

---

# **Incertitudes, optimisation et fiabilité des structures**

Abdelkhalak El Hami

Bouchaïb Radi

Incertitudes, optimisation et fiabilité des structures

© 2013, Lavoisier, Paris

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

ISBN 978-2-7462-4516-7

---

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.

# **Incertitudes, optimisation et fiabilité des structures**

Abdelkhalak El Hami  
Bouchaïb Radi

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

*Lavoisier*



# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	13
<b>Chapitre 1. Incertitudes</b> . . . . .	19
1.1. Introduction . . . . .	19
1.2. Problème d'optimisation . . . . .	21
1.3. Sources des incertitudes . . . . .	22
1.3.1. Classification des schémas . . . . .	23
1.4. Traitement des incertitudes . . . . .	24
1.4.1. Optimisation fiabiliste . . . . .	29
1.4.2. Optimisation robuste . . . . .	30
1.4.3. Optimisation multi-objectif . . . . .	31
1.4.4. Optimisation stochastique . . . . .	32
1.4.5. Optimisation basée sur les pires scénarios . . . . .	32
1.4.6. Optimisation non probabiliste . . . . .	33
1.5. Analyse de sensibilité . . . . .	34
1.5.1. Analyse de sensibilité locale . . . . .	34
1.5.2. Analyse de sensibilité globale . . . . .	34
<b>Chapitre 2. Fiabilité des structures</b> . . . . .	37
2.1. Introduction . . . . .	37
2.2. Position d'un problème de fiabilité des structures . . . . .	38
2.3. Modélisation d'un problème de fiabilité des structures . . . . .	38
2.3.1. Modèle mécanique déterministe . . . . .	38
2.3.2. Aléas et modélisation probabiliste . . . . .	39
2.3.3. Modes de défaillance d'une structure . . . . .	39
2.3.4. Probabilité de défaillance d'une structure . . . . .	40
2.4. Calcul de la probabilité de défaillance d'une structure . . . . .	40

2.4.1. Calcul de la probabilité de défaillance par la méthode de Monte Carlo . . . . .	40
2.4.2. Calcul de la probabilité de défaillance à partir d'un indice de fiabilité . . . . .	42
2.4.3. Méthode FORM . . . . .	45
2.4.4. Méthode SORM . . . . .	47
2.5. Présentation du problème résistance-sollicitation . . . . .	48
2.5.1. Probabilité de défaillance . . . . .	49
2.5.2. Indices de fiabilité . . . . .	50
2.6. Fiabilité des systèmes en mécanique . . . . .	55
2.6.1. Combinaison de modes de défaillance . . . . .	56
2.6.2. Evaluation de la probabilité de défaillance d'un système . . . . .	57
<b>Chapitre 3. Distributions les plus utilisées en fiabilité . . . . .</b>	<b>65</b>
3.1. Introduction . . . . .	65
3.2. Variables aléatoires discrètes . . . . .	65
3.2.1. Distribution binomiale . . . . .	65
3.2.2. Distribution géométrique . . . . .	66
3.2.3. Période de retour . . . . .	66
3.2.4. Distribution de Poisson . . . . .	67
3.2.5. Distribution exponentielle . . . . .	67
3.3. Variables aléatoires continues . . . . .	68
3.3.1. Distribution normale ou de Gauss . . . . .	68
3.3.2. Loi normale centrée réduite . . . . .	70
3.3.3. Distribution log-normale . . . . .	71
3.3.4. Distribution de Weibull . . . . .	74
3.3.5. Distribution de Pareto . . . . .	76
3.3.6. Distribution Beta . . . . .	77
3.4. Combinaison de variables aléatoires continues et discrètes : distributions hypergéométrique et hyperbinomiale . . . . .	79
3.5. Distribution des valeurs extrêmes . . . . .	80
3.5.1. Introduction . . . . .	80
3.5.2. Concept de distribution des valeurs extrêmes . . . . .	81
3.5.3. Distributions asymptotiques . . . . .	82
3.5.4. Distribution de type I . . . . .	82
3.5.5. Distribution de type II . . . . .	83
3.5.6. Distribution de type III . . . . .	84
3.6. Tests statistiques . . . . .	88
3.6.1. Test $\chi^2$ . . . . .	89
3.6.2. Test de Kolmogorov-Smirnov . . . . .	89
3.7. Estimation des paramètres d'une distribution . . . . .	90

3.7.1. Méthode des moments . . . . .	90
3.7.2. Méthode du maximum de vraisemblance . . . . .	91
3.8. Estimation d'un intervalle de la moyenne et de la variance . . . . .	92
<b>Chapitre 4. Conception optimale des structures . . . . .</b>	<b>97</b>
4.1. Introduction . . . . .	97
4.2. Evolution historique de l'optimisation structurale . . . . .	98
4.3. Classification des problèmes d'optimisation des structures . . . . .	99
4.3.1. Optimisation de dimensionnement . . . . .	99
4.3.2. Optimisation de forme . . . . .	101
4.3.3. Optimisation topologique . . . . .	105
<b>Chapitre 5. Optimisation stochastique . . . . .</b>	<b>107</b>
5.1. Introduction . . . . .	107
5.2. Les modèles de décision dans l'incertain . . . . .	108
5.3. Programmation linéaire stochastique . . . . .	109
5.3.1. Quelques méthodes de résolution des programmes linéaires stochastiques . . . . .	110
5.4. Programmation non linéaire stochastique . . . . .	114
5.4.1. Méthode de décomposition régularisée . . . . .	114
5.4.2. Méthodes basées sur le lagrangien . . . . .	114
5.4.3. Méthode de Frank-Wolfe pour les problèmes avec recours simple . . . . .	116
5.5. Méthode du gradient stochastique . . . . .	117
<b>Chapitre 6. Optimisation multi-objectif avec incertitudes . . . . .</b>	<b>119</b>
6.1. Introduction . . . . .	119
6.1.1. Choix d'une méthode d'optimisation . . . . .	120
6.1.2. Classification des méthodes d'optimisation . . . . .	121
6.1.3. Algorithmes génétiques multi-objectifs . . . . .	122
6.2. Optimisation multi-objectif robuste . . . . .	124
6.2.1. Critères de robustesse en optimisation multi-objectif . . . . .	124
6.3. Méthode d'intersection normale à la frontière . . . . .	125
6.3.1. Description de la méthode NBI . . . . .	127
6.4. Problème d'optimisation multi-objectif des structures . . . . .	138
6.4.1. Solution analytique et solution NSGA . . . . .	140
6.4.2. Solution obtenue par NBI-HSA . . . . .	141
<b>Chapitre 7. Optimisation robuste . . . . .</b>	<b>143</b>
7.1. Introduction . . . . .	143
7.2. Modélisation des incertitudes . . . . .	143
7.2.1. Méthodes paramétriques . . . . .	144



7.2.2. Méthodes des tirages aléatoires . . . . .	144
7.2.3. Modèles probabilistes . . . . .	145
7.2.4. Méthodes non paramétriques . . . . .	145
7.2.5. Construction du modèle probabiliste . . . . .	146
7.3. Prise en compte de la robustesse dans la recherche d'un optimum . . . . .	148
7.4. Critères de robustesse . . . . .	148
7.4.1. Définition de l'incertitude des paramètres de conception . . . . .	148
7.4.2. Critères de robustesse en optimisation multi-objectif . . . . .	149
7.5. Méthode de résolution . . . . .	151
7.6. Exemples d'optimisation mono-objectif . . . . .	152
7.6.1. Exemple de minimisation . . . . .	152
7.6.2. Exemple de maximisation . . . . .	154
7.7. Exemple d'optimisation multi-objectif robuste . . . . .	156
<b>Chapitre 8. Optimisation fiabiliste . . . . .</b>	<b>159</b>
8.1. Introduction . . . . .	159
8.2. Présentation de l'optimisation fiabiliste . . . . .	160
8.3. Les méthodes d'optimisation fiabiliste . . . . .	161
8.4. Approche RIA ( <i>Reliability Indicator Approach</i> ) . . . . .	161
8.5. Approche SLA ( <i>Single Loop Approach</i> ) . . . . .	162
8.6. Approche SORA ( <i>Sequential Optimization and Reliability Assessment</i> ) . . . . .	169
<b>Chapitre 9. Facteurs optimaux de sûreté . . . . .</b>	<b>177</b>
9.1. Introduction . . . . .	177
9.2. Méthode classique . . . . .	178
9.2.1. Formulation . . . . .	178
9.2.2. Algorithme . . . . .	178
9.3. Méthode hybride . . . . .	179
9.3.1. Formulation . . . . .	179
9.3.2. Algorithme . . . . .	181
9.4. Méthode des facteurs optimaux de sûreté (OSF) . . . . .	182
9.4.1. Conditions optimales de la méthode OSF . . . . .	182
9.4.2. Algorithme de la méthode OSF . . . . .	185
9.5. Extension de la méthode OSF à des scénarios de défaillances multiples . . . . .	186
9.5.1. Formulation du problème . . . . .	187
9.5.2. Conditions optimales de la méthode OSF . . . . .	188
<b>Chapitre 10. Optimisation topologique basée fiabilité . . . . .</b>	<b>203</b>
10.1. Introduction . . . . .	203
10.2. Définitions en optimisation de topologie . . . . .	204

10.3. Méthodes d'optimisation de topologie . . . . .	205
10.4. Couplage de fiabilité et optimisation de topologie . . . . .	208
10.4.1. Formulation de RBTO . . . . .	209
10.4.2. Algorithme de RBTO . . . . .	210
10.5. Illustration et validation du modèle RBTO . . . . .	212
10.5.1. Variabilité de l'indice de fiabilité . . . . .	213
10.6. Applications du modèle RBTO en mécanique . . . . .	214
10.6.1. Analyse statique . . . . .	214
10.6.2. Analyse modale . . . . .	215
10.6.3. Analyse en fatigue . . . . .	217
<b>Chapitre 11. Optimisation fiabiliste en calcul vibratoire . . . . .</b>	<b>221</b>
11.1. Introduction . . . . .	221
11.2. Optimisation fiabiliste hybride des structures . . . . .	221
11.2.1. Formulation de la méthode hybride . . . . .	221
11.2.2. Extension de la méthode hybride à des scénarios de défaillances multiples . . . . .	224
11.2.3. Méthode hybride fréquentielle . . . . .	228
11.2.4. Extension de la méthode hybride fréquentielle à des scénarios de défaillances multiples . . . . .	230
11.3. Couplage des méthodes de synthèse modale et RBDO . . . . .	236
11.4. Approche hybride améliorée de l'optimisation fiabiliste de conception . . . . .	242
11.4.1. Implémentation de l'approche hybride améliorée RBDO . . . . .	244
11.5. Introduction des méthodes de synthèse modale en IHM . . . . .	251
<b>Chapitre 12. Méthodes d'éléments finis stochastiques . . . . .</b>	<b>257</b>
12.1. Introduction . . . . .	257
12.2. Discrétisation des champs aléatoires . . . . .	258
12.2.1. Méthode de discrétisation des points moyens . . . . .	258
12.2.2. Méthode de discrétisation de la moyenne spatiale . . . . .	258
12.2.3. Méthode de discrétisation par fonction de forme . . . . .	259
12.2.4. Méthode de discrétisation de l'estimation linéaire optimale . . . . .	259
12.3. Méthodes de calcul des moments . . . . .	259
12.3.1. Simulation de Monte Carlo . . . . .	259
12.3.2. Méthodes de perturbation . . . . .	260
12.3.3. Méthode de Neumann . . . . .	263
12.3.4. Projection sur un chaos polynomial . . . . .	265
12.4. Méthode des éléments finis stochastiques spectraux . . . . .	267
12.4.1. Expansion en série de Taylor des équations modales d'une structure stochastique . . . . .	268

12.4.2. Méthode de perturbation de Muscolino . . . . .	271
12.4.3. Méthode d'interface fixe stochastique : expansion en série de Taylor . . . . .	272
12.4.4. Méthode de synthèse modale stochastique . . . . .	277
<b>Chapitre 13. Métamodèles et optimisation fiabiliste . . . . .</b>	<b>291</b>
13.1. Introduction . . . . .	291
13.2. Métamodèles . . . . .	291
13.2.1. Métamodèle estimé dans la boucle d'optimisation . . . . .	293
13.2.2. Plans d'expériences et surfaces de réponse . . . . .	293
13.2.3. Métamodèle global . . . . .	298
13.2.4. Modèle de krigeage . . . . .	298
13.2.5. Régression polynomiale . . . . .	300
13.2.6. Moindres carrés . . . . .	302
13.3. Optimisation de conception basée sur les métamodèles . . . . .	303
13.3.1. Modèle statistique . . . . .	305
13.4. Plans d'expériences . . . . .	306
13.4.1. Plans d'expériences classiques . . . . .	307
<b>Chapitre 14. Métamodèles et hydroformage . . . . .</b>	<b>309</b>
14.1. Introduction . . . . .	309
14.2. Sources d'incertitudes dans la mise en forme . . . . .	310
14.3. Stratégie d'évaluation de la probabilité de défaillance . . . . .	311
14.3.1. Modèle éléments finis et choix des paramètres incertains . . . . .	313
14.3.2. Identification des modes de défaillance et définition des états limites . . . . .	315
14.3.3. Identification des éléments et des zones critiques . . . . .	317
14.3.4. Modélisation analytique de la CLF . . . . .	320
14.4. Caractérisation probabiliste des déformations critiques . . . . .	321
14.4.1. Choix du plan d'expériences numérique . . . . .	321
14.4.2. Construction des métamodèles . . . . .	322
14.4.3. Validation et analyse statistique des métamodèles . . . . .	323
14.4.4. Ajustement des distributions . . . . .	323
14.5. Etude probabiliste de la striction et du plissement . . . . .	328
14.6. Effets des corrélations sur la probabilité de défaillance . . . . .	332
14.7. Estimation spatiale de la probabilité de défaillance . . . . .	332
14.8. Estimation de la probabilité de défaillance par une technique de logique floue . . . . .	334
<b>Annexe 1 . . . . .</b>	<b>337</b>
<b>Annexe 2 . . . . .</b>	<b>351</b>

<b>Annexe 3</b> . . . . .	357
<b>Annexe 4</b> . . . . .	375
<b>Bibliographie</b> . . . . .	381
<b>Index</b> . . . . .	393



## Avant-propos

Au cours des dernières années, des ingénieurs, des scientifiques et des décideurs ont manifesté un fort intérêt pour l'optimisation multiobjectif et robuste des systèmes mécaniques avec la prise en compte des incertitudes. Ces deux domaines ont reçu un intérêt grandissant en raison de leurs difficultés théoriques et de leurs applications industrielles. Actuellement, les modèles déterministes ne prennent pas en compte la variabilité des paramètres souvent mal identifiée et donnent des résultats erronés de la réalité du problème traité. De ce fait, il est intéressant de se placer dans le cadre où les fonctions objectifs sont incertaines, et où il s'avère parfois nécessaire de trouver des solutions robustes à des modifications ultérieures susceptibles de survenir sur les variables de décision. Le but est de concevoir un système performant. Ces dernières sont susceptibles de varier à cause des incertitudes.

Les critères de robustesse et de fiabilité des systèmes mécaniques sont généralement antagonistes au critère de performance. Le problème de conception en présence d'incertitudes est fondamentalement un problème d'optimisation multicritères.

La fiabilité des systèmes est plus que jamais un enjeu majeur pour les entreprises industrielles. Celles-ci doivent répondre à des exigences de plus en plus fortes des donneurs d'ordre, dont le non-respect entraîne des pénalités ou des extensions de garantie, et d'importants coûts de non-qualité lorsqu'il s'agit de remédier à des défauts, voir une insatisfaction clients de notoriété internationale compromettant des marchés futurs. D'autant que l'importance de l'électronique embarquée dans les véhicules et systèmes est de plus en plus prépondérante. L'un des enjeux-clés de la fiabilité des systèmes est également de pouvoir établir une surveillance rigoureuse capable de prédire et de détecter les modes de défaillance du système dans les phases de développement afin d'éviter tout impact significatif sur le comportement et la sécurité du système en question. Dans ce cas, les techniques de diagnostic et de détection de défauts peuvent être combinées pour garantir une performance optimale du processus et des systèmes.

L'ouvrage intègre les idées les plus récentes issues de la recherche et de l'industrie dans le domaine de l'optimisation en mécanique des structures, la fiabilité et la prise en compte des incertitudes. Il est composé de quatorze chapitres. Ces chapitres font le point sur les différents outils traitant les incertitudes, la fiabilité et l'optimisation des systèmes. Le couplage optimisation-fiabilité est abordé afin de prendre en compte les incertitudes dans la modélisation et la résolution des problèmes rencontrés. Chaque chapitre explique clairement les techniques utilisées et développées accompagnées par des exemples illustratifs complètement traités.

Le premier chapitre introduit les problèmes liés aux incertitudes. Les travaux présentés traitent donc de la prise en compte des incertitudes dans les problèmes d'optimisation. Nous présentons les principaux éléments relatifs à chacune des théories et la propagation des incertitudes dans les modèles étudiés.

Le deuxième chapitre traite de la fiabilité des systèmes mécaniques. Il a pour objectif de donner les éléments de base pour le calcul de la probabilité de défaillance de ces derniers et d'analyser leur fiabilité. Généralement, la modélisation des mécanismes de défaillance des systèmes a pour but d'apporter les améliorations nécessaires afin de garantir leur performance. Dans ce cadre, ces mécanismes seront bien identifiés, modélisés, analysés et classés afin d'une part de garantir la robustesse de conception des produits, et d'autre part d'apporter les améliorations nécessaires pour faire face aux spécifications croissantes exigées de durabilité.

Le troisième chapitre présente les différentes distributions utilisées en fiabilité. Les procédures pour calculer les probabilités d'évènements utilisent plusieurs variables aléatoires continues et discrètes. Cependant, déterminer la distribution sous-jacente à une variable aléatoire est un challenge pour les ingénieurs. Pour définir une distribution unique, ses paramètres doivent être estimés. Généralement, la distribution et ses paramètres sont estimés en utilisant des données existantes. Ainsi, il est important d'étudier les procédures existantes pour déterminer la distribution et ses paramètres pour une série de données d'une variable aléatoire.

Le quatrième chapitre aborde la conception optimale des structures. Cette conception soulève depuis plus de vingt ans le plus vif intérêt. Encore trop peu appliquée aux techniques classiques des bureaux d'études, elle s'y intègre progressivement au fur et à mesure que s'accroît sa fiabilité. Dans ce chapitre, nous présentons, tout d'abord, les hypothèses simplificatrices de travail sur lesquelles on se base pour expliciter mathématiquement la fonction objectif et les contraintes de notre problème d'optimisation. Ensuite, les différents types de problèmes d'optimisation des structures sont classifiés d'un point de vue général. Et nous terminons en décrivant la démarche systématique en optimisation des structures.

Le cinquième chapitre traite l'optimisation stochastique. La prise en compte de ces incertitudes dans le processus d'optimisation a donné naissance à l'optimisation

stochastique. On parlera de programmation stochastique linéaire, non linéaire et on présente différentes méthodes utilisées dans le contexte de ce type d'optimisation.

Le sixième chapitre présente l'optimisation multi-objectif en tenant compte des incertitudes. On cherche à optimiser plusieurs composantes d'un vecteur de fonctions coût. Contrairement à l'optimisation mono-objectif, la solution d'un problème multi-objectif (PMO) n'est pas unique mais elle est constituée d'un ensemble de solutions, connu comme l'ensemble des solutions Pareto optimales. Toute solution de cet ensemble est optimale dans le sens qu'aucune amélioration ne peut être faite sur une composante du vecteur sans la dégradation d'au moins une autre composante. Le premier but dans la résolution d'un problème multi-objectif est d'obtenir l'ensemble des solutions Pareto optimales ou bien d'échantillonner des solutions diversifiées dans cet ensemble. La détermination de l'ensemble n'est qu'une première phase dans la résolution pratique du PMO, qui nécessite dans un deuxième temps le choix d'une solution à partir de cet ensemble suivant des préférences choisies par le décideur.

Le septième chapitre traite l'optimisation robuste. Cette dernière a les mêmes caractéristiques que l'optimisation déterministe au niveau du traitement des données mais avec des incertitudes sur les variables de conception et sur les fonctions objectifs ainsi que dans le traitement des contraintes. En ingénierie mécanique, ces incertitudes sont inhérentes aux défauts de modélisation, aux propriétés mécaniques des matériaux (module d'Young, masse volumique, etc.), aux processus de fabrication et d'assemblage (épaisseurs de tôles, jonction, etc.). Dans une phase de conception en avant-projet, ces incertitudes sont introduites pour prendre en compte la méconnaissance de certaines variables de conception.

Le huitième chapitre introduit l'optimisation fiabiliste. L'optimisation des structures mécaniques peut être mise en défaut lorsque la variabilité des paramètres ou des phénomènes du type aléatoire doit être prise en compte. Une première approche pour prendre en compte ce que l'on appelle la forme générale des incertitudes consiste à utiliser des coefficients de sécurité. Cette approche souffre cependant de son manque de généralité : les coefficients de sécurité sont intimement liés à la situation particulière étudiée ainsi qu'à l'expérience de l'ingénieur et ne peuvent donc pas être étendus à de nouvelles situations, notamment lorsque l'expérience accumulée est encore faible et l'historique des défauts constatés n'est pas suffisamment riche. En réponse à ces difficultés, des méthodes d'analyse ont été développées. Dans cette démarche, un des premiers aspects envisagés a été le contrôle du niveau de fiabilité : on parle alors d'optimisation prenant en compte la fiabilité ou optimisation fiabiliste.

Le neuvième chapitre aborde l'approche des facteurs optimaux de sûreté. Le coefficient de sécurité (un nombre associé à un choix de données, à un scénario de défaillance et à une règle de dimensionnement), conduit généralement à une conception satisfaisante. Il est validé par un retour d'expérience positive. Lorsqu'un ingénieur conçoit une nouvelle forme de structures, il est obligé de faire plusieurs



essais et hypothèses pour identifier les différentes situations extrêmes, ce qui conduit à une augmentation au niveau du coût initial des structures étudiées. La méthode des facteurs optimaux de sûreté (OSF) que nous proposons dans ce chapitre est une technique semi-numérique basée sur l'analyse de sensibilité de l'état limite par rapport aux variables d'optimisation afin d'évaluer l'influence de chaque paramètre sur le processus d'optimisation des structures étudiées. L'approche présentée dans ce chapitre pour la résolution du problème d'optimisation fiabiliste est basée sur une analyse de sensibilité. Cette analyse joue un rôle très important permettant de fournir l'influence de chaque paramètre d'optimisation sur la structure étudiée.

Le dixième chapitre introduit l'optimisation topologique basée sur la fiabilité (RBTO). Déterminer la forme appropriée des composants structuraux est un problème de première importance pour l'ingénieur. Dans tous les domaines de la mécanique des structures, l'impact de la bonne conception d'une pièce est primordial sur sa résistance, sa durée de vie et son utilisation en service. En optimisation de topologie, on est souvent amené à résoudre un problème de grande taille. Ainsi, il y a un besoin fort de développer des modèles et des méthodes efficaces. Le modèle RBTO présenté dans ce chapitre peut générer plusieurs solutions avec des avantages différents, ce qui permet de choisir la meilleure pour réaliser le cahier des charges.

Le onzième chapitre présente l'optimisation basée sur la fiabilité en mécanique vibratoire. Les problèmes en dynamique des structures prennent une très grande importance, notamment la tendance de construire des structures de plus en plus souples et soumises aux excitations qui fluctuent de plus en plus rapidement dans le temps. L'intégration des procédures optimisation fiabiliste pour la conception des systèmes dynamiques complexes (cas des problèmes de grande échelle), devient de plus en plus difficile à résoudre mathématiquement. Ce sont des équations à dérivées partielles stochastiques d'où plusieurs problèmes sont ouverts au point de vue recherche en mathématiques. Cependant, une analyse dynamique des structures industrielles de grande taille est habituellement basée sur les techniques de réduction des modèles. L'objectif de ce chapitre est de présenter des méthodologies couplant les techniques de synthèse modale et l'optimisation fiabiliste en conception des structures.

Le douzième chapitre aborde les différentes méthodes des éléments finis stochastiques en statique et en dynamique des structures. Dans le cadre de l'étude de systèmes mécaniques par la méthode des éléments finis, une des principales hypothèses est que le modèle est déterministe. Comme les performances des machines de calcul augmentent considérablement avec le temps, la prise en compte de phénomènes complexes jusque-là négligés ou simplifiés devient envisageable. En particulier, il devient possible de travailler sur des problèmes dont les données sont incertaines. La prise en compte des incertitudes intrinsèques aux propriétés des matériaux et des structures devient possible. Le besoin de prendre en compte ces incertitudes conduit au développement des méthodes des éléments finis stochastiques et des couplages mécano-fiabilistes.

Le treizième chapitre introduit la notion de métamodèles. Lors de la conception de produits complexes comme des avions, des modèles de simulation détaillés sont nécessaires pour évaluer et améliorer la conception durant le développement. Ces modèles prennent souvent beaucoup de temps à s'exécuter. En outre, il se peut qu'une information provenant des modèles de simulation puisse être indisponible ou fausse. Dans ce cas, l'optimisation de la conception axée sur le métamodèle peut être une alternative. Les métamodèles sont des modèles simplifiés des modèles de simulation détaillés.

Le quatorzième chapitre traite le procédé de fabrication nommé hydroformage par l'approche métamodèle. Les méthodes classiques de fiabilité (Monte Carlo, FORM, SORM, etc.) permettent d'estimer avec une bonne précision le niveau de fiabilité dès qu'une caractérisation probabiliste des paramètres incertains et qu'une identification des états limites sont fournies. Le champ d'application de ces méthodes se restreint quand le problème présente des nonlinéarités (matériels, géométriques, etc.) et aussi dans le cas où la fonction d'état limite est définie implicitement en fonction des paramètres incertains. Ces deux problèmes sont présents dans le cas de la mise en forme, ce qui la rend complexe et nécessite une réflexion sur les méthodes qui peuvent être appliquées et qui peuvent évaluer d'une manière précise la probabilité de défaillance. Pour ce type de problème, des techniques d'approximation ont souvent été utilisées afin de remplacer le modèle réel par un modèle approximatif ou métamodèle qui permet d'évaluer la réponse rapidement. Plusieurs techniques d'approximation ont été utilisées pour les problèmes de fiabilité, la plus appropriée est la méthode de surface de réponse.

Enfin, l'ouvrage constitue un support précieux pour les enseignants et les chercheurs. Il s'adresse aussi aux élèves ingénieurs, aux ingénieurs en activité et aux étudiants universitaires du niveau master.

## **Remerciements**

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cet ouvrage, en particulier les élèves-ingénieurs et les doctorants de l'INSA de Rouen que nous avons eu en charge au cours de ces dernières années.



---

La fiabilité des systèmes complexes est un défi majeur pour les entreprises industrielles. Ces dernières doivent répondre aux exigences des donneurs d'ordre dont le non-respect entraînerait des pénalités compromettant les marchés futurs. L'un des enjeux majeurs de l'optimisation fiabiliste est d'établir une surveillance rigoureuse, capable de prédire et de détecter les modes de défaillances des systèmes étudiés.

Cet ouvrage présente les avancées de la recherche et de l'industrie appliquées aux domaines de l'optimisation, de la fiabilité et de la prise en compte des incertitudes en mécanique. Ce couplage est à la base de la compétitivité des entreprises dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique, du génie civil ou encore de la défense.

Accompagné d'exemples détaillés, *Incertitudes, optimisation et fiabilité des structures* présente les nouveaux outils de conception les plus performants. Il s'adresse aux ingénieurs et aux enseignants-chercheurs.

#### *Les auteurs*

Spécialiste en optimisation, fiabilité et dynamique des structures, Abdelkhalak El Hami est professeur à l'INSA Rouen. Il est responsable de la chaire de mécanique du CNAM en Normandie et de plusieurs projets pédagogiques européens.

Professeur habilité à la faculté des sciences et techniques Settati de l'université Hassan Premier (Maroc), Bouchaïb Radi est spécialiste dans les domaines de la mise en forme, de l'optimisation et de la fiabilité.

**Hermès**  
**Science**  
— publications —

www.editions.lavoisier.fr

