SRD sciences du risque et du danger
collection dirigée par Franck Guarnieri
directeur du Centre de recherche sur les Risques et les Crises (CRC), Mines ParisTech / ARMINES
série Références

Fiabilité et maintenance des matériels industriels réparables et non réparables

Henri Procaccia • Éric Ferton
Marc Procaccia

Editions TEC & DOC

Lavoisier

SRD sciences du risque et du danger
collection dirigée par Franck Guarnieri
directeur du Centre de recherche sur les Risques et les Crises (CRC), Mines ParisTech / ARMINES
série Références

Fiabilité et maintenance des matériels industriels réparables et non réparables

Henri Procaccia
Directeur et Membre d'honneur de l'European Safety Reliability and Data Association (ESReDA)
Membre de l'Institut pour la maîtrise des risques et la sûreté de fonctionnement, IMdR-SdF

Éric Ferton
Professeur ENSAM à l'Université du Littoral
Membre de l'Institut pour la maîtrise des risques et la sûreté de fonctionnement, IMdR-SdF

Marc Procaccia
Directeur de la Société Siadcom 1, Systèmes d'information et d'aide à la décision et à la communication

Préface

André Lannoy
Vice-président de l'Institut pour la maîtrise des risques et la sûreté de fonctionnement, IMdR-SdF
Membre d'honneur de l'European Safety Reliability and Data Association (ESReDA)

Editions TEC & DOC
11, rue Lavoisier
75008 Paris

Dans la même collection

série « Notes de synthèse et de recherche »

Le concept de risque. De l'épistémologie à l'éthique
C. Kermisch, 2011

Le cadre juridique de la gestion des pollutions et des risques industriels
V. Sansévérino-Godfrin, 2010

Modélisation dynamique des systèmes industriels à risques
E. Garbolino, J.-P. Chéry, F. Guarnieri, 2010

Introduction à la sécurité économique
G. Pardini, 2009

Retour d'expérience et maîtrise des risques – Pratiques et méthodes de mise en œuvre
J.-L. Wybo, W. Van Wassenhove, 2009

Cadre juridique de la prévention et de la réparation des risques professionnels
P. Malingrey, 2009

Pratiques de prévention des risques professionnels dans les PME
C. Martin, F. Guarnieri, 2008

Maîtriser les défaillances des organisations en santé et sécurité du travail – La méthode TRIPOD
J. Cambon, F. Guarnieri, 2008

Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement : repères historiques et méthodologiques
A. Lannoy, 2008

La défense en profondeur – Contribution de la sûreté nucléaire à la sécurité industrielle
E. Garbolino, 2008

Le cadre juridique de la gestion des risques naturels
V. Sansévérino-Godfrin, 2008

Les plans de prévention des risques : la prévention des risques majeurs par la maîtrise de l'usage des sols
G. Rasse, 2008

Risques et enjeux de l'interaction sociale
J.-M. Stébé, 2008

Retour d'expérience et prévention des risques – Principes et méthodes
W. Van Wassenhove, E. Garbolino, 2008

série « Références »

Ingénieries et sciences humaines. La prévention des risques en dispute
D. Pécaud, 2010

La psychologie du risque
J.-P. Assailly, 2010

La ville au risque du ghetto
H. Marchal, J.-M. Stébé, 2010

Aide à la décision et expertise en gestion des risques
M. Merad, 2010

Traité du risque chimique
N. Margossian, 2010

Risque environnemental et action collective. Application aux risques industriels et d'érosion côtière dans le Pas-de-Calais
O. Petit, V. Herbert, coord., 2010

Le droit de la Politique européenne de sécurité et de défense dans le cadre du traité de Lisbonne
A. Cammilleri-Subrenat, 2010

Risques et territoires — Interroger et comprendre la dimension locale de quelques risques contemporains
T. Coanus, J. Comby, F. Duchêne, E. Martinais, coord., 2010

L'expertise : enjeux et pratiques
K. Favro, coord., 2009

Introduction à l'analyse probabiliste des risques industriels
H. Procaccia, 2009

Le syndrome de vulnérabilité
J. Bouisson, 2008

Les fondements des approches fréquentielle et bayésienne. Applications à la maîtrise du risque industriel
H. Procaccia, 2008

La politique de sécurité routière – Derrière les chiffres, des vies
J. Chapelon, 2008

La catastrophe AZF – L'apport des sciences humaines et sociales
G. de Terssac, I. Gaillard, coord., 2008

série « Innovations »

Sociologie des risques domestiques. Des accidents invisibles ?
M. Lalanne, 2010

Anticipation, innovation, perception : des défis pour la maîtrise des risques à l'horizon 2020
P. Kahn, A. Lannoy, D. Person-Silhol, D. Vasseur, 2010

Le risque inondation. Diagnostic et gestion
F. Vinet, 2010

La santé au travail à l'épreuve des nouveaux risques
N. Dedessus-Le-Moustier, F. Douguet, coord., 2010

Les paradigmes de la perception du risque
C. Kermisch, 2010

Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles – Guide méthodologique
B. Robert, L. Morabito, 2009

Climat et risques : changements d'approches
D. Lamarre, 2008

Sociologie d'une crise alimentaire : les consommateurs à l'épreuve de la maladie de la vache folle
J. Raude, 2008

La réduction de la vulnérabilité des PME-PMI aux inondations
P.-G. Mengual, 2008

série « Débats »

Le débat public, un risque démocratique ? L'exemple de la mobilisation autour d'une ligne à très haute tension
D. Boy, M. Brugidou, coord., 2009

Violences routières – Des mensonges qui tuent
C. Got, 2008

DANGER LE PHOTOCOPILLAGE TUE LE LIVRE

© LAVOISIER, 2011
ISBN : 978-2-7430-1362-2
ISSN : 1962-6053

© Crédit photographique
Olivier Procaccia

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1er juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code pénal art. 425).

Remerciements

Nous remercions chaleureusement André Lannoy d'avoir accepté d'écrire la préface de ce livre, et d'en avoir effectué une relecture attentive et très minutieuse accompagnée de remarques et commentaires constructifs qui nous ont permis de préciser et de mieux développer de nombreux sujets évoqués dans cet ouvrage.

Merci aussi à Jean Aupied qui nous a permis d'utiliser sa grande expérience sur les systèmes électriques, et en particulier pour son aide précieuse dans la rédaction de l'application industrielle relative aux transformateurs très haute tension.

Enfin merci à l'équipe de l'Institut national polytechnique de Grenoble, Laboratoire Jean Kuntzmann, qui a mis à notre disposition le logiciel Mars 2, afin de permettre une comparaison quasi exhaustive des différents modèles de maintenance des matériels réparables présentés dans le livre et, en particulier, avec le logiciel fréquentiel et bayésien Rexpert.

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Préface

Éric Ferton, Henri Procaccia et Marc Procaccia signent avec ce livre un apport fondamental à la maîtrise des risques et à la sûreté de fonctionnement. Ceci n'est guère étonnant. Tous trois sont de grands experts « fiabilité et maintenance » qui ont été confrontés depuis de nombreuses années aux dures réalités du retour d'expérience industriel. Ils ont tous trois une longue expérience théorique et pratique qui leur permet de dominer ce sujet si difficile ce qui n'est pas très fréquent. Le livre aborde en effet un domaine complexe, où les désaccords entre experts fiabilistes règnent, où les difficultés de tous ordres se cumulent : difficultés liées au retour d'expérience industriel, à sa (soi-disant) faiblesse, à son incomplétude, difficultés liées au choix d'un modèle, à la modélisation, aux techniques numériques, difficultés liées à l'intégration d'informations de différentes natures, difficultés liées à l'interprétation des résultats.

Quel en est le thème ? L'objectif est d'estimer les paramètres d'une loi de fiabilité sur la base d'un retour d'expérience, que l'on enrichit éventuellement en intégrant d'autres informations comme les dires d'experts, le retour d'expérience analogue… et en prenant en compte les défauts et qualités de ces informations (nombre de défaillances (les données complètes), taux de censure, données censurées à droite (ou données de survie dont l'apport d'information est fondamental lorsqu'on s'intéresse au vieillissement), réparabilité ou non du composant étudié, type de maintenance effectuée et efficacité de cette maintenance, prise en compte de la maintenance préventive dont le rôle est de diminuer la probabilité de défaillance, modélisation de l'expertise, etc.).

Le livre recense les différents modèles, les différentes méthodes existantes et certaines nouvelles, précise les hypothèses sous-jacentes, donne les moyens de résolution numérique et les applique à des cas réels provenant directement de l'industrie. Le lecteur pourra y chercher le modèle le mieux adapté à son problème, mais pas seulement. Il trouvera aussi, pour chacun des modèles, un exemple illustratif traité et la comparaison (un benchmarking) des estimations des paramètres entre plusieurs logiciels, de maturité différente, existants sur le marché. L'objectif final est de déterminer une loi de fiabilité opérationnelle (ou de vieillissement

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

ou de durée de vie) sur la période d'observation, mais aussi de déduire une loi de fiabilité intrinsèque (fiabilité vraie, en l'absence de toute maintenance).

Ce livre est innovant : il compile les différents modèles existants pour traduire une fiabilité, une durabilité ; tous ces modèles ont été testés, analysés dans le moindre détail, appliqués ; ils sont comparés dans le cadre d'un benchmarking afin de mettre en évidence leurs forces et leurs faiblesses ; les applications sont présentées avec leurs données brutes, ce qui permet au lecteur de bien comprendre les calculs, de les refaire mais aussi de les prolonger (ce qui est toujours souhaitable).

Ce livre est unique. Certes nous pouvons citer (Barlow et Proschan, 1975), (Asher et Feingold, 1984), ou plus récemment (Moss, 2005). Mais aucun de ces livres n'est aussi complet que le présent livre. À ma connaissance, on ne trouve pas dans la documentation technique (même anglo-saxonne) un tel recensement, bien qu'on puisse trouver, de ci de là, quelques modèles expliqués mais très rarement appliqués.

Ce livre est particulièrement utile, notamment en ces temps de vaches maigres. Les industriels doivent assurer la compétitivité, la durabilité de leurs actifs industriels en toute sûreté. Si l'on regarde le succès à la souscription d'un récent projet de l'Institut pour la Maîtrise des Risques sur le vieillissement de matériels maintenus, il est manifeste que le sujet préoccupe fortement les industriels. Ceci est tout à fait naturel. Il est en effet indispensable de disposer de modèles quantitatifs de la fiabilité et d'estimer les durées de vie déjà consommées et les évolutions de la fiabilité à des horizons plus ou moins lointains de 5 – 10 – voire 20 ans de l'instant du calcul. La fonction de répartition de la fiabilité ou défiabilité ou probabilité cumulée de défaillance, caractérise quantitativement le vieillissement. Elle va se trouver essentielle (même prédominante) dans toutes les actions de gestion du cycle de vie des actifs industriels (« asset management »), bien avant les coûts de maintenance, les investissements additionnels (« capital additions ») et autres facteurs. Le rôle de cette probabilité est déterminant dans le choix d'une option de maintenance ou d'investissement. Cependant, si le lecteur trouve la méthode la mieux adaptée à son cas dans ce livre, il devra :

– disposer d'un retour d'expérience de qualité, juste, exhaustif et pertinent ;

– analyser la défaillance (ou la dégradation) ; rappelons que l'analyse de défaillance consiste à identifier, jusqu'au niveau fonctionnel élémentaire — matériel le plus petit, les causes, les mécanismes de dégradation, le mode, les effets potentiels et réels d'une défaillance ; sur ces informations sont fondées les mesures préventives ou correctives qui sont retenues pour rétablir la fonction ou pour éviter une nouvelle défaillance ; l'analyste peut enquêter, faire des essais ou des calculs physiques, bref utiliser toute méthode jugée nécessaire pour déterminer les causes de la défaillance, pour comprendre son processus ; cette analyse de défaillance doit être réalisée avant tout traitement, mais aussi après afin d'interpréter les résultats ;

– rechercher des informations complémentaires, en particulier (mais pas seulement) des opinions d'experts, pas nécessairement trop pointues, même

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

vagues, celles des personnes travaillant sur le cycle de vie : concepteurs, constructeurs, exploitants, ingénieurs de maintenance, compagnons avec leurs points de vue « incertains » ;

– prendre en compte l'efficacité de la maintenance de la façon la plus proche possible de la réalité, les extrêmes étant un matériel se trouvant en situation ABAO (*as bad as old*) après une maintenance corrective dont l'objectif est de restaurer dans les meilleurs délais la fonction, ou en situation AGAN (*as good as new*) après une maintenance préventive, préparée à l'avance, dont l'objectif est de diminuer la probabilité de défaillance.

Enfin, ce livre est pratique, car l'analyste fiabiliste va se trouver guidé vers le modèle qui lui semble le plus approprié en fonction de la complexité de son matériel, de la politique de maintenance, de la qualité du retour d'expérience, de la compréhension et de la pertinence de ses données.

Ce livre me paraît un pas important, un progrès essentiel pour comprendre, analyser, évaluer avec les incertitudes une loi de comportement fiabiliste ainsi que l'efficacité des parades de maintenance, interpréter les résultats obtenus et les utiliser dans les aides à la décision de maintenance.

André Lannoy

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

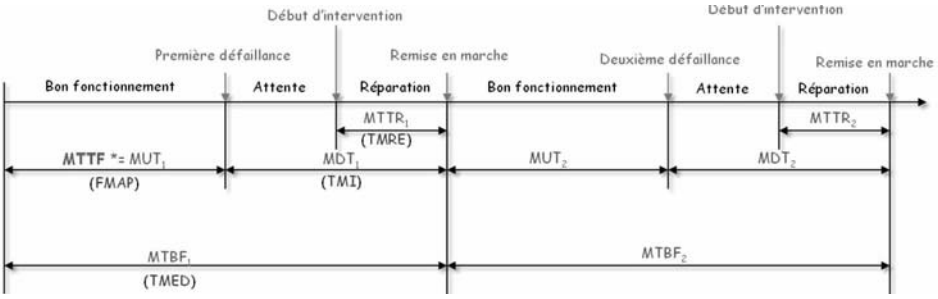
Sigles et abréviations

ABAO	*As bad as old* (aussi mauvais que vieux, maintenance minimale)
AGAN	*As good as new* (aussi bon que neuf, maintenance parfaite)
ARA	Arithmétique âge réduction, modèles 1, m, Rexpert, infini
ARI	Arithmétique réduction d'intensité (de défaillance)
B.P.	Modèle Brown-Proshan
ddl	Degré de liberté
GRP	*Generalized renewal process* (maintenance imparfaite)
HPP	*Homogeneous Poisson process* (processus de Poisson homogène)
HPP_E	Processus de renouvellement exponentiel
iid	Identique, indépendant, même distribution
MCF	*Mean cumulative function* (fonction cumulée moyenne)
M(t) = E[N(t)]	Espérance du nombre de défaillances entre 0 et t, fonction de comptage espérée des défaillances
m(t)	Intensité de réparation
LLP	Loi log-linéaire
L_LLP	Modèle log-linéaire à réduction d'intensité
M_PLP	Loi puissance modulée
MTBF	*Mean time between failure* (temps moyen entre défaillances)
MTTF	*Mean time to failure* (temps moyen jusqu'à la prochaine défaillance)
NHPP	*Non homogeneous poisson process* (processus de Poisson non homogène)
N(t)	Fonction de comptage des événements jusqu'à t
OMF	Optimisation de la maintenance par la fiabilité
PAR	Processus à réduction proportionnelle d'âge
PLP	Processus loi puissance
PLP_2S	Loi puissance segmentée (2 segments)

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

P_PLP	Modèle loi puissance à réduction d'intensité
S_PLP	Modèle lois puissance superposées
q	Efficacité de maintenance
RCM	*Reliability centred maintenance* (OMF), *Reliability based maintenance* (RBM)
REX	Retour d'expérience
Rocof	*Rate of occurrence of failure* (taux d'occurrence des défaillances)
RP	*Renewal process* (processus de renouvellement)
TTT	*Total time on test* (temps total de fonctionnement)
T_i	Temps de la $i^{ième}$ défaillance
ut	Unité de temps
X_i	Intervalle de temps entre la (i-1) et la $i^{ième}$ défaillance
γ	Facteur de réduction de l'intensité
λ	Taux de défaillance
$\lambda(t)$	Intensité de défaillance
$\rho(t)$	Facteur de restauration
τ	Temps de maintenance préventive
χ	Intervalle de temps entre maintenances préventives
$\chi^2_{0,9;2}$	Chi Deux, niveau 90 %, 2 degrés de liberté

Termes usuels en fiabilité, maintenance

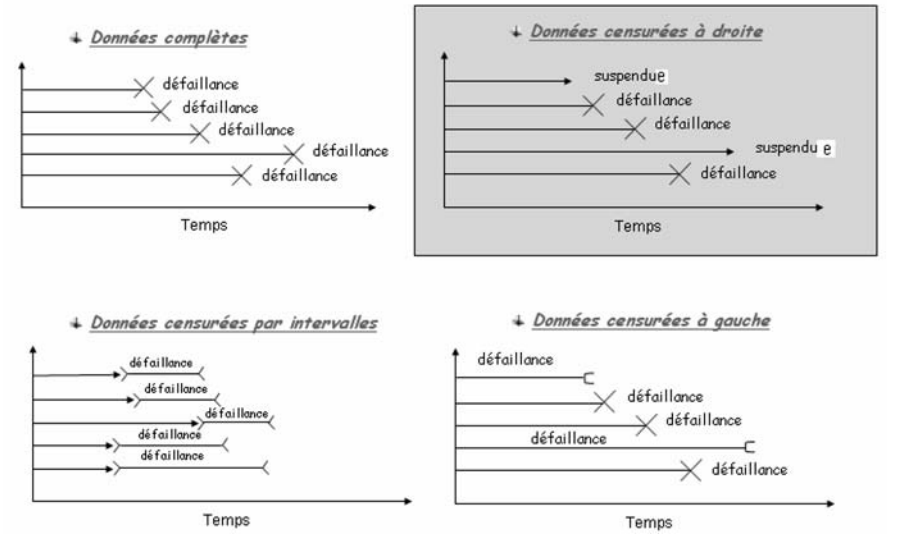


* Certains auteurs utilisent le terme MTTFF (*mean time to first failure*) pour les systèmes réparables.

MTTF	*Mean time to failure*
FMAP	Fonctionnement moyen avant défaillance
MDT	*Mean down time*
TMI	Temps moyen d'indisponibilité
MTTR	*Mean time to repair*
TMRE	Temps moyen de remise en état
MUT	*Mean up time*
TMD	Temps moyen de disponibilité
MTBF	= MUT + MDT *Mean time Between failure*
TMED	Temps moyen entre défaillance

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

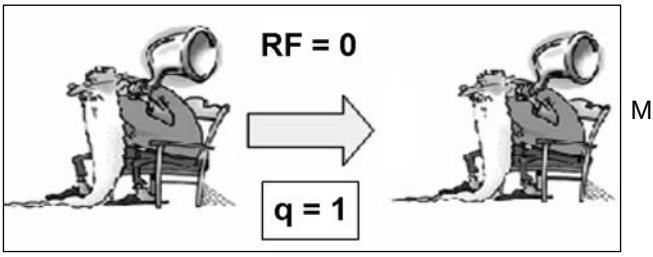
Type de données de retour d'expérience



Type de maintenance d'un système réparable

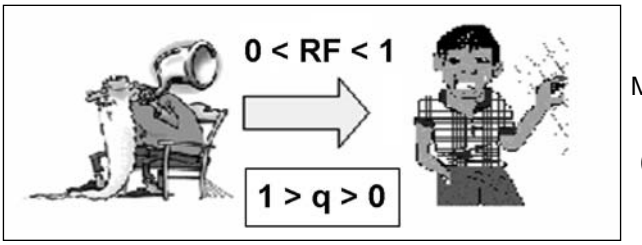
Différents facteurs de restauration

N.H.P.P.
ABAO



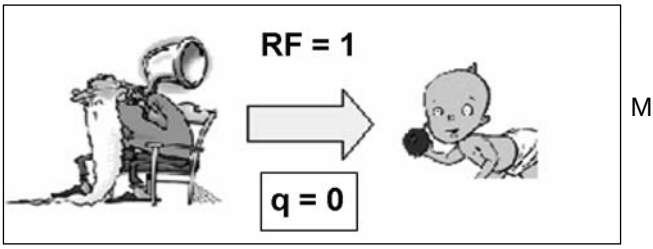
Maintenance
Minimale

G.R.P.
KIJIMA



Maintenance
Efficace
(imparfaite)

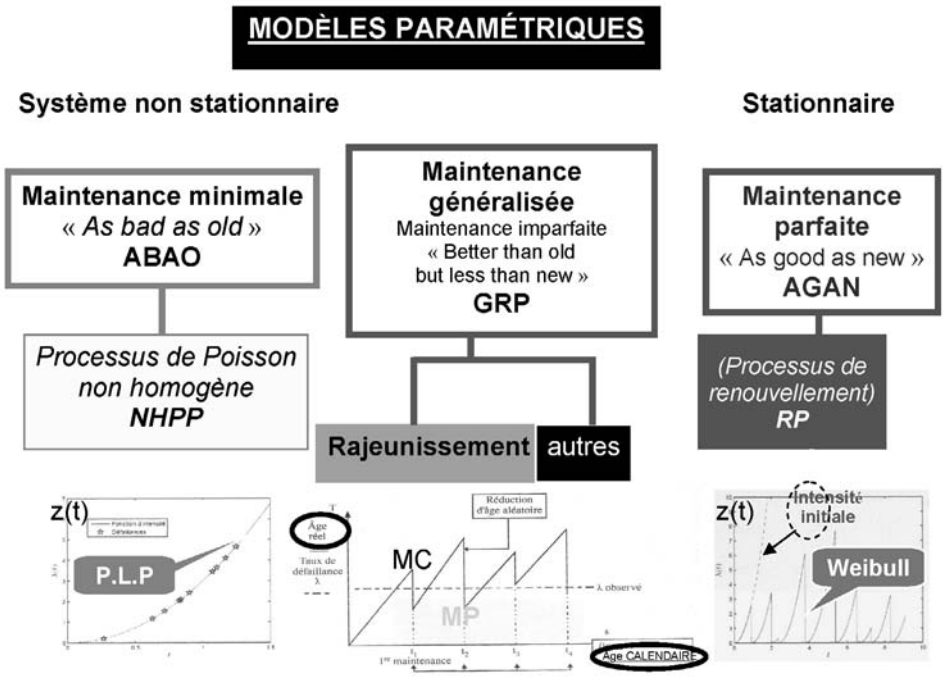
R.P.
AGAN



Maintenance
Parfaite

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Les modèles fréquentiels de vieillissement



© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Table des matières

Remerciements III

Préface V

Sigles et abréviations IX

Chapitre 1

Matériels réparables et non réparables

1. Introduction 1
2. Modélisation des défaillances des matériels réparables et non réparables 2
   2.1. Les différents types de maintenance 3
   2.2. Impact de la maintenance sur la fiabilité d'un matériel : la courbe en baignoire 6
3. Modélisation des défaillances des matériels réparables et non réparables 8
4. Modèles d'analyse de la fiabilité des matériels non réparables et réparables 11
   4.1. Processus de renouvellement 13
   4.2. Processus de Poisson homogène 14
   4.3. Processus de Poisson non homogène 14
   4.4. Processus de renouvellement généralisé (GRP). Maintenance imparfaite ou efficace 15
   4.5. Choix d'un modèle. Analyse statistique des intervalles de temps entre défaillances et tests de tendance 15
5. Les problèmes associés aux observations du retour d'expérience 17
   5.1. La qualité des données 17
   5.2. Les données de calcul physique 17
6. L'optimisation de la maintenance par la fiabilité (OMF) ou maintenance basée sur la fiabilité (MBF ou *reliability centred maintenance*, RCM) 18
   6.1. Historique des méthodes de maintenance basées sur la fiabilité, MBF 19
   6.2. Arborescence fonctionnelle d'un matériel 21
   6.3. L'analyse des modes de défaillance de leur effet (AMDE) et de leur criticité (AMDEC). Matrice de criticité 25
   6.4. Indicateurs économiques de disponibilité 28

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

6.5. Indicateurs de Pareto utilisés en maintenance 28
6.5.1. Exemple 1 : diagnostic d'un problème de fiabilité sur des équipements critiques 29
6.5.2. Exemple 2 : diagnostic d'un problème de maintenabilité sur des machines critiques 30
6.6. Application de la démarche OMF 31
6.7. Maintenance exceptionnelle. Durée de vie des installations 33

Chapitre 2

Processus de comptage de Poisson

1. Fiabilité des matériels réparables. Processus de Poisson. Définitions 37
1.1. Application d'un processus de Poisson aux matériels réparables 39
1.2. Intensité de défaillance, ROCOF 44
1.3. Différents processus de comptage de Poisson 48
1.3.1. Processus de Poisson non homogène (NHPP) 49
1.3.2. Processus de Poisson homogène (HPP) 50
1.4. Propriétés de la loi de Poisson 50
1.5. Intervalle de confiance des estimateurs d'un processus de Poisson 51
2. Propriétés des matériels non réparables et réparables 54
3. Analyse de la fiabilité des matériels réparables 56
3.1. Processus de Poisson homogène (HPP) 56
3.1.1. Estimateurs du maximum de vraisemblance du paramètre λ 58
3.1.2. Exemple 4 : processus HPP. Fiabilité d'un excavateur hydraulique d'une mine de fer 60
3.2. Processus de Poisson non homogène (NHPP) 60
3.2.1. Estimation du maximum de vraisemblance des paramètres d'un processus NHPP 62
3.2.2. Estimateurs d'un processus de Poisson non homogène-loi de Weibull 63
4. Fonctions d'intensités de défaillance variables avec le temps 64
4.1. Exemple 5 : processus NHPP. Réparation minimale d'un excavateur 65
4.2. Représentativité d'un processus. Critère LKV et critère AIC d'Akaike 65
4.3. Critère *Bayesian identification criterion* (BIC) 67
4.4. Exemple 6 : modélisation du retour d'expérience d'un véhicule sous garantie : intérêt de disposer de nouveaux modèles de fiabilité pour les matériels réparables 67

Chapitre 3

Vieillissement et maintenance des matériels non réparables

1. Introduction 71
2. La distribution de Weibull 72
3. Évaluation des paramètres de la loi de Weibull 74
3.1. Méthode de régression linéaire 74
3.1.1. Méthodes graphiques 74
3.1.2. Méthodes analytiques 84
3.1.3. Facteur de réduction de biais (RBA) 87

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

3.2. L'estimateur du maximum de vraisemblance (EMV) 88
3.3. Exemple 5 : estimation des paramètres d'une loi de Weibull calculés par la méthode du maximum de vraisemblance (EMV) dans le cas de données multicensurées 91
3.4. Intervalles de confiance des paramètres de la loi de Weibull 93
3.4.1. Matrice de Fisher. 93
3.4.2. Application numérique. Calcul d'un intervalle de confiance 95
3.4.3. Méthode du rapport des vraisemblances 96
3.4.4. Résultats de l'estimation de l'intervalle de confiance des paramètres par la méthode du rapport des vraisemblances à l'aide de Weibull++ 7.0 (ReliaSoft) 96
3.4.5. Calcul de l'intervalle de confiance par l'approximation du Chi Deux 97
3.4.6. Exemple 6 : intervalle de confiance sur les paramètres de la loi de vieillissement de roulements à billes 99
3.5. Méthodes de simulation. 100
3.5.1. Simulation des données censurées. L'algorithme SEM (*Stochastic expectation maximisation*). 100
3.5.2. Simulation des observations. Méthode du bootstrap ou de Monte Carlo 100
3.6. Démarche bayésienne 100
3.6.1. Expertise *a priori* sur les paramètres de la loi de Weibull 100
3.6.2. Nombre prévisionnel de défaillances. Approvisionnement des pièces de rechange 102
3.6.3. Exemple 7 : étude du vieillissement de roulements à billes par la démarche bayésienne. 103
3.7. Exemple 8 : comparaison des méthodes d'estimation des paramètres d'un modèle de Weibull à partir d'un retour d'expérience recueilli sur des pompes à eau brute 109
3.8. Exemple 9 : optimisation économique de la maintenance de composants non réparables 112
3.8.1. Modélisation de la loi de défaillance. 113
3.8.2. Optimisation d'une maintenance préventive en fonction de l'âge de la pièce 114
3.9. Représentation de plusieurs phases de vie d'un matériel (courbe en baignoire), ou de différents modes de défaillances. Les modèles d'Hastings et de Bertholon 115
3.9.1. Exemple 10 : mélange de deux sous-populations d'observations 116
3.9.2. Exemple 11 : détection graphique de sous-populations de défaillances 118
3.10. Exemple 12 : utilisation des estimateurs de « Nelson » et de « Kaplan-Meier » sur un retour d'expérience observé sur trois systèmes réparables. 120
3.10.1. Modélisation 121
3.10.2. Optimisation de la maintenance préventive en fonction de l'âge de la pièce. 121
3.10.3. Optimisation du nombre de pièces de rechange 124
3.11. Conclusion 126

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Chapitre 4

Maintenances parfaite et minimale

1. Impact de la maintenance sur la fiabilité des matériels. 129
2. Maintenance corrective et maintenance préventive complète et intermédiaire 130
3. Processus de renouvellement, maintenance parfaite. 131
3.1. Détermination de M(t) par une approche discrète. Méthode asymptotique 132
3.2. Détermination de $M(t_i)$ par l'algorithme de Xie 133
3.3. Comparaison entre les différentes méthodes d'évaluation de M(t). 134
4. Processus de Poisson homogène (HPP), maintenance parfaite. 135
4.1. Loi du nombre de défaillances 136
4.2. Loi des temps de défaillance 136
4.3. Loi des intervalles de temps entre défaillances. 137
4.4. Estimation de l'intensité de défaillance, λ 137
4.5. Exemple 1 : taux de défaillance d'un excavateur d'une mine de fer. Hypothèse d'un processus de Poisson homogène (HPP) 138
5. Processus de Poisson non homogène (NHPP), maintenance minimale 138
5.1. Fonction d'intensité de défaillance 141
5.2. Loi du nombre de défaillances 141
5.3. Loi des temps de défaillance 142
5.4. Loi des intervalles de temps entre défaillances. 142
5.5. Lois utilisées pour modéliser l'intensité de défaillance initiale 143
6. Processus NHPP – Loi puissance (ou loi PLP/CROW-AMSAA) 143
6.1. Nombre espéré de défaillances 144
6.2. Loi des temps de défaillance 145
6.3. Loi des intervalles de temps entre les défaillances 145
6.4. Propriétés de la loi puissance 145
7. Estimation des paramètres des processus loi puissance des matériels réparables 147
7.1. Méthode de régression. 147
7.1.1. Détermination graphique des paramètres de la loi puissance 147
7.1.2. Exemple 2 : évaluation graphique des paramètres de la loi des temps de défaillance d'une machine industrielle. 148
7.2. Estimation analytique des paramètres de la loi puissance par la méthode du maximum de vraisemblance. 149
7.2.1. Estimation du maximum de vraisemblance des paramètres de la loi puissance pour un matériel simple 150
7.2.2. Généralisation aux systèmes (matériels) ou matériels (composants) multiples 162
8. Processus de défaillance non homogène de Weibull (NHPP Weibull). Application aux matériels réparables 170
8.1. Probabilité conditionnelle de défaillance d'un processus NHPP de Weibull 171
8.2. Estimateurs du maximum de vraisemblance des paramètres de Weibull (cas des essais de type II) 172
8.2.1. Estimateurs biaisés 172
8.2.2. Estimateur non biaisé du paramètre de forme β 173
8.2.3. Intervalles de confiance pour les estimateurs 174
8.3. Estimateurs du maximum de vraisemblance des paramètres (cas des essais de type I) 174

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

8.3.1. Estimateurs des paramètres du maximum de vraisemblance d'un processus de Weibull. 175
8.3.2. Estimateurs non biaisés du paramètre de forme d'un processus de Weibull 175
8.3.3. Intervalles de confiance pour les estimateurs 175
8.4. Généralisation à des systèmes ou matériels multiples. 176
8.4.1. Systèmes identiques 176
8.4.2. Exemple 9 : estimateurs d'un processus de défaillance NHPP de pompes à eau brute 177
8.4.3. Systèmes différents 182
8.4.4. Intervalles de confiance sur les estimateurs de systèmes multiples 182
9. Comparaison entre un processus NHPP d'intensité loi puissance et un processus de Weibull 183
10. Le modèle de superposition de lois puissance, S_PLP. Modélisation de la courbe en baignoire. 184
10.1. Exemple 10 : superposition de deux processus NHPP – loi puissance : le modèle S_PLP. Comparaison avec un modèle PLP segmenté, PLP_2S 185
10.2. Évaluation des paramètres d'un modèle S_PLP à deux risques concurrents. 187
10.2.1. Exemple 11 : tests de pompes alimentaires 187
10.2.2. Exemple 12 : modèle S_PLP à trois risques concurrents 189
10.2.3. Optimisation de la maintenance préventive 190
10.2.4. Algorithme du calcul d'optimisation de la maintenance à l'aide du progiciel Mathematica 191
11. Processus de défaillance log-linéaire (LLP) 191
12. Le modèle log-linéaire d'intensité proportionnelle 193
13. Le processus d'intensité log-linéaire borné 194
14. Conclusions, extensions. 196
14.1. Exemple 14. Traitement d'un Rex faible d'un point de vue fréquentiel. 198
14.2. Exemple 15. Comparaison entre les modèles de maintenance 200

Chapitre 5

Tests de tendance et d'adéquation

1. Tests de tendance et d'adéquation. 204
2. Tests de tendance. 205
2.1. Tests empiriques non paramétriques, interprétation graphique. 205
2.1.1. Évolution du nombre cumulé de défaillances en fonction du temps. 205
2.1.2. Test de Nelson-Aalen 207
2.1.3. Temps total en test (TTT). Graphe normalisé de Nelson-Aalen 208
2.1.4. Test de Mann-Kendall (PCNT Pairwise Comparison). Arrangements inverses (Reverse Arrangement Test, RAT) 211
2.2. Tests paramétriques. Méthodes analytiques 215
2.2.1. Test de Laplace 215
2.3. Test de Lewis-Robinson 220
2.3.1. Exemple 7 : croissance de fiabilité d'un matériel en développement 221
2.4. Test du Military Handbook 189. 222
2.4.1. Exemple 8 : test du Mil-Hdbk 189 sur les temps de défaillance de deux photocopieuses. 223

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

3. Tests d'adéquation. 225
3.1. Test de Crow/AMSAA 225
3.2. Test de Spearman. 226
3.3. Test de Cramer von Mises 227
3.3.1. Exemple 9 : groupe turbo-alternateur de proplusion d'un sous-marin 231
3.3.2. Exemple 10 : test d'un matériel multisystème. 234
3.4. La méthode du rapport des vraisemblances 236
3.5. Limites des tests statistiques 237
4. Rappel sur l'utilisation des tests d'adéquation dans le cas des systèmes non réparables 239
4.1. Test d'Anderson-Darling. 239
4.1.1. Processus de défaillance stationnaire. Cas d'une loi de défaillance exponentielle 241
4.1.2. Test d'une loi de Weibull. 242
4.1.3. Test d'une loi normale ou d'une loi log normale 243
4.1.4. Exemple 12 : test d'un processus de Weibull à deux paramètres 243
4.1.5. Exemple 13 : test d'un processus exponentiel. 245
4.2. Test du Chi Deux 246
4.3. Test spécifique pour la loi exponentielle dans le cas de données multicensurées 249
4.3.1. Exemple 15 : test d'observations comprenant des données censurées 250
4.3.2. Approximation normale 251
4.3.3. Exemple 16 : vieillissement de garnitures d'étanchéité de pompes alimentaires 251
5. Conclusion. 253

Chapitre 6

Introduction à la maintenance généralisée. Maintenance imparfaite ou efficace

1. Effets de la maintenance sur les systèmes réparables. Les modèles généralisés de maintenance 255
2. Modèle général de maintenance des matériels réparables 256
2.1. Processus ponctuels bivariés 256
2.2. Processus colorés. 257
2.3. Propriétés du processus ponctuel des maintenances préventive et corrective (MP/MC) 258
3. Modèles d'âge virtuels pour un seul type de maintenance, modèles à trois paramètres 259
3.1. Modèles de Kijima 260
3.1.1. Modèle Kijima 1 260
3.1.2. Modèle Kijima 2 262
3.1.3. Exemple 1 : échangeur de chaleur. Comparaison entre les modèles Kijima 1 et 2 262
3.1.4. Modèle d'âge virtuel avec intensité de défaillance initiale de Weibull. 264
4. Prise en compte des maintenances préventives et correctives, modèle à quatre paramètres 266
4.1. Modèle de Liu 266

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

4.2. Processus de renouvellement généralisé types 1 et 2 (GRP, *Generalized renewal process*) 267
4.2.1. Estimation des paramètres d'un processus de renouvellement généralisé d'intensité initiale de Weibull 268
4.2.2. Généralisation des modèles à réduction arithmétique d'âge ARA 286
4.2.3. Modèle à réduction arithmétique d'âge ARA d'intensité initiale loi de Weibull 289
4.2.5. Le modèle Rexpert, processus de maintenance à n paramètres 297
4.2.6. Comparaison de l'impact du facteur d'efficacité de la maintenance sur un modèle ARA_1 298
4.2.7. Généralisation du processus de renouvellement GRP à des maintenances entraînant des restaurations meilleures que l'état neuf. Le modèle G_1 Renewal 299
4.3. Modèle à réduction géométrique d'âge 306
5. Modèles à réduction arithmétique d'intensité (ARI) 306
5.1. Intensités de défaillance des modèles à réduction arithmétique d'intensité 306
5.2. Efficacité de la maintenance 309
5.3. Modèle ARI_1 309
5.4. Modèle ARI∞ 310
5.5. Modèle ARI de mémoire m 311
5.6. Exemple 6 : échangeur de chaleur, comparaison d'un modèle ARA_1 et d'un modèle ARA∞ 312
6. Autres modèles de fiabilité des matériels réparables 313
6.1. Modèle Brown et Proschan 313
6.1.1. Intensité de défaillance du modèle Brown et Proshan 314
6.1.2. Intensité initiale de type loi puissance. 314
6.1.3. Exemple 7 : érosion des tubes écrans d'une chaudière à charbon pulvérisé 316
6.2. Processus de chocs. Définitions 318
6.2.1. Processus gamma modulé par un processus NHPP. 320
6.2.2. Processus gamma modulé par une loi puissance, M_PLP (*Modulated power law process*) 321
6.2.3. Processus de chocs exponentiels, le modèle E_PLP 327
7. Modèles de risques concurrents 333
7.1. Exemple 11 : essais de turbopompes alimentaires 334
7.1.1. Test de tendance entre les temps de défaillance 335
7.1.2. Comparaison entre les processus loi puissance, NHPP-PLP, S_PLP, et M_PLP. 336
7.1.3. Modèle de Jack 337
7.2. Comparaison entre modèles réparables subissant de la maintenance corrective ABAO avec de la maintenance AGAN, IMPERFECT et ABAO 341

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Chapitre 7

Estimation des paramètres des nouveaux modèles de maintenance généralisée. Applications

1. Introduction 343
2. Fonction de vraisemblance des observations. Les modèles de maintenance à deux paramètres 344
2.1. Réparation minimale. Processus de Poisson non homogène (NHPP). 344
2.1.1. Intensité initiale de défaillance de type loi puissance 344
2.1.2. Intensité initiale de défaillance de type loi log-linéaire 345
2.1.3. Extension de la loi puissance. Le modèle de superposition de lois puissance, S_PLP 346
2.2. Modélisation des maintenances correctives imparfaites (ou efficaces). Les différents modèles de maintenance imparfaite à trois paramètres 348
2.2.1. Modèle à réduction d'âge de mémoire 1, pour un essai de type II, ARA_1 Type II, avec une loi puissance (PLP) comme intensité initiale 348
2.2.2. Modèle à réduction d'intensité de mémoire 1, essai de type II, ARI_1 Type II, avec un PLP comme intensité initiale 348
2.2.3. Modèle à réduction d'âge de mémoire infinie, essai de type II, ARA∞ Type II, avec un PLP comme intensité initiale 349
2.2.4. Modèle à réduction d'intensité de mémoire infinie, pour un essai de type II, ARI_m Type II, avec un PLP comme intensité initiale. 349
2.2.5. Modèle à réduction proportionnelle d'intensité loi puissance, P_PLP, Type I (pour Type II → T = tn) 349
2.2.6. Modèle log-linéaire pour une maintenance imparfaite, L_LLP, Type II. . . . 349
2.3. Modèles de maintenance imparfaite à réduction d'intensité initiale de type loi puissance PLP 350
2.3.1. Modèle de maintenance généralisée à réduction proportionnelle d'intensité infinie, P_PLP ARI∞. 350
2.3.2. Processus loi puissance à réduction d'intensité discontinue. Modèle ARI discret, D_PLP 365
2.3.3. Modèle à réduction arithmétique d'intensité de processus loi puissance segmentée 369
2.4. Modèle de maintenance imparfaite à réduction proportionnelle d'intensité log-linéaire. 378
2.4.1. Modèle généralisé de maintenance imparfaite log-linéaire, L_LLP 378
2.4.2. Processus log-linéaire discontinu D_LLP. 388
3. Modélisation générale des maintenances préventive MP et corrective MC. Les modèles de maintenance imparfaite à quatre paramètres. 389
3.1. Modèles de risques concurrents 392
3.2. Modélisation générale des effets conjoints des PM et CM 392
3.2.1. Modèle d'âge virtuel généralisé 393
3.2.2. Modèle à réduction d'âge ARA_1 393
3.2.3. Modèle généralisé à réduction d'intensité ARI_1 394
3.2.4. Exemple 8 : chaudière de centrale thermique 394
3.3. Modélisation d'une maintenance imparfaite pendant la période de jeunesse 405
3.3.1. Hypothèses du processus. 406
3.3.2. Estimation du maximum de vraisemblance des paramètres du processus 408

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

4. La démarche bayésienne. Utilisation de l'expertise pour estimer plus de quatre paramètres . . . 409
4.1. L'expertise . . . 410
4.1.1. Procédure d'interrogation des experts . . . 411
4.1.2. Les éléments dont il faut tenir compte pour interroger les experts . . . 412
4.1.3. Exemple 10 : expertise pour la maintenance des internes d'un robinet pneumatique . . . 414
4.2. Exemple 11 : modèle de maintenance d'un matériel réparable à cinq paramètres. Logiciel Rexpert. Optimisation de la maintenance de compresseurs à pistons . . . 417
4.2.1. Retour d'expérience disponible . . . 417
4.2.2. Programme de maintenance préventive . . . 419
4.2.3. Évaluation du vieillissement des compresseurs maintenus préventivement et optimisation de la maintenance . . . 420

Chapitre 8

Applications industrielles

1. Étude du vieillissement et de la maintenance d'un transformateur de puissance . . . 425
1.1. Analyse des modes de défaillance et de leurs effets . . . 426
1.2. Tâches de maintenance préventive réalisées sur le transformateur . . . 426
1.3. Retour d'expérience . . . 426
1.3.1. Retour d'expérience national à Électricité de France . . . 426
1.3.2. Exemple 1 : retour d'expérience détaillé relevé sur un groupe de transformateurs de 345 KV brésiliens . . . 431
1.3.3. Comparaison entre modèles ARA à maintenance corrective imparfaite . . . 451
1.3.4. Quel modèle choisir finalement ? . . . 452
1.3.5. Exemple 2 : étude détaillée des différents modes de défaillance d'un parc de transformateurs Haute Tension de centrales nucléaires . . . 458
2. Application 2 : optimisation de la maintenance de presse-étoupes de motopompes à eau brute . . . 463
2.1. Retour d'expérience . . . 464
2.2. Analyse du retour d'expérience . . . 465
2.2.1. Analyse des premières défaillances. Loi de Weibull, démarche fréquentielle . . . 468
2.2.2. Analyse des premières défaillances. Loi de Weibull, démarche bayésienne . . . 470
2.3. Processus de défaillance à réduction arithmétique d'âge (ARA) . . . 469
3. Application 3 : protocole d'Ascher appliqué à l'étude de fiabilité de pompes d'alimentation d'une station de pompage . . . 474
3.1. Retour d'expérience . . . 475
3.2. Tests de tendance . . . 476
3.3. Choix d'un modèle pour un matériel réparable . . . 477
3.3.1. Le modèle loi puissance PLP . . . 478
3.3.2. Le modèle log-linéaire LLP . . . 482
3.3.3. Les modèles généralisés de maintenance imparfaite ARA et ARI (GRP) . . . 482
3.3.4. Observation. Conclusion. Optimisation de la maintenance . . . 488
3.3.5. Visite complète d'un matériel réparable . . . 491
4. Introduction à de nouveaux modèles loi puissance . . . 495

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Conclusions – Perspectives 495

Bibliographie 501

Annexe 1 – Tables statistiques 505
Fonction de répartition de la loi normale 506
Fractiles de la loi normale centrée réduite 507
Table du Chi Deux 509
Tables de Fischer-Snedecor, seuil 0,01 509
Loi de Fischer-Snedecor, seuil 0,025 510
Loi de Fischer-Snedecor, seuil 0,05 511
Table de C de Kolomogorov-Smirnov 512

Annexe 2 – Calcul des paramètres des modèles à réduction arithmétiques d'âge à trois paramètres 513
1. Modèle à réduction arithmétique d'âge de mémoire 1 : ARA_1 513
   1.1. Essai de type II 514
   1.2. Essai de type I 515
   1.3. Exemple d'application pour des moteurs électriques 515
      1.3.1. Calcul Mathematica 515
      1.3.2. Calcul à l'aide du logiciel Rexpert 516
2. Modèle à réduction arithmétique d'âge de mémoire infinie : $ARA\infty$ 517
   2.1. Exemple 519
   2.2. Calcul de λ 519
   2.3. Calcul détaillé du LKV par décomposition 520
   2.4. Calcul logiciel 520

Des mêmes auteurs 521

Index 523

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

collection dirigée par **Franck Guarnieri**
directeur du Centre de recherche sur les Risques et les Crises (CRC), Mines ParisTech / ARMINES

SRD
série Références

L'évaluation de la fiabilité des matériels d'une installation industrielle est une étape importante de l'analyse de risque. Cette fiabilité dépend des interventions de maintenance corrective, réalisées à la suite d'une défaillance, ou préventive, réalisées pour retarder ou prévenir cette défaillance. En l'absence de modèles physiques et mathématiques prenant en compte l'effet réel de la maintenance réalisée sur un matériel, on a longtemps fait l'hypothèse simplificatrice que cet effet correspondait soit à une maintenance parfaite, c'est-à-dire à un renouvellement total du matériel, soit à une maintenance minimale (processus de Poisson non homogène) laissant le matériel dans l'état qu'il avait avant sa défaillance. L'utilisation de ces hypothèses simples peut toutefois conduire à des décisions contradictoires sur la politique de maintenance à suivre.

Synthèse des nouvelles théories développées dans le domaine de la fiabilité et de la maintenance industrielle, cet ouvrage analyse et compare les modèles de maintenance les plus couramment utilisés jusqu'à présent avec les modèles plus récents à réduction arithmétique d'âge (ARA), ou à réduction d'intensité de défaillance (ARI), ainsi que les modèles bayésiens utilisant le retour d'expérience et une expertise très riche mais souvent ignorée. Il présente notamment les outils logiciels associés à ces modèles en explicitant les éléments théoriques et pratiques pour les élaborer. Il montre comment choisir le modèle de maintenance le plus approprié en fonction du retour d'expérience disponible, et notamment l'intérêt et les limites des modèles disponibles à partir de nombreux exemples issus de différentes industries : l'énergie, l'automobile, l'aviation, le transport... Il aide ainsi à définir les meilleures procédures d'optimisation de la maintenance des matériels et systèmes industriels.

Véritable guide pratique, **Fiabilité et maintenance des matériels industriels réparables et non réparables** s'adresse à tous les spécialistes de la sûreté de fonctionnement et de la maintenance des matériels et systèmes chargés d'assurer la sécurité et la disponibilité d'installations industrielles, en particulier aux responsables de ces installations, à leurs concepteurs et leurs exploitants, aux consultants, aux étudiants des écoles techniques et des écoles d'ingénieurs ainsi qu'aux universitaires. Il constitue également un support très important pour la recherche à venir dans le domaine de la maintenance.

Henri Procaccia est directeur et membre d'honneur de l'European Safety Reliability and Data Association (ESReDA). Il est également membre de l'Institut pour la maîtrise des risques et la sûreté de fonctionnement (IMdR-Sdf). Adjoint au chef du département « Retour d'expérience, Mesures, Essais » (REME) d'Électricité de France (EDF), Direction Recherche et Développement (R&D), il a notamment été chargé des études de conception, du retour d'expérience, de la sûreté de la maintenance, ainsi que des essais de fonctionnement des centrales nucléaires.

Éric Ferton est professeur ENSAM à l'Université du Littoral en Automatique et Maintenance. Il est également membre de l'Institut pour la maîtrise des risques et la sûreté de fonctionnement (IMdR-Sdf). Pendant plus de vingt ans, il fut responsable en Maintenance/Énergie industrielle dans divers secteurs.

Marc Procaccia est directeur de la Société Siadcom 1, Systèmes d'information et d'aide à la décision et à la communication. Expert conception informatique et système statistique SAS, il conçoit et réalise des systèmes d'informations, d'infocentres ou de pilotage pour des grands comptes et différentes directions techniques. Il a en particulier réalisé pour EDF de nombreux logiciels fréquentiels et bayésiens pour recueillir et analyser le retour d'expérience nucléaire, modéliser l'expertise, évaluer le vieillissement des installations et optimiser leur maintenance.

978-2-7430-1362-2