

---

# Fiabilité mécanique appliquée

*études de cas concrets*

Ammar Grous

 **hermes**

*Lavoisier*

---

Fiabilité mécanique appliquée

© 2013, Lavoisier, Paris

[www.hermes-science.com](http://www.hermes-science.com)  
[www.editions.lavoisier.fr](http://www.editions.lavoisier.fr)

ISBN 978-2-7462-3929-6

---

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective" et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite" (article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Tous les noms de sociétés ou de produits cités dans cet ouvrage sont utilisés à des fins d'identification et sont des marques de leurs détenteurs respectifs.

# Fiabilité mécanique appliquée

*études de cas concrets*

Ammar Grous

**hermes**  
**Science**  
—publications—

*Lavoisier*



# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	13
<b>Chapitre 1. Mécanismes de rupture par fatigue</b> . . . . .	21
1.1. Introduction. . . . .	21
1.2. Principaux mécanismes physiques de fissuration par fatigue. . . . .	22
1.2.1. De la mécanique de la rupture . . . . .	22
1.2.2. Rappel succinct du critère de rupture (plasticité), en mécanique . . . . .	25
1.2.2.1. Rappel du critère de limite élastique de Tresca (1864). . . . .	26
1.2.2.2. Rappel du critère de limite élastique de Von Mises (1913). . . . .	27
1.3. Modes de rupture . . . . .	29
1.3.1. Exercice d'application (TD). . . . .	32
1.4. Fatigue des métaux. Expressions analytiques utilisées en fiabilité . . . . .	34
1.4.1. Loi de Wöhler . . . . .	34
1.4.2. Loi de Basquin (1910) . . . . .	36
1.4.3. Loi de Stromayer (1914). . . . .	36
1.4.4. Loi de Palmgren. . . . .	37
1.4.5. Loi de Corson (1949). . . . .	37
1.4.6. Loi de Bastenaire . . . . .	38
1.4.7. Loi de Weibull. . . . .	38
1.4.8. Loi d'Henry . . . . .	39
1.4.9. Loi de Corten et Dolen. . . . .	39
1.4.10. Loi de Manson-Coffin . . . . .	40
1.5. Modèles fiabilistes usités en mécanique de la rupture par fatigue . . . . .	43
1.5.1. Modèle de Coffin-Manson pour analyser la propagation des fissures. . . . .	45

1.5.2. Relation de Neuber (1958) . . . . .	46
1.5.3. Modèle d'Arrhenius . . . . .	48
1.5.4. Loi de Miner (1954) . . . . .	50
1.6. Principales lois usuelles retenues par la mécanique de rupture. . . . .	52
1.6.1. Loi de Fost et Dugdale . . . . .	54
1.6.1.1. Loi de Mc Evily (1979) . . . . .	54
1.6.1.2. Loi de Paris . . . . .	56
1.6.1.3. Facteurs de concentration de contrainte . . . . .	58
1.6.1.4. Loi de G.R. Sih . . . . .	60
1.7. Facteurs d'intensité de contrainte ( <i>f.i.c.</i> ) en mécanique de rupture . . . . .	61
1.7.1. Modèle de Maddox . . . . .	61
1.7.2. Modèle de B. Gross et J.E. Srawley . . . . .	62
1.7.3. Modèle de Lawrence . . . . .	62
1.7.4. Modèle de Martin et Bousseau . . . . .	64
1.7.5. Modèle de T.R. Gurney . . . . .	64
1.7.6. Modèle de M.K. Engesvik . . . . .	65
1.7.7. Modèle de K. Yamada et P. Albrecht . . . . .	66
1.7.8. Modèle de S. Tomkins et P.M. Scott. . . . .	67
1.7.9. Modèle de J.D. Harrison . . . . .	67
1.8. Paramètres intrinsèques du matériau (C et m) . . . . .	68
1.9. Eléments de la mécanique de la rupture utilisés en fiabilité . . . . .	69
1.10. Vitesse de fissuration (durée de vie) et <i>f.i.c.</i> ( $K_{\sigma}$ ) . . . . .	73
1.10.1. Loi de Taylor simplifiée en techniques d'usinage . . . . .	76
1.11. Eléments de la théorie de la contrainte (S) et de la résistance (R) . . . . .	77
1.11.1. Etude de cas, partie 2 : pont suspendu (Cirta). . . . .	78
1.11.2. Etude de cas : surface de rupture des matériaux géotechniques . . . . .	80
1.12. Conclusion . . . . .	86
1.13. Bibliographie . . . . .	87

<b>Chapitre 2. Encadrement des probabilités de rupture par des bornes simples . . . . .</b>	<b>91</b>
2.1. Introduction. . . . .	91
2.1.1. Bornes du premier ordre ou bornes simples : systèmes en série . . . . .	92
2.1.2. Bornes du premier ordre ou bornes simples : systèmes en parallèle. . . . .	92
2.2. Bornes du second ordre ou bornes de Ditlevsen . . . . .	92
2.2.1. Evaluation de la probabilité d'intersection de deux événements . . . . .	93

2.2.2. Estimation de la loi multinormale : distribution normale . . . . .	96
2.2.3. Distribution binormale . . . . .	97
2.2.4. Approximation de $\phi_2$ (cas de $m \geq 3$ ) . . . . .	98
2.3. Méthode de M. Hohenbichler . . . . .	100
2.4. Test d'hypothèse, par l'exemple, d'une moyenne normale de variance inconnue . . . . .	103
2.4.1. Développement et calculs . . . . .	104
2.5. Intervalle de confiance pour l'estimation d'une moyenne normale : variance inconnue . . . . .	107
2.6. Conclusion . . . . .	107
2.7. Bibliographie . . . . .	108

### Chapitre 3. Analyse de la fiabilité des matériaux et des structures

<b>par l'approche bayésienne . . . . .</b>	<b>111</b>
3.1. Introduction à la méthode bayésienne utilisée pour évaluer la fiabilité . . . . .	111
3.2. Modèles de distributions postérieures et conjugués . . . . .	112
3.2.1. Evènements indépendants . . . . .	115
3.2.2. Diagramme de dénombrement . . . . .	119
3.3. Probabilités conditionnelles ou loi de Bayes . . . . .	123
3.4. Distributions antérieures et postérieures . . . . .	127
3.5. Analyse fiabiliste par la méthode des moments, FORM/SORM . . . . .	130
3.6. Marges de contrôles sur les résultats de la mécanique de rupture . . . . .	131
3.7. Modèle bayésien des distributions gamma et exponentielle . . . . .	134
3.8. Processus homogène de Poisson (HPP) et taux de réparation (ROCOF) . . . . .	137
3.9. Estimation du maximum de vraisemblance . . . . .	137
3.9.1. Modèle exponentiel censuré de type I . . . . .	138
3.9.2. Estimation de la MTBF (ou la réparation taux/taux de défaillance) . . . . .	138
3.9.3. MTBF et intervalle de confiance . . . . .	138
3.10. Taux de réparation ou ROCOF . . . . .	142
3.10.1. Loi de puissance : processus poissonien non homogène (NHPP, <i>Non-Homogeneous Poisson Process</i> ) . . . . .	143
3.10.2. Loi de distribution Gamma (rappel) . . . . .	144
3.10.3. Modèle bayésien, de la distribution gamma <i>a priori</i> . . . . .	147
3.10.4. Tests de distribution de vie exponentielle (ou modèle HPP) . . . . .	149
3.10.5. Procédure bayésienne pour le modèle de système exponentiel . . . . .	151

3.10.5.1. Loi Gamma (Erlang), fonction de répartition $F(\tau, \lambda)$ . . . . .	151
3.10.5.2. Densité de probabilité de la loi d'Erlang (Gamma particulière) . . . . .	152
3.10.5.3. Fiabilité de la loi d'Erlang (Gamma) . . . . .	153
3.10.5.4. Densité de probabilité d'une loi exponentielle appliquée en fiabilité. . . . .	153
3.10.5.5. Estimation de la MTBF (bornes d'encadrement) sur la base de la distribution gamma, <i>a posteriori</i> . . . . .	154
3.11. Etude de cas bayésien appliqué en mécanique de la rupture . . . . .	156
3.12. Conclusion . . . . .	164
3.13. Bibliographie . . . . .	164

**Chapitre 4. Eléments d'analyse de la fiabilité des composants**

**par les chaînes de Markov . . . . . 167**

4.1. Introduction. . . . .	167
4.2. Application des chaînes de Markov au modèle de la fatigue . . . . .	168
4.3. Etude de cas à l'aide des chaînes de Markov au modèle de la fatigue . . . . .	171
4.4. Conclusion . . . . .	183
4.5. Bibliographie. . . . .	184

**Chapitre 5. Les indices de fiabilité. . . . . 187**

5.1. Introduction. . . . .	187
5.2. Conception à la fiabilité des matériaux et des structures . . . . .	189
5.2.1. Fiabilité des matériaux et des structures. . . . .	190
5.3. Méthode FORM ( <i>First Order Reliability Method</i> ). . . . .	193
5.4. Méthode SORM ( <i>Second Order Reliability Method</i> ) . . . . .	194
5.5. Indice de fiabilité de Cornell. . . . .	195
5.6. Indice de fiabilité de Hasofer-Lind . . . . .	197
5.7. Fiabilité des composants des matériaux et des structures . . . . .	200
5.7.1. Fiabilité des systèmes en parallèle et en série . . . . .	201
5.7.1.1. Système parallèle. . . . .	202
5.7.1.2. Système parallèle m/n . . . . .	202
5.7.2. Système de montage en série . . . . .	202
5.8. Conclusion . . . . .	208
5.9. Bibliographie. . . . .	208

<b>Chapitre 6. Méthodes fiabilistes des critères de rupture par l'intégrale indicatrice du dommage</b> . . . . .	211
6.1. Introduction. . . . .	211
6.2. Revue bibliographique de la méthode de l'intégrale indicatrice du dommage . . . . .	215
6.2.1. Rappel succinct de la méthode FORM/SORM. . . . .	216
6.2.1.1. Cas de la méthode FORM. . . . .	217
6.2.1.2. Cas de la méthode SORM. . . . .	217
6.2.2. Rappel succinct de la méthode de l'indice de Hasofer-Lind . . . . .	217
6.3. Revue de travaux de recherche sur l'approche probabiliste des paramètres de la loi de fissuration en région II de la loi de Paris. . . . .	218
6.4. Propagation de la fissure par un modèle classique de la fatigue . . . . .	220
6.5. Calculs fiabilistes par la méthode de l'intégrale indicatrice du dommage . . . . .	227
6.5.1. Hypothèse et dessin de définition de la structure soudée en croix . . . . .	228
6.6. Résumé . . . . .	230
6.7. Bibliographie. . . . .	232
 <b>Chapitre 7. Simulation de Monte-Carlo</b> . . . . .	 237
7.1. Introduction. . . . .	237
7.1.1. De l'origine de la méthode de Monte-Carlo d'abord ! . . . . .	237
7.1.2. De la terminologie, ensuite.... . . . .	238
7.2. Simulation d'une variable singulière d'une gaussienne . . . . .	242
7.2.1. Simulation d'une variable non gaussienne . . . . .	242
7.2.2. Simulation de variables corrélées gaussiennes . . . . .	242
7.2.3. Simulation de variables corrélées non gaussiennes . . . . .	243
7.3. Détermination des indices de sécurité par la simulation de Monte-Carlo . . . . .	244
7.3.1. Présentation et discussions de nos résultats expérimentaux . . . . .	247
7.3.2. Utilisation de la table de nombres tirés au hasard . . . . .	248
7.4. Techniques mathématiques appliquées pour la génération de nombres aléatoires par la simulation de MC sur quatre lois statistiques principales . . . . .	253
7.4.1. Loi uniforme . . . . .	253
7.4.2. Loi de Laplace-Gauss . . . . .	254
7.4.3. Loi exponentielle . . . . .	254
7.4.4. Contrôle de la valeur initiale . . . . .	255
7.5. Conclusion . . . . .	264
7.6. Bibliographie. . . . .	265

<b>Chapitre 8. Etudes de cas</b> . . . . .	269
8.1. Introduction. . . . .	269
8.1.1. Indicateurs de fiabilité ( $\lambda$ ) et MTBF . . . . .	269
8.1.1.1. Modèle de montage en parallèle . . . . .	269
8.1.1.2. Modèle de montage en série . . . . .	270
8.2. Modèle parallèle ou redondant . . . . .	271
8.2.1. Fiabilité et redondance structurale. Systèmes sans réparation . . . . .	273
8.2.1.1. Modèle en série. . . . .	273
8.2.1.2. Taux de rupture constant . . . . .	274
8.2.1.3. Fiabilité des systèmes sans réparation : modèle en parallèle. . . . .	277
8.3. Applications de la fiabilité sur les cas de systèmes redondants . . . . .	282
8.3.1. Redondance active totale . . . . .	285
8.3.2. Redondance active partielle . . . . .	287
8.4. Fiabilité et disponibilité des systèmes réparables. . . . .	291
8.5. Assurance qualité en fiabilité . . . . .	297
8.5.1. Analyse prévisionnelle de la fiabilité . . . . .	298
8.6. Distribution de Birnbaum-Saunders pour la propagation des fissures . . . . .	302
8.7. Calcul de la fiabilité aux âges ( $\tau$ ) en heures de service, $R_i(\tau) = ?$ . . . . .	303
8.8. Méthodes de simulation en fiabilité mécanique des matériaux et des structures : méthode de simulation de Monte-Carlo (MC) . . . . .	308
8.8.1. Loi de Weibull. . . . .	310
8.8.2. Loi Log-Normale (de Galton). . . . .	311
8.8.3. Loi exponentielle . . . . .	311
8.8.4. Génération de nombres aléatoires . . . . .	312
8.8.4.1. Loi uniforme . . . . .	312
8.8.4.2. Loi normale . . . . .	313
8.8.4.3. Loi exponentielle. . . . .	313
8.8.5. Contrôle de la valeur initiale . . . . .	314
8.8.6. Estimation de la probabilité de Monte-Carlo (MC) . . . . .	316
8.9. Eléments de sécurité <i>via</i> le couple (R, S) : résistance et contrainte . . . . .	317
8.10. Essais de fiabilité. . . . .	319
8.10.1. Maîtrise des risques et efficacité en fiabilité mécanique . . . . .	321
8.10.1.1. Essais tronqués . . . . .	324
8.10.1.2. Essais censurés . . . . .	325
8.10.1.3. Plan d'essai . . . . .	325
8.10.1.4. Coefficients du plan d'acceptation de l'essai. . . . .	329
8.10.1.5. Plan de rejet de l'essai (dans les mêmes conditions) . . . . .	330
8.10.2. Plan d'essai en fiabilité et test de K. Pearson $\chi^2$ . . . . .	332

8.11. Application de la fiabilité aux réducteurs de vitesse (engrenages) . . .	333
8.11.1. Exemple d'application aux moteurs hydrauliques . . . . .	335
8.11.1.1. Durée de vie des roulements . . . . .	337
8.12. Etude de cas de fiabilité de colonnes sollicitées en flambage. . . . .	338
8.12.1. Position du problème et solution probabiliste (fiabilité et erreur) . . . . .	342
8.12.1.1. Erreur standard de la différence, estimée : s . . . . .	343
8.12.2. Rejet de l'hypothèse nulle si $ t  > T$ (?) . . . . .	343
8.13. Ajustement des moindres carrés (MC) de fonctions non linéaires . . .	344
8.14. Conclusion . . . . .	347
8.15. Bibliographie . . . . .	348
<b>Annexes</b> . . . . .	351
<b>Glossaire</b> . . . . .	367
<b>Liste des abréviations utilisées</b> . . . . .	377
<b>Index</b> . . . . .	379



# Avant-propos

## **Fiabilité et incertitudes des composants**

*Fiabilité mécanique appliquée* s'adresse aux techniciens, ingénieurs, concepteurs, étudiants et enseignants des disciplines des sciences de l'ingénieur et des métiers. Le principal objectif visé est l'évaluation succincte des indicateurs de la qualité et de la fiabilité comme outils d'aide à la décision. Nous préconisons, pour cela, une approche *intuitive* et pratique fondée sur la rigueur mathématique.

Cet ouvrage présente les bases fondamentales des traitements de données tant en contrôle de qualité qu'en fiabilité mécanique des matériaux et des structures. Les résultats de laboratoires et de travaux dirigés sont discutés en conformité avec le processus technologique inhérent à la matière traitée. Nous discutons et interprétons aussi la conformité des processus de fabrication en lien causal avec les spécifications dimensionnelles et géométriques (GPS, de l'anglais : *Geometrical Product Specification*). C'est d'ailleurs la nouveauté pédagogique de cet ouvrage, en comparaison avec les louables publications ici consultées.

Nous abordons divers exemples issus de laboratoires encadrant ainsi la nouvelle organisation industrielle du travail. Aussi, nous utilisons les composants mécaniques issus de nos mécanismes réels, conçus et fabriqués par nos soins au laboratoire de Productique. La modélisation par éléments finis est alors le fait de cas réels de pièces usinées, contrôlées et assemblées (par soudage, entre autres) au laboratoire de métrologie dimensionnelle.

Nous traitons également de la fiabilité des composants mécaniques. Comme cette discipline a en commun les statistiques avec le contrôle de qualité, nous ajouterons tout simplement les indices de fiabilité et les discuterons en conformité avec l'emploi de la structure sujet de nos calculs.

Les scientifiques des écoles spécialisées et les entreprises se sont souvent intéressés à la qualité des mesures donc aux incertitudes de mesures. Ce sont, surtout, les entreprises dites avant-gardistes, c'est-à-dire l'aéronautique, l'automobile et le nucléaire, pour ne citer que celles-ci, qui accordèrent une importance allant crescendo à la *mesure juste*. Le contenu pédagogique de cet ouvrage se distingue essentiellement par les éléments suivants :

1) la rigueur des méthodes probabilistes qui supportent les traitements statistique-mathématique des données expérimentales ou simulées ;

2) la présentation de modèles de laboratoires diversifiés à suivre à la fin de chaque chapitre : partie nécessaire au support pédagogique pour :

- définir et justifier un objectif du contrôle de qualité et de fiabilité ;
- identifier les outils adaptés à la quantification de la fiabilité aux capacités ;
- interpréter les indicateurs de qualité (capabilité) et de fiabilité (indice de fiabilité) ;
- choisir le type de test d'adéquation des lois appliquées (justifiées ou *a priori*) ;
- identifier les moyens pour accélérer les essais et leurs limites ;
- analyser la qualité et la fiabilité des matériaux et des structures ;
- dimensionner et *tolérer* (GPS) les matériaux et les structures de conception.

### **... Et le calcul des incertitudes dans tout ça ?**

Le comportement à la rupture des structures est souvent caractérisé, sur le plan de la mécanique linéaire, par une variation locale des propriétés élastiques du matériau. Ce fait impose inéluctablement des calculs de dimensionnement visant à sécuriser les structures dont sont issues les matériaux. De très nombreux travaux ont été et continuent à être menés dans un très large éventail de disciplines allant du génie civil aux différentes variantes de la mécanique. Nous ne traitons point de la mécanique des milieux continus mais plutôt les lois probabilistes de la fissuration. Nous sommes conscients que certaines lois sont systématiquement reprises ici et là pour renseigner sur la fiabilité.

Des tests d'adéquation moins sévères confirmeraient l'hypothèse du modèle de propagation des fissures. Dans des domaines à haute valeur de sécurité comme les appareils de médecine (chirurgie et biomécanique), l'aviation, les centrales

nucléaires, pour ne citer que ces trois cas, il serait inacceptable de théoriser des concepts sans vérification. Les calculs fiabilistes y afférents doivent faire l'objet d'une rigueur extrêmement soutenue.

La définition des coefficients de sécurité constituait un élément important, voire majeur, pour le dimensionnement des structures. Cette définition coûte sans offrir une réelle assurance sur les prévisions de la sureté (non la sécurité). De nos jours, l'interprétation et la philosophie même de ces coefficients est renforcée par des calculs probabilistes de plus en plus précis. Les outils informatiques bien développés contribuent pour une grande part aux temps et aux efforts de calculs. Dans ce sens, nous utilisons des logiciels répandus dans les écoles (Auto Desk Inventor Pro et ANSYS, Math CAD, GUM et COSMOS).

Pour rationaliser le concept de la marche de fiabilité, de très nombreux travaux ont été faits, toutefois, on ne voit pas encore se dégager une « démarche unitaire » sur l'aspect de la mécanique de la rupture et sur celui probabiliste. Parmi les divers facteurs qui affectent ce non *consensus*, on trouve les facteurs imprévisibles qui provoquent aléatoirement l'amorçage de la fissure, sa propagation et le dommage qui en résulte. De nombreux chercheurs se sont penchés sur diverses méthodes déterministes et aléatoires. Il s'en est suivi des méthodes de simulations dont la plus répandue est celle de Monte-Carlo.

Dans ce volume 2<sup>1</sup>, nous présentons quelques applications numériques documentées afin d'aider les formateurs à présenter succinctement les problèmes probabilistes (fiabilité et/ou ruine). L'approche intuitive prend une part importante dans nos démarches de résolution de problèmes. De nombreux ouvrages et travaux louables ont été présentés dans différentes langues. Ces ouvrages traitent parfaitement bien mais séparément de la fiabilité, du contrôle de la qualité et des incertitudes. Or l'important c'est de vérifier les mesurages et bien encadrer le mesurande. Lord Kelvin notait ceci : « Il n'y a de science que du mesurable... ». Certes mesurer des grandeurs identifiées est une fonction incontournable dans les laboratoires. La validation théorique d'un phénomène physique passe, entre autres, par la *fiabilité de la mesure* et de ses effets sur la fonction allouée au matériau et/ou à la structure.

---

1. Cet ouvrage fait partie d'un ensemble de trois volumes publiés aux éditions Hermès (2013) :

- le volume 1 correspond à : *Eléments d'analyse de la fiabilité et du contrôle de qualité : statistiques appliquées par l'exemple* ;
- le volume 2 correspond à : *Fiabilité mécanique appliquée : études de cas concrets* ;
- le volume 3 correspond à : *Contrôle de qualité appliquée : études de cas et nouvelle organisation du travail*.

Les modèles (critères de rupture) de mécanique de la mécanique des milieux continus proposés au chapitre 1 constituent un travail de référence qu'on a exploité ici et là dans nos cas d'étude comme la loi de Paris-Erdogan, celle de Manson-Coffin, les courbes SN (courbes de Wöhler), la loi de Weibull (mécanique des solides), etc. On serait vraisemblablement tenté de s'interroger (à juste titre) sur l'opportunité de ce chapitre dans des ouvrages dédiés à la fiabilité. La raison est que ces critères sont délibérément ciblés. Nous les avons ici exploités pour éviter au lecteur de « s'éparpiller » dans les ouvrages spécialisés.

Il est absolument nécessaire d'établir une certaine *confiance* dans les résultats. En exergue, mesurer une grandeur ne se résume pas seulement à rechercher la valeur de cette grandeur. Il convient de lui associer une *incertitude* en vue de qualifier la *qualité* de la mesure. Nous présentons, dans le présent ouvrage, des exemples pédagogiques de laboratoires traitant des incertitudes (GUM : *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*).

### ***Pourquoi alors publier un autre ouvrage dédié à la fiabilité mécanique?***

Tout d'abord pourquoi un ouvrage qui traite des deux domaines (contrôle de qualité et fiabilité incluant les incertitudes) qui, *a priori*, semblent distincts ? La raison est que ces deux disciplines ont en commun les probabilités, les statistiques et une démarche proche et familière dans la description de l'hypothèse. En contrôle de qualité, souvent le procédé est déjà connu ou semble être maîtrisé au préalable d'où l'intervention des indices de capabilité (MSP ou SPC). Aussi, l'objectif vise parfois un phénomène de concurrence des produits manufacturés. La question de sécurité est présentée en termes secondaires. C'est plutôt en termes de maintenabilité et de durabilité que le contrôle de la qualité rejoint la fiabilité comme moyen d'assurer la fonction attribuée à un mécanisme, un composant ou un système en entier.

En fiabilité mécanique des matériaux et des structures, l'indice de fiabilité est en lui-même un indicateur renseignant sur la *sécurité*. Il est souvent très coûteux en temps de calculs et grave en matière de conséquence. L'élément commun aux deux disciplines demeure l'approche probabiliste. Des outils de probabilités et de statistique-mathématique sont nécessaires pour fournir les justifications théoriques des méthodes de calculs. Encore une fois, cet ouvrage se veut pragmatique et laisse une part appréciable à l'approche intuitive dans le domaine des hypothèses émises ici et là.

En dernière instance, nous présentons un glossaire succinct afin d'uniformiser la compréhension des termes utilisés en métrologie dimensionnelle (VIM = vocabulaire international de métrologie) et en fiabilité mécanique des structures. Cette façon

pédagogique de faire sert à « s'entendre » sur la terminologie internationale des vocables utilisés pour désigner un mesurande, un indice de fiabilité ou une définition succincte des coefficients de capabilité largement utilisés en contrôle de qualité.

En termes de sécurité, la fiabilité des composants (matériaux et structure, ensemble) constitue un domaine absolument incontournable.

Cette discipline qu'est la fiabilité s'impose tant en génie civil qu'en mécanique et électronique : elle est alors multiforme. Elle vise souvent l'estimation des fonctions de différentes phases du cycle de vie des composants, sujet à l'étude. Les utilisateurs de la fiabilité ont de plus en plus recouru aux logiciels reproductibles mais qui poseraient bien de difficultés selon que le composant est actif ou passif, la taille du retour d'expérience et sa validation impérative, les phénomènes qui tendent à réduire la probabilité de défaillance ou l'indice de fiabilité, etc.

Le présent ouvrage reprend certaines méthodes exploitées ici et là pour estimer la fiabilité opérationnelle ou celle ciblée. La controverse qui semblerait exister entre les approches probabilistes dites fréquentielles et celles de Bayes est, à notre humble sens, aplanie si on sait, *a priori*, poser le problème. L'encadrement de la probabilité de rupture (défaillance ou même la ruine) par de simples bornes mérite d'être exploité. Pour notre part, nous privilégions les calculs de la rupture par l'intégrale indicatrice du dommage, largement explicitée par les travaux de Madsen.

Comme l'estimation d'une fiabilité permet de comprendre les antécédents (histoire) pour mieux préparer le futur, on se doit de faire preuve de pragmatisme en mesurant les facteurs responsables de la plausible rupture. Comme la mesure est toujours entachée d'erreurs et d'incertitude, il est impératif d'inclure les calculs des incertitudes dans nos démarches fiabilistes, sans quoi, nos résultats seraient porteurs d'indécision.

*Du vocabulaire d'abord* : la terminologie utilisée en fiabilité (voir glossaire) lui est distinctement propre et, comme pour la métrologie, a des effets sur les termes utilisés. Pour ce faire, nous nous basons sur la norme EN 13306. On trouvera en annexes et au glossaire réduit, les définitions de : fiabilité, durabilité, défaillance et dégradation.

Les données de fiabilité sont nécessaires pour :

- hiérarchiser les composants → taux d'occurrence de chaque mode (AMDEC) ;
- identifier le mécanisme de dégradation en vue d'un retour éclairé d'expérience ;

- optimisation des maintenances préventive et corrective ;
- collecte des données efficaces et nécessaires au calcul correct des paramètres de fiabilité et surtout de leurs incertitudes.

La *validation et l'analyse* se font par l'examen du retour d'expérience relativement aux critères de défaillances critiques comme : les modes de défaillance, le taux de défaillance en fonctionnement (MTBF), la probabilité de défaillance à la sollicitation ( $P_s$ ) et son indice de fiabilité selon un « critère choisi », la durée de réparation et/ou d'indisponibilité des matériels, les intervalles de confiance et même la taille de l'échantillon.

Notons que la fiabilité est normalement prévue à partir de la conception, sur la base des cahiers de charges : elle est calculée et comparée à la fiabilité allouée (exigence de fiabilité). Elle inclut toutes les phases du cycle de vie (conception, fabrication, essais de développement).

Durant l'exploitation, la fiabilité prévue est calculée et comparée à un seuil (par exemple, taux de défaillance) comme : les calculs physiques, avec l'intention de la prolonger au-delà de la durée de vie prévue à la conception.

La métrologie constitue un domaine de mesure de la fiabilité laquelle est entachée d'incertitudes, d'où le calcul des incertitudes incluant l'étalonnage des instruments et appareils servant les mesurages.

Parmi les diverses difficultés qui s'imposent à la fonction fiabilité, on retient, entre autres, le type de composant (réparable ou non réparable, redondant actif ou passif) et même certaines controverses de méthodes ou de modèle (fréquentiel/bayésien).

Le type de composant peut être actif dont :

- divers mécanismes de dégradation avec différents modes de défaillance ;
- modélisation physique inconnue voire complexe ;
- fiabilité classique et fiabilité bayésienne parfois adaptées ;
- données incomplètes voire tronquées ;
- modélisation par une distribution gaussienne, une loi exponentielle, une loi de Weibull à deux et/ou à trois paramètres ou surtout par une loi de type Birnbaum-Saunders (c'est le cas fréquent de la rupture par fissuration – fatigue dans la zone II de la courbe de Ritchie – voir figures 1.2 et 1.17, chapitre 1).

Le type de composant peut être actif ou passif dont :

- un faible nombre de mécanismes de dégradation ;
- le type de dégradation : lente et/ou progressive ;
- les défaillances rares (voire aucune défaillance) ;
- modélisation physique de la dégradation : initiation et propagation de la fissure ;
- méthodes numériques (méthodes énergétiques, calculs intégrales, éléments finis) ;
- approche bayessienne pour des données de défaillance disponibles.

Selon qu'on est physicien, mathématicien-statisticien pratique ou simple ingénieur, parfois, dans bien des écoles de pensées, des « controverses » apparaissent au sujet de la méthode ou le modèle (fréquentiel/bayessien). Dans le cadre de nos ouvrages, nous tentons de demeurer pragmatiques en conciliant les « avis ».

D'abord le point de vue du *physicien*, les conditions expérimentales d'obtention des données sont connues et leurs incertitudes bien encadrées. Son analyse dite fréquentielle se base sur les seules données objectives, car il les a *correctement* mesurées. Nous savons que les mesurages coûtent et durent. Si les données issues lors d'une campagne expérimentale de « notre physicien » sont en nombre insuffisant et si le processus s'avère non répétitif d'où le nombre de paramètres à estimer important, l'approche fréquentielle introduit « faussement » l'*a priori* de la loi dans l'analyse. Ce qui est paradoxale c'est que la démarche calculs est correcte mais elle ne répond qu'à un besoin logiquement mathématique. Autrement dit, la mathématique est juste mais elle est superficiellement greffée à un cas inapproprié d'où le rejet de la solution et par essence une controverse naîtrait...

La démarche *engineering* est quelque peu *séduisante*, par le côté « Art et Métiers » c'est-à-dire apprentissage. Son analyse intègre l'expertise dont on sait que c'est une nécessité pour proposer une loi *a priori*, par essence subjective. Sans rejeter l'approche bayessienne, c'est à ce stade que nous adhérons à l'approche *engineering* car elle exploite un *outil d'aide à la décision*, où des préférences s'expriment clairement. Aux termes de cette approche, la fonction incertitude aide amplement à la décision...

En dernière instance, il faut bien spécifier et correctement encadrer le problème posé : le contexte, les hypothèses, les données disponibles, etc. Faire des simulations (logiciels à l'appui) n'a rien de pénalisant du point de vue pédagogique mais il faut s'en garder d'en faire un *fait avéré* en termes d'expériences. Il convient

de s'appuyer sur les *données réelles* du *retour d'expérience* issues des conditions de leur collecte. Par ce fait même, la campagne expérimentale et le retour de données « vraies » constitue une nécessité stratégique si une validation préalable est opérée.

Dans cet ouvrage, nous présentons (voir chapitres 1 et 2, vol. 1) les éléments d'analyse qualitative qui précèdent l'analyse quantitative, déterministe et probabiliste. Les lois et tests exposées dans les deux premiers chapitres (vol. 1) sont incontournables à toute étude probabiliste de phénomènes physiques. Il nous incombe d'être d'abord pragmatique.

Sans égard à l'approche exploitée, il est nécessaire d'analyser la sensibilité des facteurs et de toujours garder en vue le bon sens physique. Parmi tant d'autres méthodes d'analyse, la fiabilité est là comme un outil d'aide à la compréhension du passé. Par exemple, bien de défaillances, dégradations et rupture ou ruine (dommage) ne peuvent être expliquées par les modèles déterministes. La compréhension du phénomène de vieillissement, des mécanismes de dégradation, des modèles et des lois (voir chapitre 1 : « Mécanismes de rupture par fatigue »). L'étude de fiabilité permet de mettre en évidence les composants et les sous-composants sujet à critiques, les variables importantes (fissures initiales, *f.i.c.*, etc.) où il convient de réduire les incertitudes, par le truchement d'une bonne connaissance du phénomène physique.

La fiabilité anticipe et prévoit le futur en vue d'améliorer les performances et le niveau de sûreté par l'optimisation des stratégies d'exploitation.

Par ailleurs, la fiabilité ne peut suppléer, à elle seule, la compréhension des phénomènes physiques issus des expériences.

Ammar GROUS

---

La fiabilité anticipe et prévoit le futur en vue d'améliorer les performances et le niveau de sûreté par l'optimisation des stratégies d'exploitation. Elle a fait preuve d'une évolution notable au niveau des matériaux et des structures.

Largement inspiré des modèles de la mécanique de rupture, cet ouvrage présente les cas les plus significatifs dont l'encadrement de la probabilité de rupture par les bornes simples, la méthode Bayésienne appliquée, les chaînes de Markov, les indices de fiabilité de Cornell et de Hasofer-Lind ou l'intégrale indicatrice du dommage et de la simulation de Monte Carlo. Ce volume insiste sur le calcul des incertitudes au sens de la méthode GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) en respectant le vocabulaire international de métrologie.

Destiné aux universitaires et aux professionnels, *Fiabilité mécanique appliquée* se caractérise par son approche pédagogique des méthodes statistiques, structurées autour de cas concrets et illustrées d'applications corrigées et commentées. Ce volume apportera une aide précieuse aux concepteurs et aux décideurs.

#### *L'auteur*

Ammar Grous est docteur en sciences de l'ingénieur de l'université de Haute-Alsace. Il est ingénieur en mécanique et titulaire d'un DEA en génie des matériaux. Il enseigne les techniques de génie mécanique au Québec (Canada).

**hermes**  
**Science**  
— publications —

[www.editions.lavoisier.fr](http://www.editions.lavoisier.fr)

