso-fiabilité.....	359
2.1.2.	Méthodes des poids.....	359
2.1.3.	Méthode de l'AGREE	359
2.1.4.	Exploitation du REX.....	360
2. 2.	Analyse de sensibilité	360
2. 3.	Couplage entre modèle d'évaluation et outils d'optimisation	361
3.	Optimisation multidisciplinaire	363
3. 1.	Méthodes mono et multiniveaux	364
3.1.1.	Méthode MDF (Multidisciplinary Feasible Design).....	364
3.1.2.	Méthode IDF (<i>Individual discipline Feasible</i>)	365
3.1.3.	Méthode CO (<i>Collaborative optimization</i>).....	365
3.1.4.	Autres méthodes de MDO	366
3. 2.	Optimisation locale par la méthode du gradient	367
3. 3.	Optimisation globale	369
Chapitre 11 : Management de la Sûreté de Fonctionnement		371
1.	Exigences de Sûreté de Fonctionnement	371
1. 1.	Performances de Sûreté de Fonctionnement	371
1. 2.	Organisation en Sûreté de Fonctionnement	373
1. 3.	Fournitures / Échéancier	373
1. 4.	Méthodes et outils imposés	373
2.	Matrice de conformité.....	373
3.	Plan de Sûreté de Fonctionnement	374

4. Format des analyses de Sûreté de Fonctionnement	375
5. Phasage des analyses dans le cycle de vie.....	376
Chapitre 12 : Normalisation	379
1. Sécurité fonctionnelle.....	379
1.1. Norme 61508.....	380
1.2. Normes déclinées de la 61508	384
2. Domaine spatial	385
2.1. Spécificité du domaine spatial.....	385
2.2. Normes ECSS.....	386
3. Domaine aéronautique.....	388
3.1. Aéronefs avec personnes à bord	388
3.2. Drones	391
3.2.1. Réglementation des drones	392
3.2.2. Méthode SORA (Specific Operation Risk Assessment)	393
4. Domaine de la santé.....	398
Conclusion	401
Bibliographie	403
Table des matières	407
Table des illustrations.....	425

La fiabilité aujourd'hui

Habitué à gérer l'aléa, le fiabiliste occupe une place privilégiée dans les équipes d'ingénierie pour concevoir les produits de demain :

- l'engagement de fiabilité s'exerce sur la durée d'exploitation et non plus sur une période de garantie,
- le service remplace progressivement la fourniture de produits,
- le Health Monitoring (maintenance prédictive) est exigée par les opérateurs de systèmes,
- la préservation de l'environnement et l'exploitation durable des ressources terrestres sont devenues incontournables.

L'objectif n'est plus de proposer un bon produit mais de concevoir le meilleur, sans inutiles marges cachées, au moyen de l'optimisation multidisciplinaire et du dimensionnement probabiliste.

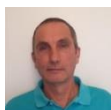
Présentant en 12 chapitres les différents aspects d'une science de l'ingénieur en pleine (r)évolution, cet ouvrage encyclopédique devrait contribuer à bâtir une industrie plus sûre, plus verte et plus économe.



Docteur ingénieur en aéronautique, Aurélien Cabarbaye a développé différents drones de type avion, hélicoptère et convertible au moyen d'outils d'optimisation hybrides et en assure la certification.



Ingénieur en informatique et électronique, Adrien Cabarbaye est responsable d'un projet de R&D en optimisation multidisciplinaire (Gencab Indra).



Expert sénior en Sécurité de fonctionnement, André Cabarbaye a rédigé de nombreux articles scientifiques durant son activité au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES).

VERSION ENRICHIE PAR :

ALSTOM

ISBN : 979-10-97287-12-2



9 791097 287122

Prix : 135 € TTC