



Fiabilité, diagnostic ^{et} maintenance prédictive des systèmes

Patrick Lyonnet
Marc Thomas
Rosario Toscano

Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Fiabilité, diagnostic et maintenance prédictive des systèmes

Patrick Lyonnet

Professeur des universités à l'École nationale d'ingénieurs
de Saint-Étienne (ENISE)

Marc Thomas

Professeur à l'École de technologie supérieure (ETS)
à Montréal

Rosario Toscano

Professeur des universités à l'École nationale d'ingénieurs
de Saint-Étienne (ENISE)



11, rue Lavoisier
75008 Paris

Chez le même éditeur

Fiabilité technique et humaine

P. Lyonnet, 2012

Supervision, surveillance et sûreté de fonctionnement des grands systèmes

Traité Systèmes Automatisés, IC2

N. Matta, Y. Vandenboomgaerde, J. Arlat, 2012

Fiabilité et maintenance des matériels industriels réparables et non réparables

(Collection Sciences du risque et du danger, série Références)

H. Procaccia, É. Ferton, M. Procaccia, 2011

Sûreté de fonctionnement des équipements et calculs de fiabilité

G. Lasnier, 2011

Fiabilité des ouvrages : sûreté, variabilité, maintenance, sécurité

(MIM, série Géomatériaux)

J. Baroth, F. Schoefs, D. Breysse, 2011

La simulation de Monte Carlo

(Collection méthodes stochastiques appliquées)

B. Tuffin, 2010

Les fondements des approches fréquentielle et bayésienne. Applications

à la maîtrise du risque industriel

(Collection Sciences du risque et du danger, série Références)

H. Procaccia, 2008

Évaluation de la fiabilité prévisionnelle : Outil décisionnel pour la conception

et le cycle de vie d'un bien industriel

A. Lannoy, H. Procaccia, 2006

Évaluation et maîtrise du vieillissement industriel

(Collection EDF R&D)

A. Lannoy, H. Procaccia, 2005

Direction éditoriale : Emmanuel Leclerc

Édition : Chantal Arpino

Fabrication : Estelle Perez

Couverture : Isabelle Godenèche

Mise en pages : Atelier SMB

© 2012, Lavoisier SAS

ISBN : 978-2-7430-1385-1

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans 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 réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, d'autre part les analyses et courtes citations justifiées dans le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 – art. L. 122-4 et L. 122-5 et Code pénal art. 425).

T able des matières

Introduction

1. Historique	IX
1.1. Fiabilité	IX
1.2. Diagnostic, et surveillance des systèmes	IX
1.3. Maintenance et prédictif	X
1.4. Les systèmes complexes	X
1.5. Concept de la fiabilité et maintenance dynamique	X
1.6. Les études de fiabilité et maintenance dans le processus industriel	XI
2. Présentation des concepts outils et méthodes développées dans cet ouvrage	XI

Chapitre 1

Évaluation des performances

1. Évaluation des performances	1
1.1. Normes de fiabilité et maintenance	1
1.2. Termes de la Norme X60-500 (Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité)	4
1.3. Grandeurs évaluées	4
1.4. Diagramme des temps de maintenance	5
1.5. Stratégies de maintenance	6
2. Corpus mathématique de la fiabilité, de la maintenabilité et de la disponibilité	10
2.1. Fondement mathématique de l'évaluation de fiabilité	10
2.2. Relations mathématiques entre le taux de défaillances et les fonctions de fiabilité	11
2.3. Taux de réparation et fonction maintenabilité	15
3. Analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle des systèmes	17
3.1. Analyse fonctionnelle	18
3.2. Analyse des dysfonctionnements, AMDEC/AEEL	23
Exercices et problèmes du chapitre 1	37

*Chapitre 2***Modélisation stochastique et fiabilité des systèmes non réparables**

1. Généralités sur les systèmes	43
1.1. Fonction de structure et schémas bloc de fiabilité.	43
1.2. Fonction de structure	43
2. Caractéristiques « fiabilité » des systèmes non réparables	45
2.1. Typologie des systèmes	46
2.2. Chemins et coupes d'un système	50
2.3. Redondances et tolérances aux fautes	57
Exercices et problèmes du chapitre 2	68

*Chapitre 3***Modélisation stochastique et fiabilité des systèmes réparables**

1. Fiabilité des systèmes réparables.	73
1.1. Chaînes de Markov et graphe d'états du système	73
1.2. Évaluation de la disponibilité des systèmes réparables à l'aide des chaînes de Markov	74
1.3. Évaluation de fiabilité des systèmes réparables à l'aide des chaînes de Markov	85
1.4. Réseaux de Petri, RdP.	91
1.5. Du réseau de Petri aux chaînes de Markov	99
Exercices et problèmes du chapitre 3	102

*Chapitre 4***Modélisation des systèmes dynamiques –
Représentation d'état**

1. Notion de système.	113
2. Modèles d'un système	114
2.1. Modèle d'état ou représentation interne	114
2.2. Linéarisation du modèle d'état.	117
2.3. Modèle de transfert ou représentation externe.	121
2.4. Représentation multimodèle.	122
2.5. Obtention d'un modèle d'état, principes généraux et exemples.	127
Exercices du chapitre 4.	133

*Chapitre 5***Analyse des systèmes dynamiques**

1. Stabilité d'un point d'équilibre	141
1.1. Définition de la stabilité d'un point d'équilibre	141
1.2. Stabilité des systèmes linéaires	142

2. Étude de la stabilité par la méthode de Lyapunov	144
3. Stabilité des systèmes dynamiques discrets	146
4. Stabilité d'un système non linéaire et stabilité de son linéarisé	147
4.1. Stabilité d'un système linéaire par la méthode de Lyapunov	148
4.2. Étude de la stabilité d'un système non linéaire à partir de celle de son linéarisé tangent ou méthode indirecte de Lyapunov	150
5. Analyse des modèles linéaires d'état	152
5.1. Non-unicité de la représentation d'état	152
5.2. Solution de l'équation d'état et stabilité interne	154
5.3. Discrétisation exacte du modèle d'état et système pseudo-continu	155
5.4. Commandabilité et observabilité	158
Exercices du chapitre 5	159

Chapitre 6

Diagnostic à base de modèles

1. Les principes de base du diagnostic	163
1.1. De la maintenance préventive au diagnostic	163
1.2. Du principe de cohérence au problème des connaissances	166
1.3. Quelques définitions et structure générale d'un système industriel	168
1.4. Les différentes étapes du diagnostic d'un système	170
1.5. Classification des méthodes de diagnostic	172
2. Diagnostic quantitatif	173
2.1. Principe du diagnostic quantitatif	174
3. Synthèse du générateur de résidus	180
3.1. Approche par espace de parité	180
3.2. Approche à base d'observateurs	185
4. Évaluation des résidus	192
4.1. Étape de détection	192
4.2. Étape de localisation	193
Exercices du chapitre 6	194

Chapitre 7

Diagnostic basé sur l'exploitation des historiques de fonctionnement

1. Diagnostic qualitatif et reconnaissance de formes	199
1.1. Principe de la reconnaissance de forme	200
1.2. Application au diagnostic des systèmes	201
2. Synthèse de la fonction de classification	205
2.1. Approche probabiliste	206
2.2. Approche neuronale	210
2.3. Approche floue	214
3. Surveillance, diagnostic des systèmes et fiabilité dynamique	223
3.1. Fiabilité résiduelle évaluée en temps réel	223

3.2. Modèles de taux de défaillances proposés	225
3.3. Modèles de prévision du paramétrage de la fiabilité en temps réel .	226
3.4. Démarche bayésienne	228
3.5. Surveillance de système par la définition d'un spectre de bon fonctionnement et d'un critère de Fisher.	234
Exercices du chapitre 7.	242

Chapitre 8

Organisation d'un programme d'entretien prédictif

1. Détermination du type de maintenance pour chaque équipement	247
1.1. Corrélation de variables suivant une loi normale	249
1.2. Corrélation par rang	250
1.3. Classes de maintenance.	250
2. Sélection de l'instrumentation	253
2.1. Mesure des températures	254
2.2. Analyse de l'huile	255
2.3. Vérification des assemblages vissés par ultrasons	258
2.4. Analyse du bruit	258
2.5. Surveillance des vibrations	259
3. Prises de mesures régulières	259
4. Sélection des endroits de mesure.	259
5. Établissement des courbes de tendance	262
6. Établissement des niveaux d'alarme.	262
6.1. Niveau de référence	265
6.2. Niveaux d'alarme	266
7. Périodicité de la mesure	267
7.1. Détermination du temps de remplacement des équipements	267
8. Diagnostic du défaut	269
9. Correction de la faute	270
Exercices du chapitre 8.	270

Chapitre 9

Détection des défaillances de machines par surveillance vibratoire

1. Les vibrations mécaniques comme aide au diagnostic d'endommagement	275
2. Analyse spectrale	277
3. Types de descripteurs des vibrations	280
3.1. Définition d'un mouvement vibratoire harmonique	280
3.2. Définitions de déplacement, vitesse et accélération	281
3.3. Choix entre déplacement, vitesse et accélération	282
3.4. Les unités de vibration	284
4. Descripteurs scalaires	285
4.1. Valeur de crête	285

4.2. Valeur de crête à crête	285
4.3. Valeur moyenne	285
4.4. Valeur efficace	286
4.5. Facteur de crête	286
4.6. Kurtosis	288
4.7. Facteur d'impact	288
4.8. Facteur de forme	288
4.9. Décibel	288
5. Analyse dans le domaine temporel et fréquentiel	289
5.1. Analyse en fréquence	289
5.2. Analyse dans le domaine temporel	293
6. Principe de fonctionnement d'un accéléromètre	294
6.1. Principes de conception d'un accéléromètre	296
6.2. Amplification du signal	298
6.3. Gamme de fréquences des accéléromètres	298
6.4. Méthodes de montage de l'accéléromètre	299
6.5. Câblage	303
Exercices du chapitre 9	304

Chapitre 10

Établissement des niveaux d'alarme

1. Détermination de la gravité d'après le niveau global	309
1.1. Sévérité des vibrations en fonction de la puissance de la machine	310
1.2. Gravité des vibrations par mesurage sur palier fixe selon ISO 10816	311
1.3. Gravité des vibrations par mesurage sur rotor en rotation selon ISO 7919 (2005)	313
1.4. Gravité des vibrations selon la norme canadienne CDA/MS/NVHS107	315
1.5. Gravité des vibrations selon l'expérience	316
2. Établissement des niveaux d'alarme selon un critère relatif	318
3. Politique d'établissement des niveaux d'alarmes	319
4. Suivi de l'évolution du facteur de crête ou du kurtosis	319
4.1. Facteur de crête	319
4.2. Kurtosis	320
5. Établissement des niveaux de sévérité en fonction de la fréquence	321
5.1. Établissement des niveaux de sévérité en fonction de la fréquence pour des machines courantes	321
5.2. Établissement des niveaux de sévérité en fonction de la fréquence pour des machines-outils	322
5.3. Suivi des vibrations en bande fine	322
5.4. Établissement des alarmes selon des gabarits de fréquence	325
Exercices du chapitre 10	333

Chapitre 11

Synthèse du diagnostic de défaillances

1. Diagnostic des défaillances 347

Exercices du chapitre 11 356

Références bibliographiques 365

Index 373

Introduction

Cette partie introductive, présente le sujet et l'organisation de l'ouvrage, ainsi que les objectifs.

1. HISTORIQUE

1.1. Fiabilité

De tout temps l'homme a sans doute voulu construire des choses fiables. Mais les évaluations quantifiées, probabilisées ont vu le jour récemment d'abord pour de grands systèmes, militaire, spatial, nucléaire, puis l'automobile et les biens d'équipements. On peut citer que dès 1906 les constructeurs de tubes à vides américains se sont préoccupés de fiabilité. À cette même époque, les premières études sur les roulements à billes sont apparues. Après la seconde guerre mondiale, le département américain de la défense initie le développement d'études de fiabilité sur les tubes électroniques, puis sur les composants avec la « MIL STD 441 ». Les FMEA (Failure Modes Effects and criticality Analysis), voient le jour à cette époque. En 1961 Bell Telephon développe les arbres de défaillances, le groupe de recherche AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment) s'intéresse aux composants électroniques. La fiabilité du logiciel voie le jour un peu plus tard vers les années 1980, on cite (Software Reliability: an historical perspective, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. R3 n° 1, avril 1984, de M.L. Shoomann). Un grand nombre d'ouvrages, de journaux scientifiques, de manifestations sont consacrés à cette discipline, on citera les colloques européen et internationaux, ESREDA (European Safety RELiability and Data Association), ESREL (European Safety and RELiability conference), ICOSSARD (International Conference for Structural Safety and Reliability), ICASP (International Conference on Application of Statistics and Probability), Qualita, Colloque Fiabilité et Maintenabilité $\lambda\mu$, puis au USA RAMS, (Reliability, Avaibility, Maintenability, Safety).

1.2. Diagnostic, et surveillance des systèmes

Avec la croissance des systèmes à risques, centrales nucléaires, installation de gaz, aéronautique, il devient impératif de surveiller, identifier et diagnostiquer toutes variations de comportement. Le diagnostic contemporain intègre toutes ces exigences. Dès le début de l'ère industrielle, la sûreté de fonctionnement des installations a été une préoccupation majeure. Ce n'est qu'avec l'avènement des calculateurs que l'on a pu assister à un réel développement des techniques de diagnostic. C'est ainsi que les méthodes de surveillance à base de modèles ont été introduites

dès le début des années 1970 (Mehra et Peshon 71 ; Jones 73 ; Clark 1975 ; Willski 1976). Les contributions suivantes dans ce domaine ont permis la prise en compte des incertitudes de modèle (Zames 1981 ; Chow et Willski 1984 ; Frank 1990 ; Chen 1999 ; Patton 2000) conduisant ainsi à une meilleure robustesse des techniques de diagnostic.

1.3. Maintenance et prédictif

De tout temps l'homme a eu à maintenir les systèmes techniques qu'il a créé, cependant ce sont ces dernières décennies qui ont vu cette discipline prendre un ampleur considérable en effet les technologies devenant plus sophistiquées induisent de ce fait plus de difficultés pour prévoir la défaillance. Des méthodes nouvelles ont vu le jour, notamment celles basées sur les analyses d'indicateurs physiques. L'analyse vibratoire en est un exemple pertinent. C'est pour cette raison que cette technique a été particulièrement développée dans l'ouvrage.

1.4. Les systèmes complexes

Les systèmes actuels font souvent appel à plusieurs technologies (mécatroniques) et plusieurs métiers. Ils sont en général développés par des équipes. Ces systèmes sont complexes, pour être appréhendés correctement une démarche relevant de la systémique doit être suivie. L'approche systémique se fonde sur quatre concepts de base (les concepts de complexité, de globalité, de système, d'interaction) et une dizaine d'autres complémentaires.

Complexité : cela conduit à prendre comme hypothèse que les méthodes analytiques sont insuffisantes pour résoudre le système.

Système : interaction de composants dans le but d'assurer une ou plusieurs fonctions d'intérêt.

Globalité : elle exprime la cohérence et l'interdépendance des éléments du système. Le système vaut plus que la simple somme de ses constituants.

Interaction : il traduit la relation entre les composants du système par un flux d'échange d'information, d'énergie, de matière.

Les systèmes techniques contemporains sont multitechnologies (mécaniques, électronique, informatique enfin mécatronique), de ce fait un certain nombre d'interactions entre les défaillances des composants coexistent et rendent ainsi le système complexe. Ces systèmes sont hybrides (phénomène continu et discret), dynamique (changements d'états dans le temps, modification de l'environnement et donc de la dégradation), reconfigurable (tolérance aux fautes, redondances), ceci ajoute encore de la difficulté pour la modélisation de la fiabilité de tels systèmes.

1.5. Concept de la fiabilité et maintenance dynamique

Le concept de fiabilité dynamique concerne l'évaluation de la fiabilité d'un système qui évolue au cours du temps, en particulier au niveau de sa structure. Cette évaluation peut être faite « a priori » dans la phase de conception, on parle alors de fiabilité dynamique prévisionnelle, mais elle peut aussi être réalisée « a posteriori » en phase opérationnelle, on parle alors de fiabilité dynamique opérationnelle. C'est cette dernière définition qui intéresse la maintenance dynamique en particulier. En effet l'évaluation

en temps réel de la fiabilité résiduelle à une conséquence directe sur les périodes de changement préventif, de révision, (modification des Time between overhaul, TBO). Ces TBO contribuent directement au coût de maintenance par unité d'usage.

1.6. Les études de fiabilité et maintenance dans le processus industriel

La fiabilité et la maintenance se complètent pour garantir un niveau élevé de service et de sécurité malgré le vieillissement, l'usure, les dégradations inhérents à tout système technique. La fiabilité s'organise sous trois formes, prévisionnelle, expérimentale et opérationnelle. Plus on agit en amont (fiabilité prévisionnelle), plus on est efficace. La maintenance est pratiquée lors de l'exploitation du système, mais elle peut être pensée lors de la conception, notamment en concevant des systèmes plus maintenable.

- **La fiabilité prévisionnelle** : elle consiste à prévoir la fiabilité dès le début de projet à partir d'une analyse qualitative et/ou quantitative. Elle s'exécute dès la première phase du projet sous forme de prévisions succinctes (Part count method), puis de façon plus détaillée lorsque la définition des composants est réalisée (Part stress analysis method). Elle permet ainsi de prendre des orientations optimums en matière de conception.
- **La fiabilité expérimentale** : elle consiste à quantifier la fiabilité à partir d'essais ou calculs. Dès que l'on dispose de pièces prototypes, il est possible de réaliser des essais dits de robustesse pour connaître les faiblesses de conception du produit. Lorsque le produit est suffisamment robuste des essais de quantification ou de validation de la fiabilité sont réalisés.
- **La fiabilité opérationnelle** : elle consiste à évaluer la fiabilité en service à partir de données du retour d'expérience REX. Elle se pratique dès les premières mises en service et permet ainsi de corriger des défauts de conception et de process.
- **Maintenance** : elle consiste à mettre en œuvre un certain nombre d'actions préventives et correctives afin de garantir les performances du système.
- **Maintenabilité** : elle consiste à rendre maintenable un système, notamment en prenant en réduisant la durée de la maintenance corrective et préventive en concevant des systèmes facilement réparables.

◆ Processus industriel

Il est constitué d'un ensemble d'étapes, qui s'enchaînent. Elles sont parfois imbriquées pour gagner en délai. Ces actions doivent être réalisées dès le processus de conception, en effet elles sont plus efficaces en début de développement.

2. PRÉSENTATION DES CONCEPTS OUTILS ET MÉTHODES DÉVELOPPÉES DANS CET OUVRAGE

Les présentations faites dans le premier chapitre concernent la mesure de la performance d'un point de vue probabiliste et déterministe des grandeurs de fiabilité, maintenabilité, disponibilité et maintenance des composants et systèmes techniques.

Ces mesures et évaluations trouvent des développements naturels dans les chapitres suivant sur la fiabilité et l'approche stochastique des systèmes. Ce qui est une étape importante dans le diagnostic, la surveillance et le maintien dynamique des systèmes. Les développements du deuxième chapitre sur la fiabilité des systèmes à partir de l'approche stochastique présentée permettent d'évaluer la probabilité de bon fonctionnement des systèmes complexes et multitechnologies non réparables. Les diverses configurations et agencement des composants sont détaillés, ce qui permet de représenter et d'évaluer d'un point de vue fiabiliste, tous les systèmes industriels. Cette mesure de la performance est essentielle dans la surveillance, le diagnostic, la fiabilité et la maintenance dynamique des systèmes.

Ce troisième chapitre est une suite du deuxième pour les systèmes réparables. Il concerne la fiabilité des systèmes à partir de l'approche stochastique avec pour objectif de permettre d'évaluer la probabilité de bon fonctionnement des systèmes complexes, multitechnologies de types industriels. Cette mesure de la performance est essentielle dans la surveillance, le diagnostic, la fiabilité et la maintenance. Elle est un bon indicateur pour détecter les points faibles et prendre des décisions optimums. Les concepts, méthodes et outils présentés sont relativement exhaustifs et utilisés sous l'angle du praticien, avec pour objectif leurs mises en œuvre dans les différentes phases du processus industriel (conception, évaluation et maintenance du système).

Le quatrième chapitre approfondi la notion de système. Chaque fois que l'on sera capable, sur une entité donnée, de distinguer des entrées et des sorties liées par causalité nous avons un système. Le terme de causalité indique qu'une action sur les entrées engendre une réaction sur les sorties. Cette définition de système est donc très générale et peut s'appliquer pratiquement à tout ce qui nous entoure. Nous abordons dans ce chapitre des systèmes réalisés par l'homme, c'est-à-dire conçus pour réaliser une fonction, dite principale recherchée.

Le cinquième chapitre aborde la théorie de la stabilité qui revêt une importance capitale pour l'étude des systèmes dynamiques. Elle inclut en effet, un ensemble de méthodes permettant d'étudier les propriétés de la solution de l'équation d'état sans avoir à la résoudre. Le problème de la stabilité consiste à étudier le comportement d'un système donné après qu'il ait subi une perturbation venant l'écarter du point d'équilibre autour duquel il évoluait. Cette notion sera particulièrement étudiée.

Le chapitre six concerne le diagnostic à base de modèles. La complexité sans cesse croissante des systèmes techniques s'est accompagnée d'une demande toujours plus forte de la disponibilité et de la sécurité des installations industrielles. Il est en effet financièrement inutile de concevoir des installations sans cesse plus complexes, si celles-ci doivent régulièrement tomber en panne et présenter un danger pour les personnes, l'environnement et les biens. L'accroissement de la disponibilité peut être obtenu par une amélioration de la fiabilité des unités fonctionnelles mais aussi par la mise en oeuvre d'une stratégie de maintenance adaptée à l'installation étudiée et en particulier le diagnostic et la surveillance.

Le chapitre sept concerne les méthodes de diagnostic quantitatives. Elles reposent sur l'utilisation d'un modèle mathématique de l'installation étudiée. Toutefois, l'obtention d'un modèle global est quelquefois difficile à obtenir en raison de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. On peut alors avoir recours aux méthodes de diagnostic qualitatif. Dans ce cas, les connaissances utilisables reposent alors sur le savoir d'experts et sur un ensemble de données issues de l'installation à surveiller. Suivant ce type d'approche, on trouve l'ensemble des méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA). Nous développons ces concepts dans cette partie.

Le chapitre 8 concerne la maintenance conditionnelle. Il est en grande partie consacré à la description des procédures et programmes d'entretien prédictif. La maintenance prédictive des systèmes est une méthode de contrôle des équipements pour déterminer les conditions de fonctionnement avant défaillance sans endommagement trop important. Il y est fait mention des normes ISO 17359 qui établissent des lignes directrices relatives aux procédures générales à envisager lors de l'élaboration d'un programme de surveillance. Les étapes de mise en place de ce type de maintenance sont développées dans cette partie.

Le chapitre 9 intitulé « détection des défaillances de machines par surveillance vibratoire », concerne les techniques de vibrations mécaniques au service du diagnostic et de la surveillance. Malgré les évolutions techniques faites pour réduire bruits et vibrations, toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, même très faibles. Cette vibration est le résultat des forces d'action sur les structures mécaniques, toute modification ou accroissement des forces d'action dû à l'apparition d'une défaillance, provoquera un accroissement de l'amplitude des vibrations. Le principe de l'interaction entre les défaillances, la vibration et les forces en jeu est particulièrement analysé dans cette partie, afin d'être maîtrisé pour la détection des défaillances. En particulier, les dégradations des mécanismes et l'usure affectent principalement les organes des machines (*roulements, balourd, échauffement, lignage, serrage, etc.*). Les conditions de service de la machine ainsi que les forces d'action seront donc modifiées, ce qui a pour effet d'accroître le niveau de vibration, et ainsi de permettre la maintenance prédictive.

Le chapitre 10 concerne l'établissement des niveaux d'alarme. La gravité d'une dégradation évaluée à partir des vibrations s'estime soit selon un niveau vibratoire global ou dans le domaine fréquentiel, soit selon un niveau relatif à la machine considérée. La gravité de la dégradation sert de positionnement aux niveaux d'alarme. Pour évaluer ces niveaux d'alarme et de définir l'usure d'une machine, il est nécessaire de connaître les niveaux de vibration limites qui correspondent à l'état de celle-ci. Cette partie donne des réponses aux questions posées concernant les niveaux d'alarme et de surveillance.

Enfin au onzième chapitre nous trouvons une synthèse des méthodes pour réaliser un diagnostic de défaillances, à partir de la surveillance des vibrations. Cela consiste à d'abord à identifier les fréquences présentes dans le signal de vibration, puis à corréler ces fréquences aux vitesses des mécanismes en jeu. Ce travail difficile sera particulièrement développé.



Permettre de concevoir, développer et utiliser des systèmes de diagnostic, de surveillance et de maintenance prédictive pour systèmes complexes (avions, centrales nucléaires, transport, etc.), afin d'optimiser les performances de la sûreté de fonctionnement : tel est l'objectif de cet ouvrage. Pour cela **Fiabilité, diagnostic et maintenance prédictive des systèmes** s'appuie sur la modélisation des systèmes (parties commandes et opératives), l'évaluation probabiliste et déterministe du fonctionnement, et la conception de systèmes de surveillance.

Cet ouvrage fait le lien entre le diagnostic, la maintenance et la fiabilité des systèmes techniques, du plus simple au plus complexe. Son approche novatrice et sa présentation en font un véritable **guide théorique et pratique** pour les ingénieurs qui pourront y trouver la réponse à de nombreux problèmes de diagnostic, de surveillance et de maintenance, en particulier grâce à l'analyse vibratoire.

Très didactique et accompagné de 100 exercices et problèmes résolus reflétant des situations concrètes, il présente les concepts de base pour concevoir et développer correctement des outils ou des systèmes de diagnostic et de maintenance conditionnelle (prédictive) indispensables aux ingénieurs ou aux élèves ingénieurs en génie industriel, génie mécanique, robotique ou sûreté de fonctionnement dans les domaines les plus variés.

Patrick LYONNET et **Rosario TOSCANO** sont professeurs des universités à l'École nationale d'ingénieurs de Saint-Étienne.

Marc THOMAS est professeur à l'École de technologie supérieure de Montréal.

www.lavoisier.fr



978-2-7430-1385-1