



André Lannoy  
Maurice Lemaire  
Alain Delage  
(Dir.)

# La Fiabilité en mécanique

Des méthodes aux applications

Préface de Philippe Le Poac

Avant-propos de Nicolas Gayton



André Lannoy, Maurice Lemaire, Alain Delage (Dir.), *La Fiabilité en mécanique. Des méthodes aux applications*, Paris : Presses des MINES, Technologies, 2018.

© Presses des MINES - TRANSVALOR, 2018  
60, boulevard Saint-Michel - 75272 Paris Cedex 06 - France  
[presses@mines-paristech.fr](mailto:presses@mines-paristech.fr)  
[www.pressesdesmines.com](http://www.pressesdesmines.com)

© Illustration de couverture : Thibaud Vaerman

ISBN : 978-2-35671-489-3  
Dépôt légal : 2018  
Achevé d'imprimer en 2018 (Paris)

Cette publication a bénéficié du soutien de l'Institut Carnot M.I.N.E.S.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

# La Fiabilité en mécanique

Des méthodes aux applications

Collection Technologies

Dans la même collection :

Laurent Pottier

*Innovative Tools and Methods for Teaching Music and Signal Processing*

Chakib Bouallou

*Le stockage d'énergie*

*Conversion d'énergie en gaz combustible*

Olivier Cahen

*L'image en relief*

Émile Leipp

*Acoustique et Musique*

Thibaud Normand, Jessica Andreani, Vincent Tejedor

*Les cycles thermodynamiques des centrales nucléaires*

Guillaume Denis

*Jeux vidéo, enjeux éducatifs*

M. Santamouris, J. Adnot, S. Alvarez, N. Klitsikas,

M. Orphelin, C. Lopes, F. Sanchez

*Cooling the cities – Rafraîchir les villes*

Sophie Rémont, Jérôme Gosset, Roland Masson

*Le démantèlement des installations nucléaires*

Jean-Jacques Bézian, Pierre Barlès, Claude François, Christian Inard

*Les émetteurs de chaleur*

# La Fiabilité en mécanique

## Des méthodes aux applications

Sous la direction de

André Lannoy  
Maurice Lemaire  
Alain Delage

Préface de Philippe Le Poac  
Avant-propos de Nicolas Gayton





# Préface

J'éprouve un double plaisir à écrire la préface de cet ouvrage *La Fiabilité en mécanique. Des méthodes aux applications*.

Tout d'abord, parce que, aujourd'hui Président de l'Institut pour la Maîtrise des Risques (IMdR), je suis fier de souligner que les contributions de cet ouvrage ont été rédigées par des experts, industriels, universitaires ou consultants, tous membres des groupes de travail et de réflexion « Management, Méthodes, Outils Standards » (M2OS) ou « Sécurité et Sûreté des Structures » (3S) de la société savante qu'est l'IMdR.

Ensuite, parce que je me souviens que, jeune ingénieur, j'ai commencé ma carrière dans un laboratoire de caractérisation mécanique des matériaux et que ma vie professionnelle d'alors était consacrée à la plasticité et à la mécanique de la rupture. La fiabilité mécanique de certaines structures était la justification de mon travail.

Il est trivial de dire que pour qu'une structure résiste mécaniquement, il faut et il suffit que la sollicitation mécanique ou la contrainte soit inférieure à sa résistance.

Mais derrière cette notion simple, déterministe, se cache la complexité.

En premier lieu, la sollicitation peut être difficile à évaluer, en particulier lors de certains transitoires ou de situations accidentelles, voire lors de simples usages non prévus. Des circonstances exceptionnelles peuvent subvenir comme des conditions météorologiques hors normes. Lors d'un séisme, les contraintes dépendent de nombreux facteurs : intensité, lieu de l'épicentre mais aussi nature du terrain. Même dans le cas de contraintes de service nominales, des concentrations de contrainte locales peuvent se manifester et vont dépendre de défauts non décelés ou de simples variations de géométrie tels que les angles et rayons de raccordement d'un cordon de soudure.

Le mot résistance recouvre différentes caractéristiques mécaniques : la limite d'élasticité, contrainte au-delà de laquelle le matériau se déformera plastiquement, plus ou moins d'ailleurs, la ténacité qui mesure la résistance à la propagation d'un défaut, la résistance à la fatigue caractérisée par le nombre de cycles avant rupture et la vitesse de fissuration sous un chargement cyclique... Pour les métaux, il faut compter, pour chacune de ces caractéristiques, avec la dispersion héritée du processus de fabrication, notamment les différents traitements thermiques et thermomécaniques subis, ainsi que du processus d'assemblage. Les matériaux céramiques, quant à eux, sont intrinsèquement fragiles et leur comportement mécanique ne peut être décrit que comme une loi de Weibull. Les constructions civiles mettent en œuvre divers matériaux agrégataires et des composites comme des assemblages de parpaings et de joints de mortier. La résistance des sols est source d'autres incertitudes.

Le temps va modifier les conditions initiales par ce qu'on appelle de façon générale le vieillissement qui peut faire intervenir divers mécanismes de dégradation. Il y a bien sûr d'abord ce qui est lié directement à l'usage du système comme la fatigue qui se manifeste au fur et à mesure des cycles mécaniques ou l'irradiation au sein d'une chaudière nucléaire. Mais il y a aussi tous les phénomènes qui ne sont pas liés à l'usage proprement dit mais qui sont liés aux conditions dans lesquelles le système évolue. À haute température, des transformations métallurgiques microstructurales peuvent



changer les propriétés d'un métal. Le fluage qui est la déformation plastique au cours du temps sous contrainte constante peut modifier une géométrie. De façon corollaire, la relaxation qui est la baisse d'une contrainte élastique sous déformation constante peut altérer un assemblage qui repose sur le maintien d'une précontrainte. Et puis, bien sûr, la corrosion peut amener des changements importants. Le chargement peut s'accroître par surcroît de masse, l'épaisseur utile de matériau résistant peut diminuer et des fissures peuvent se créer amenant de nouveaux mécanismes de ruine non prévus : risque de rupture fragile par propagation brutale d'un défaut, corrosion sous contrainte, fatigue-corrosion...

La sollicitation ou contrainte et la résistance sont donc affectées d'incertitudes. Depuis longtemps, la notion de coefficient de sécurité a été introduite pour assurer une certaine fiabilité malgré les incertitudes. Mais cette pratique ne permet pas de connaître la marge de sécurité dont on dispose même si le sens commun comprend qu'elle est d'autant plus grande que le coefficient de sécurité que l'on prend est grand. Cependant, une notion évidente de coût conduit à limiter la marge de sécurité.

L'approche probabiliste consiste à calculer la probabilité de défaillance et à montrer que celle-ci est inférieure à un certain seuil choisi par avance. L'approche probabiliste complète l'approche déterministe. Celle-ci va donner le modèle mécanique de départ qui reste indispensable mais n'est que préalable. Dans l'approche probabiliste, chacune des variables est considérée comme aléatoire avec une certaine loi de distribution et les incertitudes sont propagées dans le modèle mécanique.

Il peut sembler difficile philosophiquement d'accepter un certain taux de défaillance, même très faible, surtout pour des structures dangereuses, on pense par exemple aux cuves de centrales nucléaires. Mais les seuils doivent être pensés comme des outils mathématiques utiles pour comparer les niveaux de fiabilité. Dans des cas moins critiques où le taux de défaillance accepté sera plus élevé, cette notion est plus intuitive, surtout si elle peut être comparée à la fiabilité opérationnelle telle qu'elle peut être mesurée dans la réalité.

Des livres existent pour présenter les différentes théories et méthodes utilisées en fiabilité mécanique. L'originalité et le grand mérite de cet ouvrage sont de présenter dix cas d'application.

Les exemples présentés sont très variés et peuvent être transposés. Ils pourront éclairer tous ceux qui ont la responsabilité d'assurer la qualité d'une conception, sa robustesse, sa fiabilité, sa sûreté, d'estimer des durées de vie et d'optimiser une maintenance préventive ou conditionnelle... tout cela bien sûr à coût minimum.

*Philippe Le Poac*

Président de l'Institut pour la Maîtrise des Risques

## Avant-propos

Parlant régulièrement des méthodes probabilistes pour la gestion des incertitudes en ingénierie à mes étudiants ingénieurs et à des industriels, je suis confronté à deux types de réaction :

- « on ne comprend rien aux probabilités-statistiques et de toute façon cela ne sert à rien » traduit cordialement en « ces méthodes compliquées ne servent qu'aux chercheurs » de la part des étudiants,
- « on sent l'intérêt industriel de ces méthodes, mais on a du mal à voir comment débiter » de la part des industriels.

L'initiative de cet ouvrage, prise par l'Institut pour la Maîtrise des Risques, de passer « des méthodes aux applications » en présentant pédagogiquement dix applications industrielles a pour objectif, à mon sens, de fournir des réponses à ces deux types de réaction.

En tant qu'enseignant je ne peux donc que recommander cet ouvrage à tous ceux qui souhaitent progressivement monter en compétence sur ce sujet. En tant que chercheur je ne peux également que recommander cet ouvrage qui attisera la curiosité de certains pour aller plus loin méthodologiquement.

*Nicolas Gayton*

Professeur des Universités  
SIGMA Clermont-Ferrand - Institut Pascal UMR CNRS 6602  
Responsable de l'axe Mécanique, Matériaux, Structures (MMS)  
Animateur du groupe « mécanique et incertain » de l'Association Française de Mécanique



## Les auteurs

**Eliane ALLAIN**, thèse de doctorat en Acoustique et dynamique des écoulements instationnaires de l'Université de Poitiers en 1996. Ingénieur en aérodynamique à la direction du Matériel SNCF depuis 1999. Experte en aérodynamique et aéroacoustique, récemment impliquée dans des activités de recherche sur les thèmes vents traversiers, envol de ballast, traînée aérodynamique et aéroacoustique ferroviaire.

**Younes AOUES**, diplôme d'ingénieur en Génie Civil de l'École Nationale Polytechnique d'Alger en 2002. Docteur en Génie Civil de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Maître de conférences à l'INSA de Rouen Normandie. Chercheur au Laboratoire de Mécanique de Normandie (LMN). Ces travaux de recherche portent sur l'optimisation fiabiliste des structures soumises à des sollicitations dynamiques à caractère aléatoire, considération des phénomènes de dégradation dans l'optimisation de la conception et de la maintenance.

**Emmanuel ARDILLON**, Diplômé de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (promotion 1990), titulaire du DEA (Master 2) « Probabilités et Applications » de l'Université Paris VI. Ingénieur-chercheur à EDF-R&D en fiabilité des structures, approches probabilistes des phénomènes physiques, traitement des incertitudes. Animateur du Groupe de Travail « *Structural Reliability Analyses into System Risk Assessment* » de l'ESReDA (2006-2010). Membre de l'actuel *project group* ESReDA « ROLCCOST » (*Reliability and Life Cycle Cost*).

**Julien BAROTH** est depuis 2006 maître de conférences de l'Université Grenoble-Alpes, enseignant au département génie civil et construction durable de l'IUT1 et dans des écoles d'ingénieur, chercheur au sein du laboratoire Sols, Solides, Structures - Risques (3SR). Ses activités concernent la vulnérabilité et la fiabilité des ouvrages. Il a coédité en particulier aux éditions Hermès *Fiabilité des ouvrages*, publie des articles scientifiques et contribue à des projets de recherche sur ce thème.

**Jocelyn BASTIDE**, diplômé de l'École Centrale de Nantes (promotion 2014). Ingénieur Simulation des Procédés chez Safran Aircraft Engines depuis octobre 2015, notamment sur les problématiques de déformations en usinage et les essais de pré-*spinning*. Etudes de simulation numérique au CETIM et chez RENAULT. Spécialisation en fiabilité mécanique dans le cadre d'une formation en apprentissage chez RENAULT.

**Mikael CAZUGUEL**, docteur en mécanique, ENSTA Bretagne, spécialiste en calcul des structures à DCNS Ingénierie Sous-marins.

**Alaa CHATEAUNEUF**, Directeur du « Centre d'Innovation et de Développement pour l'Ecoconstruction CIDECO », après avoir été Professeur à l'université Blaise Pascal et responsable de l'axe de recherche « Mécanique, Matériaux et Structures » de l'Institut Pascal. Depuis plus de 30 ans, il développe des méthodes et outils pour la gestion du cycle de vie des structures : étude de fiabilité, prévision de la durée de

vie, optimisation de la conception et de la maintenance des structures, des ouvrages et des installations industrielles. Il a dirigé de nombreux travaux de recherche et animé des groupes européens sur la gestion des cycles de vie des structures et infrastructures.

**Mathilde CHEVREUIL**, docteur en dynamique des structures de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan. Aujourd'hui Maître de Conférences à l'Université de Nantes au GeM au sein de l'équipe ConTRôle de santé, fiabilité et calcul des Structures, ses travaux portent sur les méthodes numériques pour la quantification des incertitudes pour les problèmes en grande dimension.

**Francis COCHETEUX**, ingénieur d'études Matériel et expert Synapses du réseau scientifique et technique SNCF. Après avoir été responsable du pôle Assistance à la Maintenance du Matériel roulant à l'Agence d'Essai Ferroviaire puis responsable du pôle d'audits, conseils et inspection à la Direction du Matériel, Francis Cochetoux est à présent Chef de projet du programme d'actions du Matériel au regard de la sécurité de l'exploitation ferroviaire.

**Alain DELAGE**, ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique (ENSMA - Poitiers - 1973), membre des Groupes de Travail « Sécurité et Sûreté des Structures » et « Management, Méthodes, Outils standards », de l'IMdR ; auparavant responsable de services « Sûreté de Fonctionnement » et « Qualité » chez Renault

**Fabien DUCO**, ingénieur généraliste de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT), docteur en génie mécanique de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Durant sa thèse, il a notamment travaillé sur la vulnérabilité sismique des bâtiments existants à l'échelle pyrénéenne. Après deux années passées dans le secteur Pétrole et Gaz en tant qu'ingénieur structures chez SECOMAT Aquitaine, il est actuellement enseignant en génie civil. Ses travaux de recherche sont effectués au sein de l'équipe Mécanique Matériaux Structures et Procédés et concernent des études de vulnérabilité sur des bâtiments.

**Abdelkhalak EL HAMI**, Professeur des universités à l'INSA de Rouen Normandie, il est l'auteur ou co-auteur de plus de 20 ouvrages. Il est responsable de la chaire de mécanique du Conservatoire National des Arts et Métiers en Normandie et de plusieurs projets pédagogiques européens. Il est directeur-Adjoint du Laboratoire de Mécanique de Normandie.

**Jean-Pierre FAYE**, de formation ingénieur généraliste et docteur en génie mécanique de l'Université Paul Sabatier, Maître de Conférences à l'ENIT. Ses travaux de recherche sont effectués au sein de l'équipe Mécanique Matériaux Structures et Procédés et concernent les simulations numériques d'endommagement des structures sous l'effet d'actions sismiques.

**Antoine GRALL**, ingénieur et docteur de l'Université de Technologie de Troyes, Professeur des Universités à l'Université de Technologie de Troyes. Ses travaux de recherche développés au sein du Laboratoire de Modélisation et Sûreté des

Systèmes concernent la modélisation stochastique pour la fiabilité et la maintenance des systèmes, en particulier à l'interface entre les approches académique et les problématiques industrielles. Ses principaux centres d'intérêts sont l'étude des politiques de maintenance conditionnelle ou de maintenance prévisionnelle (évaluation et évaluation de performances, maintenance et surveillance en ligne), la modélisation de dégradation des systèmes et structures, le pronostic de durée de vie résiduelle, la modélisation fiabiliste pour les études probabilistes de sûreté.

**André LANNOY**, ingénieur, docteur en détonique de l'Université de Poitiers, Vice-président à la stratégie et aux activités de l'IMdR (Institut pour la Maîtrise des Risques), animateur du groupe de travail et de réflexion « sécurité et sûreté des structures », membre des groupes « retour d'expérience technique », « réseaux probabilistes » de l'IMdR ; auparavant ingénieur-chercheur, conseiller scientifique de EDF R&D ; membre d'honneur d'ESReDA (*European Safety, Reliability & Data Association*).

**Maurice LEMAIRE**, professeur des Universités émérite à l'Institut Français de Mécanique Avancée à Clermont-Ferrand (IFMA, devenu SIGMA) et Conseiller Scientifique de Phimeca Engineering ; initiateur de nombreux travaux scientifiques et techniques sur la prise en compte des incertitudes en ingénierie, auteur de *Fiabilité des Structures* (Lavoisier, 2005/*Structural Reliability*, ISTE, 2009) et *Mécanique et Incertain* (ISTE, 2014/*Mechanics and Uncertainty*, ISTE, 2014).

**Didier LEMOSSE**, agrégé de mécanique à l'ENS de Cachan en 1995. Docteur en mécanique de l'INSA de Rouen en 2000. Maître de conférences à l'INSA Rouen Normandie depuis 2001. Chercheur au laboratoire de mécanique de Normandie (LMN). Spécialiste de modélisation et de simulation numérique de systèmes mécaniques complexes. Depuis 2011, ses travaux de recherche portent sur l'optimisation fiabiliste en mécanique.

**Abderahman MAKHELOUFI**, docteur en Génie mécanique de l'INSA de Rouen en 2008. Ingénieur de Recherche à l'INSA de Rouen Normandie. Ces travaux de recherche portent sur la modélisation multiphysique des cartes électroniques embarquées soumises à des sollicitations dynamiques et thermomécaniques.

**Carmen MARTIN**, ingénieur de l'Ecole Polytechnique de Saragosse (Espagne), Docteur en Productique de l'Ecole Centrale Paris. Après une double expérience industrielle en tant qu'ingénieur-chercheur à la Direction de la Recherche Innovation Automobile pour le groupe PSA puis au sein d'EDF dans le département Management des Risques Industriels, Carmen Martin est aujourd'hui Maître de Conférences à l'Ecole Nationale des Ingénieurs de Tarbes et chercheur dans l'équipe Mécanique Matériaux Structures et Procédés en fiabilité mécanique sur le thème du dimensionnement probabiliste des systèmes.

**André ORCESI**, ingénieur divisionnaire des Travaux Publics de l'État, docteur de l'Université Paris-Est (MODES) en structures et matériaux en 2008, habilité à diriger des recherches (SPIGA, Nantes) depuis 2015, il est actuellement directeur adjoint du Laboratoire SDOA, en charge de diverses activités de recherche en lien

avec la gestion des ouvrages d'art, à travers la coordination de plusieurs projets scientifiques ou techniques (projets de recherche, expertises, animation de workshops, encadrement de doctorants, enseignement) au niveau national et international.

**Nicolas PARADOT**, diplômé de l'Ecole Centrale Nantes en 1996, Thèse de doctorat en Aérodynamique de l'Université de Poitiers en 2001. Ingénieur de recherche en aérodynamique à la direction Innovation & Recherche puis à la direction du Matériel SNCF depuis 2001, il est depuis 2014 ingénieur d'affaires à la Direction Interopérabilité & Normalisation. Expert en aérodynamique externe (réduction de la traînée, sensibilité aux vents traversiers, envol de ballast, etc.) et aéroacoustique.

**Olivier PASQUALINI**, ingénieur de calcul scientifique chez AREVA NP, auparavant Université de Nantes, DCNS (THALES Group).

**Gilles SAUSSINE**, Thèse de doctorat en Mécanique, Génie mécanique et Génie civil de l'Université de Montpellier en 2004 ; il rejoint la Direction Innovation & Recherche SNCF en 2005, pour rejoindre la direction Ingénierie & Projets à SNCF Réseau en 2014 ; ses récentes recherches portent sur la modélisation des milieux granulaires, particulièrement ciblée sur le ballast ferroviaire, les processus d'ingénierie et l'envol de ballast.

**Paul SCHIMMERLING**, diplômé d'ingénieur et études approfondies de l'UTC (promotion 1978). Co-auteur de l'ouvrage « *Pratique des plans d'expériences* » publié par Lavoisier. Ingénieur Expert en statistique appliquée et fiabilité chez Renault. Président de la section technique Qualité Fiabilité de la SIA (Société des Ingénieurs de l'Automobile).

**Franck SCHOEFS**, professeur à l'Université de Nantes, Ecole Centrale de Nantes et à l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, titulaire de l'agrégation et d'une habilitation à diriger des recherches.

**Thierry YALAMAS**, lauréat de l'agrégation de Génie-Civil en 2000 et docteur en mécanique et matériaux de l'ENPC en 2004. Directeur associé de Phimeca Engineering où il encadre une équipe dont les travaux portent sur la conception et la maintenance de structures robustes par la simulation numérique et les data-science. Les applications relèvent de domaines variés : nucléaire, pétrolier, génie-civil, automobile, etc.

# Introduction

Alain Delage<sup>1</sup>, André Lannoy<sup>1</sup>, Maurice Lemaire<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut pour la Maîtrise des Risques

<sup>2</sup>Institut Français de Mécanique Avancée

---

*RÉSUMÉ* : Cette introduction présente les objectifs de cet ouvrage : vulgariser la fiabilité en mécanique, montrer l'intégration de la fiabilité en mécanique dans l'analyse de risque, montrer les apports des nouvelles méthodes mécaniques et fiabilistes par rapport à l'utilisation de méthodes plus classiques, déterministes, tout en mettant en évidence les éventuelles difficultés d'utilisation. Les 10 cas d'application provenant de différents secteurs industriels sont brièvement décrits. Ils concernent l'analyse de dégradation et la méthode contraintes-résistance.

*ABSTRACT*: This introduction presents the objectives of this book: popularize the reliability in mechanics, show integration of mechanical reliability into risk analysis, show benefits obtained by new structural reliability methods compared to the use of more classical deterministic methods, point out possible use difficulties. The 10 applications from different industrial sectors are shortly described. They concern degradation analysis and the stresses – strength method.

*MOTS-CLÉS* : fiabilité en mécanique, analyse de risque, méthode contraintes-résistance, applications industrielles, apports, difficultés.

*KEYWORDS*: reliability in mechanics, risk analysis, stresses -strength method, industrial applications, benefits, difficulties.

---

## 1. LES OBJECTIFS DE L'OUVRAGE

Les livres récents sur le sujet de la fiabilité en mécanique et de ses applications tant dans la documentation technique francophone que dans la documentation anglophone sont très peu nombreux. Certes on peut trouver quelques ouvrages académiques, par exemple (Lemaire *et al.*, 2005) ou (Nikulin, Bagdonavicius, 2002). Mais très peu d'ouvrages concernent les applications de ces méthodes (voir par exemple (Thoft-Christensen, 1998)).

Il y a eu pourtant, dans la période récente, des avancées significatives tant sur les démarches et les méthodes que sur les outils logiciels, avancées qui permettent d'aborder des cas industriels complexes avec succès en apportant une précision supplémentaire dans le processus de conception ou de validation. C'est le propos que veut tenir et démontrer le présent ouvrage.



Les principaux objectifs de cet ouvrage sont donc :

- vulgariser (populariser) la fiabilité en mécanique (au sens positif, c'est-à-dire au sens du mot anglais *popularization (to make easily understandable to ordinary people by a simple explanation)*, mot que l'on pourrait d'ailleurs utiliser puisqu'il vient du latin *popularis*, alors que *vulgus*, c'est le peuple !),
- présenter diverses applications industrielles, dans différents secteurs, dans différents usages,
- montrer les différents apports et bénéfices en termes de coûts, de satisfaction des clients/utilisateurs, de performances industrielles ou de sécurité/ sûreté, tout en soulignant les éventuelles difficultés liées aux études de fiabilité en mécanique pouvant être rencontrées,
- montrer qu'une analyse des produits, structures ou système placée dans un contexte incertain apporte aux ingénieurs des informations supplémentaires par rapport à une démarche classique, susceptibles d'améliorer les performances de ceux-ci.

Les contributions sont réparties sur deux thèmes principaux :

- l'analyse de dégradation et les méthodes stochastiques pour le traitement de données de retour d'expérience,
- les méthodes contraintes-résistance appliquées à des structures ou à des composants industriels.

Les contributions de cet ouvrage ont été rédigées par des experts, industriels, universitaires ou consultants, tous membres des groupes de travail et de réflexion « Management, Méthodes, Outils Standards » (M2OS) ou « Sécurité et Sûreté des Structures » (3S) de l'Institut pour la Maîtrise des risques (IMdR).

## 2. LE FIL CONDUCTEUR, LES LIMITES

L'industriel veut :

- assurer la qualité de sa conception, sa robustesse et sa fiabilité dans le temps ainsi que la sécurité des systèmes qu'il exploite ou commercialise, tout en maîtrisant les coûts,
- optimiser les fréquences et les coûts de maintenance, choisir les meilleures stratégies de garantie et de pièces de rechange,
- assurer la continuité de l'exploitation par des actions de maintenance appropriées, la prolongation d'exploitation en luttant contre le vieillissement pour optimiser la durabilité.

Une bonne conception et une maintenance préventive efficace sont ses meilleurs alliés.

Dans un premier temps, le concepteur et l'ingénieur de maintenance veulent éviter la défaillance. Ils se penchent donc sur la nature des mécanismes de dégradation et sur leur cinétique. La maintenance conditionnelle (*health monitoring*) peut leur fournir des informations afin d'anticiper la défaillance, évaluer une durée résiduelle, une fréquence d'inspection, optimiser la maintenance... Ces enseignements de l'analyse de dégradation sont utiles dès la phase de conception initiale afin d'optimiser le dimensionnement et de trouver les parades les mieux adaptées.

Dans un second temps, si le composant est bien connu et ne subit qu'un faible nombre de mécanismes de dégradation, s'il est suffisamment « simple » et que la physique des phénomènes est bien comprise, l'analyste fait appel aux méthodes contraintes-résistance qui peuvent l'aider à mettre en évidence les variables importantes (les facteurs d'importance) et à évaluer l'évolution de la fiabilité dans le temps. Cela lui permet d'optimiser sa conception et aussi la maintenance et la durabilité des systèmes- structures et composants.

Enfin, dans un troisième temps, si le composant ou la structure est complexe et qu'il connaît un nombre important de mécanismes de dégradation et de modes de défaillance, l'analyse de défaillance et l'approche statistique deviennent incontournables. Le résultat final est alors présenté dans des recueils de fiabilité dont les données sont indispensables aux études de disponibilité, fiabilité et surtout de sécurité/ sûreté.

Chaque contribution de cet ouvrage présente une application pratique de la fiabilité en mécanique, montrant la démarche et la méthodologie, les hypothèses et les données, les bénéfices et les apports, mais aussi les difficultés éventuelles rencontrées pour traiter l'application.

Le tableau 1 positionne la fiabilité en mécanique, en fonction de différents critères :

- les enjeux industriels,
- les phases du cycle de vie où sont principalement utilisées les méthodes des trois thèmes,
- les composants étudiés (actifs ou passifs),
- les tâches préalables en amont, faisant partie du contexte (au sens de la norme ISO 31000, 2009),
- les principaux résultats obtenus à l'issue de l'application de la méthode,
- les difficultés que l'on peut rencontrer au cours de l'analyse.

Tableau 1. Complémentarité des approches de la fiabilité en mécanique.  
 Légende : AMDE (AMDEC) : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets  
 (et de leur Criticité).

<b>Fiabilité en mécanique - Méthodes</b>	<b>Méthodes contraintes/ résistance et assimilées (FORM/SORM, ....)</b>	<b>Analyse de dégradation</b>	<b>Méthodes stochastiques et recueils</b>
Enjeux	Disponibilité, fiabilité, optimisation de la maintenance et des inspections, optimisation des coûts Optimisation des essais, diminution du nombre de prototypes,...	Conception, vieillissement, durabilité, maintenance conditionnelle, inspection	Sécurité/sûreté, analyse de risque
Phases du cycle de vie	Conception, prolongation d'exploitation	Avant-projet, conception, exploitation	Avant-projet, conception, exploitation
Objets concernés	Composants et structures simples et critiques	Matériaux, charges d'exploitation	Composants et structures complexes et environnement
Tâches préalables	Analyse du retour d'expérience existant, Analyse des profils de mission, Analyse Fonctionnelle, Méthodes d'allocation, AMDE, AMDEC	Essais physiques, essais accélérés, mise en place d'une structure de recueil de données d'inspection et de surveillance, traitement et modélisation de l'information	AMDE et analyse des conséquences
Résultats	Fiabilité, optimisation des inspections, marges, facteurs d'importance, coefficients dits de « sécurité »	Cinétique de dégradation, méthodes de surveillance (seuils, diagnostic, pronostic, durée de vie résiduelle)	Identification des scénarios, analyse préliminaire des risques, analyse de risque, données EPS (évaluation probabiliste de la sûreté) Fiabilité opérationnelle
Principales difficultés rencontrées	Démarche considérée complexe et exigeante vis-à-vis des données, approche pluridisciplinaire Acculturation aux probabilités, formation aux méthodes	Détection des défauts, qualité des données, interprétation experte	Conviction des décideurs, obtention des informations, interprétation experte

Comme cela est montré dans les chapitres qui suivent, la « fiabilité en mécanique » ne se réduit pas à « la loi de Weibull » ou à la « méthode contraintes-résistance ». Le choix et la mise en œuvre des méthodes de prévision adaptées à chaque structure, à chaque composant et à chaque contexte d'étude nécessitent une bonne connaissance des bases de la mécanique ET de la fiabilité.

Il faut garder en mémoire que la « rigueur mathématique » des modèles et leur aptitude à « produire des décimales » ne doit pas faire oublier que la précision des estimations est dépendante :

- de l'exhaustivité des analyses qualitatives : c'est bien souvent une cause ou une combinaison de causes « oubliées » qui conduira à la défaillance (les exemples du pont de Tacoma (1940)-non prise en compte d'un mode de couplage aéroélastique de torsion-flexion sous l'effet du vent –, des accidents des premiers avions à réaction commerciaux, les Comet, par méconnaissance de règles d'endommagement en fatigue de la structure dans les singularités géométriques, de Fukushima où l'on a oublié le retour d'expérience des tsunamis du passé, restent en mémoire),
- de la qualité des données d'entrée (connaissance toujours limitée de la répartition statistique réelle des contraintes et des résistances), de leur justesse et de leur pertinence,
- de l'« écart » entre le modèle et la réalité physique, compte tenu qu'un modèle est toujours une représentation simplifiée de la réalité.

### 3. RETOUR VERS L'HISTOIRE

Il n'est pas question de dresser un historique des méthodes mais de revenir sur quelques faits importants.

La sécurité/sûreté des structures a toujours été un besoin fort des sociétés. Dès les III<sup>e</sup> et II<sup>e</sup> millénaires avant J-C, la tenue des maisons face aux menaces volcaniques ou sismiques fut une préoccupation forte des civilisations cycladiques. Des techniques de construction des maisons ont été préconisées (musée archéologique de l'île de Milos).

Vers 1730 avant J-C, le roi Hammourabi développe un premier règlement visant à assurer un certain niveau de sécurité dans les maisons (articles 229 et 230 du code d'Hammourabi, musée du Louvre).

Au temps de l'empereur Auguste, Vitruvius explique qu'une structure doit présenter les trois qualités suivantes :

- *utilitas* : l'utilité, la satisfaction des besoins ;
- *firmitas* : la solidité, la consistance, l'état robuste, la durabilité ;
- *venustas* : la beauté, l'esthétique.

Les préoccupations de Vitruvius sont bien des préoccupations d'ingénieur en sûreté de fonctionnement (on pourrait ajouter : encore au XXI<sup>e</sup> siècle). Vitruvius semble bien être le premier à se préoccuper des besoins et de l'utilité (le premier à penser à une analyse fonctionnelle), de la fiabilité et de la durabilité des structures, de la capitalisation des connaissances existantes, de la codification des dispositions constructives.

En 1776, Buffon observe que les compagnons, les charpentiers ont une connaissance très imparfaite de la force et de la résistance du bois qui dépendent de l'organisation du bois et de quelques circonstances particulières. Pendant plusieurs années, il effectue une campagne d'essais sur des poutres en bois (il enregistre : longueur, largeur, masse, charge, temps à la rupture, flèche). Ce sont, à notre connaissance, les premiers essais de fiabilité en mécanique. A cette époque les méthodes de régression n'existaient pas.

Peu d'études de fiabilité semblent avoir été réalisées au XIX<sup>e</sup> siècle lors de la révolution industrielle. Elles furent concentrées sur la durée de vie en fatigue, phénomène mal identifié à l'époque, et sur la maîtrise de la qualité des matériaux, qui a induit de grandes conséquences comme l'effondrement du pont de Tay en Ecosse (1879). Cependant, selon (Ligeron, 1974 ; Villemeur, 1988), la durée de vie des roulements à bille a fait l'objet d'études poussées pour l'expansion du chemin de fer (multiplication d'incidents suite à rupture de boîtes d'essieux chaudes qui provoquent des débuts d'incendie et, quelquefois, le déraillement). L'industrie électrique en développement, pour assurer la fiabilité du réseau et de la distribution, met des lignes de transport et des transformateurs en parallèle (application du principe de la redondance). Il est vrai que, étant moins contraignantes à la fois sur les coûts et sur les réglementations de sécurité, la conception du XIX<sup>e</sup> siècle et celle du début du XX<sup>e</sup> siècle ne nécessitent pas vraiment le recours aux méthodes fiabilistes.

Entre 1870 et 1910, on comptabilise en Amérique du Nord plus de dix mille explosions de chaudières. Devant ce fléau et les très nombreuses défaillances et ruptures constatées sur les matériels mécaniques, l'ASME (*l'American Society of Mechanical Engineers*) est créée en 1880 avec l'objectif premier d'améliorer la sécurité et la sûreté. En 1909, l'ASME crée un comité pour mettre en place une recommandation et un premier code sur les chaudières est publié en 1914-1915.

L'introduction des principes de « *mass production* » au début du XX<sup>e</sup> siècle (le « fordisme ») a conduit à développer les approches (en particulier statistiques) permettant de maîtriser la « fiabilité » et la « disponibilité » des machines, condition indispensable à leur succès. Dès 1908, Student (de son vrai nom William Gosset, ingénieur chimiste aux brasseries Guinness à Dublin) met au point les « méthodes statistiques pour l'industrie ».

L'année 1926 semble être une année clef pour la fiabilité en mécanique. Max Mayer (1926) propose d'utiliser en conception de structures de génie civil les valeurs moyennes et les variances des variables.

Frederick Thomas Peirce en 1926 amène la première idée fiabiliste qui allait aboutir

aux travaux de l'allemand Robert Lusser (dès 1933, en fiabilité des systèmes) et du suédois Waloddi Weibull (dès 1939). Il considère une chaîne et il augmente progressivement la charge de traction jusqu'à rupture. Évidemment, la rupture se produit sur le maillon le plus faible de la chaîne. « Le fait que la résistance d'une chaîne est celle de son maillon le plus faible est un axiome dont les développements sont les plus importants ». Cette considération, du domaine de la résistance des matériaux, conduisit à l'étude de la fiabilité d'un composant et à la modélisation des données de contraintes et de résistance mécanique.

Dès la fin des années 1920, les premières bases de retour d'expérience apparaissent :

- des relevés concernent les fréquences de pannes sur les matériels aéronautiques, les moteurs en particulier ; avec le développement du transport aérien apparaissent aussi les bases d'accidents d'avion ; on se fonde sur ce retour d'expérience pour déterminer les améliorations et pour fixer des objectifs de sûreté de fonctionnement ;
- en 1932, John R. Freeman établit l'historique des séismes (et de leurs effets) survenus aux Etats-Unis ; il collecte un ensemble de données géotechniques, les causes de dommages sur les structures et propose des solutions d'atténuation des effets d'un séisme.

Les premiers objectifs quantitatifs de fiabilité sont définis dans les années 1930-1940 par Sir Alfred Grenville Pugsley : le taux d'accident d'un avion « en considérant toutes les causes de pannes susceptibles d'entraîner un accident » ne doit pas dépasser  $10^{-5}$  par heure, dont  $10^{-7}$  par heure pour les causes liées à la structure de l'avion (Villemeur, 1988) ; il s'agit d'un des premiers objectifs quantifiés de risque.

La sécurité/sûreté des structures n'est assurée que si la probabilité de défaillance est inférieure à un seuil fixé *a priori*, dit critère d'acceptabilité. Une étude complètement déterministe ne peut pas tenir compte de la diversité de phénomènes physiques et de la variabilité des paramètres en jeu et conduit irrémédiablement soit à des surcoûts soit à des sous-sécurités. L'approche mixte permet de mieux appréhender les incertitudes et de parvenir à un résultat à la fois plus proche des conditions réelles liées à l'utilisation et à l'environnement et plus rigoureux.

Ces quelques années, entre 1926 et 1939, sont à l'origine des méthodes actuellement utilisées en fiabilité mécanique. Bien sûr d'énormes progrès ont ensuite été réalisés, notamment dans la période des années 1940 à 1960, mais les concepts originels datent de 1926.

La mécanique des sols, source de très grandes incertitudes et l'exploitation pétrolière off-shore, parce que les ingénieurs imaginaient des structures qui ne s'appuyaient pas sur une codification résultant d'une expérience inexistante, ont été des moteurs du développement des méthodes fiabilistes.

En France, depuis la seconde guerre mondiale, c'est principalement à Jean-Claude Ligeron dans l'industrie (dès 1974) et à Maurice Lemaire dans le milieu académique (dans les années 1980) que l'on doit l'impulsion des études de fiabilité en mécanique

et leur essor. En 1981 est publié par AFNOR/AFCIQ le « guide d'évaluation de la fiabilité en mécanique ». L'industrie des transports aériens (dès les années 1950) et ferroviaires, l'industrie nucléaire (EDF en 1986, CEA dès la fin des années 1980), l'industrie automobile (Journées d'étude sur la fiabilité et la maintenabilité - Société des Ingénieurs de l'Automobile - Paris - janvier 1981) et le secteur du génie-civil sont probablement les pionniers des premières applications de ces méthodes de fiabilité en mécanique.

Il faut enfin souligner que si des démarches conceptuelles ont pu être imaginées dès le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, c'est le progrès du calcul numérique qui s'est avéré essentiel pour leur mise en œuvre. Dès la fin du siècle, il est possible de sortir des limitations des modèles linéaires et de l'hypothèse gaussienne.

#### 4. LA PLACE DE LA FIABILITÉ EN MÉCANIQUE DANS L'ANALYSE DE RISQUE

La norme ISO 31000 définit le risque comme l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs (2009). Notons que cette définition impose que des objectifs ont été fixés et partagés *a priori*.

Une analyse de risque tente de répondre aux questions suivantes :

- que peut-il arriver ?
- quelle est la probabilité d'occurrence ?
- si cela se produit, quelles sont les conséquences ?

L'analyse de risque est une aide à l'explicitation d'une décision.

La fiabilité en mécanique se retrouve dans toutes les phases :

- dans la phase d'établissement du contexte : la description, la géométrie, la fonction, la réglementation, le retour d'expérience historique, les exigences ;
- dans l'identification : le scénario, les modes de défaillance et les mécanismes de dégradation ;
- dans les phases d'analyse et d'évaluation : l'estimation de la probabilité d'occurrence et des conséquences ;
- dans le traitement des causes et des conséquences : les options de maîtrise des risques (barrières, plan de sécurité, programme de maintenance et du soutien, etc.) ;
- dans la phase de pilotage et de révision, par le retour d'expérience.

La fiabilité en mécanique intervient principalement dans la phase d'analyse et de traitement où s'effectuent la quantification, déterministe et probabiliste, et la hiérarchisation des risques, où on estime le risque, c'est-à-dire sa probabilité d'occurrence et sa gravité.

La figure 2 (De Rocquigny *et al.*, 2008; Yalamas, 2013) donne le principe général du calcul mécanique et probabiliste de la méthode contraintes-résistance, permettant l'estimation de la probabilité de défaillance. L'étape A est l'étape de modélisation du modèle mécanique. L'étape B quantifie toutes les sources d'incertitudes issues des données pour les paramètres d'entrée. L'étape C propage les incertitudes dans le modèle et calcule les résultats de sortie, en particulier la probabilité de défaillance Pf. L'étape C' permet de déterminer les variables les plus influentes, celles pour lesquelles il conviendra de faire un effort de collecte de données et de modélisation, pour une analyse plus fine de la fiabilité.

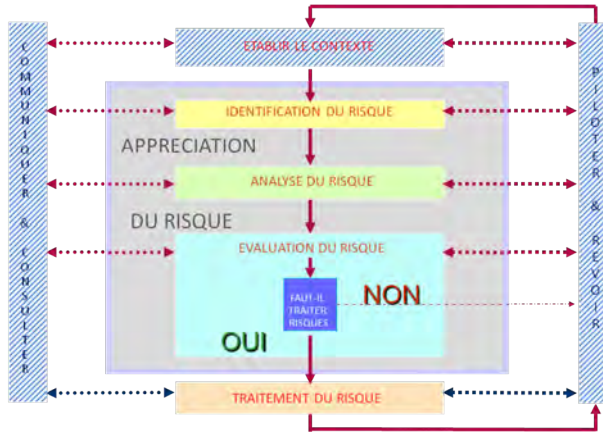


Figure 1 : Le processus d'analyse de risque tel qu'il est défini dans l'ISO 31000.

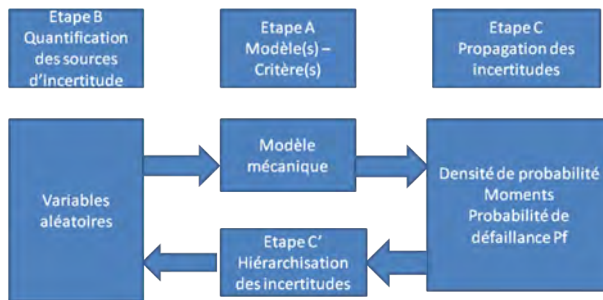


Figure 2 : Le principe du calcul mécanique et probabiliste de la méthode contraintes-résistance.

Par exemple, dans le cas des structures industrielles, la défaillance majeure est le plus souvent une perte d'intégrité ou une perte de confinement (plus ou moins importante). On peut alors déterminer par la méthode contraintes-résistance une probabilité de défaillance Pf pour le scénario responsable. On comparera Pf à l'objectif de fiabilité.



S'il n'y a pas d'autre conséquence que cette perte de confinement, la probabilité  $P_f$  est aussi la probabilité d'occurrence du risque que l'on comparera au seuil d'acceptabilité du risque.

S'il y a d'autres conséquences (incendie, dispersion d'un nuage inflammable, dérive d'un nuage toxique, éclatement, BLEVE (*boiling liquid expanding vapor explosion*), explosion d'un nuage de gaz, rejet radioactif...), la probabilité  $P_f$  devra être corrigée par :

$$P_f \times P \text{ (./ perte de confinement)}$$

où  $P$  (./ perte de confinement) est la probabilité conditionnelle d'une conséquence à la suite d'une perte de confinement.

Tableau 2 : Quelques valeurs de fréquence de défaillance (catastrophique) de structures, estimée à partir du retour d'expérience historique.

Structure	Fréquence moyenne de défaillance (x 10 <sup>6</sup> heures de service)	Intervalle de confiance à 90% (x 10 <sup>6</sup> heures de service)
Section droite de tuyauterie métallique (1)	0.027/km	0.0005 ; 0.1040
Tuyauterie (4), valeur médiane générique	0.100 /km	37. ; 750.
Pipelines (1)	0.442/ km	0.0074 ; 1.7100
Pipelines <460 mm (2)	0.075/km	-
Récipient métallique à la pression atmosphérique (1)	0.985	0.127 ; 3.020
Récipient sous pression (1)	0.0109	0.0002 ; 0.0424
Réservoir (5)	0.97	-
Gazoduc de gaz naturel (1997-2001) (3)	0.024/km	-
Gazoduc de gaz naturel <150mm (2)	0.035/km	-
Gazoduc de gaz liquéfié < 460mm (2)	0.05 /km	-
Éolienne (2008)	0.445	-
Grands barrages (2001)	0.0016	-
Tout barrage (1999)	0.057	-
Ponts autoroutiers (2001)	0.034	-
Ponts et bâtiments (2001)	0.0011	-

(1) American Institute of Mechanical Engineers, 1989 (2,) EDF R&D, 1967-1982, 1984. Observations en France, (3) 5th EGIC Report 1970-2001, décembre 2002, valeurs européennes, (4) RMC reliability data handbook, February 1991, (5) EG&G, Idaho National Engineering Laboratory, February 1990.

Le tableau 2 donne quelques fréquences de défaillance catastrophique pour différentes structures industrielles ou de génie civil. Ces valeurs ont été déterminées à partir de méthodes statistiques sur des statistiques d'accidents.

La figure 3 explicite le processus de décision, une fois l'analyse de risque réalisée, lorsque la préférence est la sécurité/sûreté.

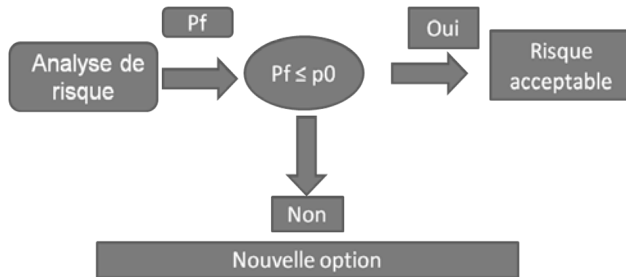


Figure 3 : L'analyse de risque: une aide à la décision (1).  
(Critère probabiliste d'acceptation  $p_0$ , rôle prédominant de la sécurité/ sûreté)

En réalité d'autres critères interviennent, économiques, financiers, environnementaux, sociétaux, etc. Dans le cas d'un choix économique, qui est le plus courant en pratique, le critère est l'espérance mathématique de la valeur actualisée nette  $E(VAN)$ . La figure 4 schématise le processus de décision dans ce cas.

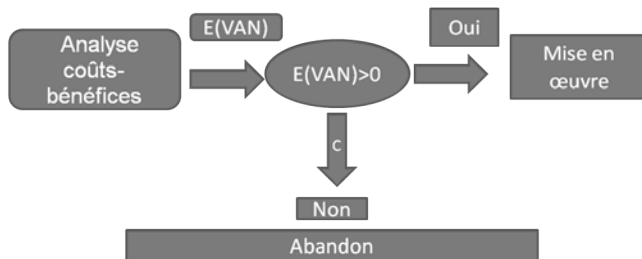


Figure 4 : L'analyse de risque: une aide à la décision (2).  
(ici point de vue économique, mais multiples points de vue : sociétal, environnemental, etc.)

## 5. PRÉSENTATION DU CONTENU DE L'OUVRAGE

Le tableau 3 recense les cas présentés dans les différents chapitres de cet ouvrage.

Tableau 3 : Liste des cas traités.

Ch	Titre	Auteur principal	Méthodes utilisées	Application
1	Les problèmes « contraintes-résistance »	Julien Baroth, Thierry Yalamas	Regard sur les différentes démarches : déterministe, semi-probabiliste, probabiliste, probabiliste avec optimisation économique. Estimation des marges	Aéroréfrigérant
2	La Méthode Contraintes-Résistance au bureau d'étude	Paul Schimmerling	Calculs classiques de contraintes et de fatigue. Approche fiabiliste par la prise en compte de la variabilité des usages et des propriétés des matériaux	Pièces mécaniques automobiles. Carter de boîte de vitesse
3	Optimisation fiabiliste de la conception	Younes Aoues	Optimisation de la conception : RBDO ( <i>Reliability Based Design Optimization</i> ). Optimisation fiabiliste par la prise en compte des incertitudes, de la forme géométrique et d'autres facteurs. Calcul d'une probabilité de défaillance.	Carte électronique, composant HAP ( <i>High Power Amplifier</i> )
4	Calibration de coefficients partiels dans l'industrie navale	Franck Schoefs	Aide à la conception. Calcul de contraintes dans une zone à concentration de contrainte en s'aidant d'un modèle aux éléments finis stochastiques. Analyse de sensibilité sur les paramètres géométriques.	Cordons de soudures sur des structures marines
5	Approche probabiliste de la tenue d'un pressuriseur	Emmanuel Ardillon	Construction d'un argumentaire pour l'appréciation de l'intégrité mécanique du pressuriseur. Utilisation de méthodes déterministes (rupture brutale, vieillissement thermique) et approche probabiliste prenant en compte les incertitudes relatives à la géométrie et aux chargements. Estimation de marges.	Pressuriseur

6	Optimisation de la maintenance d'un assemblage TGV.	Alaa Chateuneuf	Approche contraintes-résistance. Optimisation d'une politique d'inspections. Calcul de contraintes par éléments finis. Calcul de dommage en fatigue par un algorithme <i>rainflow</i> . Approche fiabiliste prenant en compte les incertitudes sur les conditions de service, la géométrie, les chargements.	Équipement ferroviaire
7	Modélisation stochastique d'une cinétique de dégradation	Antoine Grall	Évaluation d'une cinétique de dégradation à partir d'un retour d'expérience d'inspections - Estimation d'une durée de vie résiduelle et planification de maintenance	Composant structurel d'une centrale électrique
8	Dimensionnement au séisme d'ouvrages de génie civil	Fabien Duco, Carmen Martin	Analyse de vulnérabilité d'un bâtiment au séisme, Méthodes FORM/ SORM, Facteurs d'importance.	Bâtiment de construction traditionnelle
9	Caractérisation de la robustesse structurale	André Orcesi	Approche pour quantifier l'écart entre une défaillance locale et une défaillance globale. Recherche de cheminements de défaillance dans une structure.	Poutre de viaduc
10	Envol de ballast pour les lignes ferroviaires à grande vitesse	Nicolas Paradot	Analyse de risque. Utilisation d'une méthode contraintes-résistance afin de définir un niveau de risque. Caractérisation de l'envol de ballast par mesures et simulation. Évaluation du niveau de risque et hiérarchisation pour différents types de trains.	Endommagement de l'infrastructure et du matériel roulant par envol de ballast

Le *chapitre 1* (Julien Baroth, Thiery Yalamas) « Les Problèmes contraintes - résistance » introduit la démarche générale contraintes-résistance et l'applique à une structure vieillissante (réseaux tubulaires d'un aéroréfrigérant posés sur des poutres en béton). Les auteurs distinguent quatre regards :

- de conception déterministe (de niveau 0),
- d'approche semi-probabiliste (de niveau I) permettant de déterminer des coefficients partiels,

- probabiliste (de niveau II et III) où l'on recherche la conception pour laquelle la probabilité  $P_f$  est la plus faible, on se place au maximum de vraisemblance de la défaillance, en un point appelé point de conception,
- probabiliste de niveau IV, avec optimisation économique.

Une approche déterministe et une approche probabiliste sont appliquées, prenant en compte deux mécanismes de dégradation: le dépôt de tartre sur les échangeurs et la corrosion. Elles ont permis d'obtenir une estimation réaliste des marges et des pronostics de durée de vie, et de faire les meilleurs choix en matière de maintenance préventive. Cet exemple est une excellente illustration de l'utilisation et des bénéfices que l'on peut obtenir des méthodes contraintes- résistance.

Le *chapitre 2* « La Méthode contraintes-résistance au bureau d'étude » (Paul Schimmerling) montre l'intérêt du recours aux méthodes de fiabilité prévisionnelle et expérimentale pour garantir la fiabilité en clientèle de pièces mécaniques automobiles. Ces méthodes prennent en compte les deux sources de variabilité caractéristiques du produit automobile :

- la diversité des usages clients, dans les différents marchés et zones géographiques ;
- la variabilité de la résistance des matériaux ; celle-ci est non négligeable et s'accroît avec le nombre de fournisseurs susceptibles de fabriquer une pièce automobile dans le monde.

La méthode est développée sur la validation de la résistance en fatigue d'un carter de boîte de vitesses mécanique.

L'approche traditionnelle fait appel à des calculs classiques de contraintes et de fatigue. La fiabilité est vérifiée par le respect d'un coefficient de sécurité, souvent connu d'expérience. L'approche fiabiliste incite à remplacer les coefficients de sécurité, par une prise en compte réaliste de la variabilité des usages et de la résistance en fatigue ; le modèle fiabiliste est recalé sur les résultats clientèle réseau. Il est nécessaire de capitaliser et analyser les retours de garantie, les retours du réseau (même en l'absence de défaillance), de caractériser la loi contrainte (forme et dispersion en fonction des marchés), d'actualiser les caractéristiques statistiques de la résistance en fatigue.

Cette approche a permis rapidement au bureau d'étude de donner un avis sur la fiabilité en clientèle, même avec très peu de données.

Le *chapitre 3* « Optimisation fiabiliste de la conception » (Younes Aoues) s'intéresse aux méthodes et outils d'optimisation tant technique (optimisation d'une forme géométrique par exemple) qu'économique. Dans un premier temps le chapitre évoque la méthodologie générale physico-fiabiliste puis classe les différentes méthodes de propagation des incertitudes. Les méthodes d'optimisation déterministe s'appuient sur la définition de coefficients partiels de sécurité. Les approches fiabilistes (appelées RBDO, *Reliability Based Design Optimization*) sont plus

rigoureuses car elles prennent en compte les incertitudes relatives aux paramètres d'entrée des modèles. L'application présentée dans ce chapitre concerne l'optimisation de la forme géométrique d'un amplificateur de puissance (Composant HPA, *High Power Amplifier*) soumis à la fatigue. On montre en particulier que l'optimisation déterministe ne permet pas d'assurer les exigences de fiabilité alors que l'optimisation fiabiliste permet de prendre en compte les incertitudes et d'optimiser la géométrie du composant (optimisation des épaisseurs) et de calculer une probabilité de défaillance.

Le *chapitre 4* « Calibration de coefficients partiels sans l'industrie navale » (Franck Schoefs) est *a priori* plus proche de la mécanique probabiliste que de la fiabilité des structures. L'auteur s'intéresse à des cordons de soudure, tels qu'on peut les rencontrer sur des structures marines, soumis à des contraintes cycliques engendrant des phénomènes de fatigue. Le cordon se situe dans une zone à concentration de contrainte. L'amplitude de la contrainte dépend fortement des paramètres géométriques qui présentent de grandes incertitudes, comme le montre une campagne de mesures non destructives. La modélisation est effectuée à l'aide d'un modèle aux éléments finis stochastiques. On cherche une approximation du coefficient de concentration de contrainte en s'aidant d'une analyse semi-probabiliste optimisée, afin de permettre un calcul simple des coefficients partiels. Après une présentation de la démarche, une application à un cordon de soudure d'un assemblage en T est réalisée. Une analyse de sensibilité est effectuée pour mettre en évidence les paramètres géométriques les plus importants, à savoir dans ce cas le rayon de raccordement et l'angle de raccordement. Des coefficients partiels ont été déterminés à partir de la définition d'un état limite, ce qui a permis une formulation semi-probabiliste du coefficient de concentration de contraintes pour des assemblages en T soudés. L'application pourrait être généralisée en classant les structures selon l'épaisseur.

Dans le nucléaire, les approches probabilistes ont été engagées en complément de l'approche réglementaire ou conventionnelle déterministe. Le *chapitre 5* « Approche probabiliste de la tenue d'un pressuriseur » (Emmanuel Ardillon) s'intéresse à un composant important pour la sûreté, remplaçable : le pressuriseur, sur lequel neuf zones sensibles ont été identifiées comme les plus critiques. Elles sont affectées principalement par le vieillissement thermique (enceinte), suivi d'une éventuelle rupture brutale et par la fatigue (au niveau des piquages, faïençage). L'objectif de l'approche probabiliste réalisée est de fournir un argumentaire pour l'appréciation de l'intégrité mécanique du pressuriseur. Deux modèles déterministes sont proposés : un modèle de défaillance par rupture brutale et un modèle de dégradation par vieillissement thermique. L'approche propose une loi probabiliste de ténacité et prend en compte les incertitudes relatives à la géométrie, aux chargements notamment ceux liés aux transitoires thermiques, à l'existence de défauts. La méthodologie a été testée sur deux configurations d'épreuves hydrauliques. L'auteur montre qu'il n'est pas possible d'observer un défaut conventionnel de taille 20mm pour la durée de vie prévue à la conception. Mieux, il serait possible de prolonger la

durée d'exploitation d'une dizaine d'années sans avoir à mener de nouvelles investigations. Ce résultat est lié aux hypothèses de modélisation des incertitudes affectant les données d'entrée du modèle mécanique (notamment la borne inférieure de la distribution de ténacité, la hauteur du défaut conventionnel). Il montre l'intérêt d'une approche probabiliste pour identifier les marges existantes et pour compléter une justification déterministe.

Le *chapitre 6* « Optimisation de la maintenance d'un assemblage de TGV » (Alaa Chateaneuf) présente également une approche contrainte-résistance, dans ce cas sur un équipement ferroviaire : un assemblage de pièces par des vis précontraintes, destinée à améliorer la politique d'inspection aux coûts optimisés. Cet assemblage est soumis à des dommages par fatigue, évalués par une méthode type *rainflow* après une analyse des contraintes par éléments finis, et des dommages par corrosion sur des écrous. De nombreux paramètres du modèle sont incertains, ce sont notamment : les conditions de service, la présence de défauts, la géométrie, les incertitudes du modèle mécanique et les variations des chargements et des facteurs de dommage, les effets de vieillissement, enfin les incertitudes liées aux opérations de maintenance. L'approche fiabiliste est donc tout à fait légitime. Les résultats de cette étude montrent que malgré la grande marge de sûreté vis-à-vis du chargement appliqué, l'assemblage vissé reste très sensible aux dispersions des paramètres, ce qui impose d'améliorer la robustesse de l'assemblage ou de prévoir une reconception. L'impact des inspections (visuelle, au couple ou remplacement préventif) sur l'optimisation de la politique de maintenance a été estimé, mais ces solutions semblent peu probantes.

Le *chapitre 7* « Modélisation stochastique d'une cinétique de dégradation » (Antoine Grall) concerne l'exploitation et l'analyse de données d'un retour d'expérience d'inspection de structures ou de composants. Le chapitre utilise un processus stochastique en temps continu pour évaluer un niveau de dégradation lorsque la structure ou le composant sont inspectés à des instants différents. Il s'agit surtout d'évaluer une cinétique de dégradation afin d'évaluer une durée de vie résiduelle et de planifier ou optimiser une opération de maintenance. Les trajectoires de dégradation sont variables et les processus stochastiques permettent de les tracer. L'indicateur de dégradation (qui est donc une grandeur physique mesurable) est une taille de défaut mesurée à des instants successifs. Il est continu croissant et doit rester inférieur à une valeur seuil. Deux processus peuvent être utilisés, le mouvement brownien et le processus gamma, et la méthodologie est décrite dans le chapitre. L'exemple concerne le suivi de la taille d'un défaut d'un composant structurel de centrale électrique. Le processus gamma est appliqué. Ses paramètres sont estimés à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance et les intervalles de confiance sont évalués par la méthode du *bootstrap*. L'exemple montre bien l'intérêt industriel de la méthode pour pronostiquer une durée de vie résiduelle et planifier les inspections ou une opération de maintenance.

Le *chapitre 8* « Dimensionnement au séisme d'ouvrages de génie civil » (Fabien Duco, Carmen Martin) se place dans le cadre des études parasismiques. L'utilisation

des concepts de fiabilité mécanique est là une nécessité. Les concepts de dimensionnement probabiliste s'avèrent plus pertinents car les phénomènes physiques mis en jeu présentent un caractère fortement aléatoire. Dans un premier temps, le risque sismique est caractérisé par un spectre d'accélération. L'analyse de vulnérabilité du bâtiment de construction traditionnelle se traduit par une courbe de vulnérabilité calculée à l'aide d'un modèle semi-analytique. Cette méthode semble préférable à l'utilisation des méthodes empiriques issues du retour d'expérience ou qualitatives d'inspections visuelles, moins précises. L'approche probabiliste utilise des méthodes classiques de type FORM/SORM en première approximation (qui semblent suffisantes mais que l'auteur juge imparfaites dans le cas des séismes), permettant de calculer la probabilité de défaillance du bâtiment. La méthode met en évidence la résistance du mortier comme facteur d'importance. Elle met aussi en évidence les renforcements qu'il y aurait à opérer pour se protéger du risque sismique.

Le *chapitre 9* « Caractérisation de la robustesse structurale » (André Orcesi) aborde le problème de la robustesse d'une structure (que l'on peut définir brièvement par l'insensibilité d'une performance à une variation importante d'un paramètre incertain). Il propose une approche globale pour quantifier l'écart entre une défaillance locale (ayant des modes de défaillance) et une défaillance globale. À l'aide de méthodes d'arbres d'évènements, comme *branch and bound*,  $\beta$ -*unzipping* et  $\beta$ -*unzipping* avec bornage, il est possible de calculer la propagation d'une défaillance dans un ouvrage, d'identifier ainsi la défaillance globale la plus probable, de déduire des effets dominos et d'estimer l'écart entre la probabilité de défaillance locale et la probabilité de défaillance globale. La méthode est appliquée à une poutre de viaduc, la défaillance locale étant une zone fissurée dans le talon de la poutre, la défaillance globale étant un volume de béton fissuré excédant un seuil. La démarche permet de quantifier la robustesse d'une structure, qu'elle soit existante ou nouvelle.

Le *chapitre 10* « Envol de ballast pour les lignes ferroviaires à grande vitesse » (Nicolas Paradot) traite d'un problème plutôt nouveau et quelque peu complexe, lié à l'endommagement de l'infrastructure et du matériel roulant à l'envol de ballast lors des passages des trains. Le chapitre propose une méthode d'analyse de ce phénomène, basée sur la méthode contraintes-résistance afin de déterminer un niveau de risque d'apparition du phénomène. Dans une première étape, à partir de mesures sur site et de simulations numériques, il a été possible de caractériser le risque d'envol par un paramètre représentatif et pertinent du phénomène: la puissance totale du signal de vitesse d'air (mesurée au passage du train). Dans un second temps, la méthode contraintes-résistance peut évaluer l'interaction entre deux densités de probabilité indépendantes. Dans ce cas de l'envol de ballast, on définit la contrainte comme étant la variabilité de la puissance du signal pour un train donné et la résistance comme la variabilité de la puissance du signal sur l'ensemble des signaux disponibles. Ceci permet d'estimer un niveau de risque d'envol de grains de ballast pour différents types de trains et de hiérarchiser les



différents types de trains. L'amélioration du modèle numérique au travers de résultats expérimentaux reste nécessaire afin de valider les différentes relations entre la puissance du signal et les mouvements des grains de ballast au passage des trains. La méthode contraintes-résistance permet donc de caractériser le phénomène d'envol de ballast. Une autre méthode, l'approche GAME (Globalement Au Moins Equivalent) qui consiste à comparer un type de train à un matériel roulant de référence ne permet pas de caractériser précisément car elle utilise les vitesses d'air moyennes. Elle n'est pas discriminante vis-à-vis des différents types de trains et ne peut donc pas être recommandée. Ces résultats montrent qu'en phase de conception, la méthode présentée permet à l'aide d'un seul paramètre d'évaluer le risque d'envol de ballast.

La conclusion met en évidence les principaux enseignements de ces cas industriels tant au niveau des démarches qu'au niveau des applications. Elle indique les principales pistes à développer pour les travaux futurs, tant méthodologiques qu'opérationnelles.

#### RÉFÉRENCES

- J. Baroth, D. Breysse, F. Schoefs *et al.* (2011), *Fiabilité des ouvrages : sûreté, variabilité, maintenance, sécurité*, Hermès Lavoisier.
- Buffon (1776), *Histoire naturelle, générale et particulière*, servant de suite à la Théorie de la Terre & d'introduction à l'histoire des minéraux, Imprimerie Royale, Supplément, Tome Troisième, voir le Onzième Mémoire : expériences sur la force des bois, pp 158-261.
- A. El Hami, R. Bouchaïb (2013), *Incertitudes, optimisation et fiabilité des structures*, Hermès Science-Lavoisier.
- A. Grous (2013), *Fiabilité mécanique appliquée- Etude de cas concrets*, Hermès Sciences-Lavoisier.
- IMdR - *Fiches pédagogiques* de l'Institut pour la Maîtrise des Risques : Fiabilité Prévisionnelle en Mécanique, Fiabilité en Mécanique-la méthode Contraintes-Résistance..., fiche FORM,  
[http://www.imdr.eu/upload/client/document\\_site/Fiches\\_pedago\\_8\\_20140615\\_FR.pdf](http://www.imdr.eu/upload/client/document_site/Fiches_pedago_8_20140615_FR.pdf)
- M. Lemaire, en collaboration avec A. Chateaufort et J-C. Mitteau (2005), *Fiabilité des structures - Couplage mécano-fiabiliste statique*, Hermès Lavoisier.
- M. Lemaire (2014), *Mécanique et incertain*, Collection Génie Mécanique et mécanique des solides, iSTE Editions, Wiley.
- J- C. Ligeron (1979), *La fiabilité en mécanique* - Ed. Desforges, 1979
- J- C. Ligeron (2009), *Cours de fiabilité en mécanique*, www.imdr.eu
- C. Marcovici, J- C. Ligeron (1974), *Utilisation des techniques de fiabilité en mécanique*, PSI (Perfectionnement Scientifique et Industriel), Technique et Documentation.
- H. Procaccia, P. Morilhat (1996), *Fiabilité des structures des installations industrielles*, Collection de la Direction des Etudes et Recherches de EDF, Eyrolles.

## Autres références

- Ardillon E. *et al.* (2010), *SRA into SRA: Structural Reliability Analyses into System Risk Assessment*, An ESReDA project group report, Det Norske Veritas.
- Chateauneuf A., editor *et al.* (to be published in 2018), *Reliability-based Life Cycle Cost Optimization of Structures and Infrastructures*, An ESReDA project group report.
- De Rocquigny E., Devictor N., Tarantola S. *et al.* (2008), *Uncertainty in Industrial Practice-A guide to quantitative uncertainty management*, Wiley.
- Ditlevsen O., Madsen H. O. (1996), *Structural Reliability Methods*, John Wiley and Sons.
- ISO 31000: 2009 (2009), *Management du risque-Principes et lignes directrices-Risk management-principles and guidelines* (voir aussi ISO/ TEC 31010 (2009)-Risk management-risk assessment techniques).
- Lannoy A. *et al.* (2004), *Lifetime Management of Structures*, An ESReDA project group report, Det Norske Veritas.
- Mayer M. (1926), *Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften anstatt nach zulässigen Spannungen*, Springer Verlag.
- Moss T. R. (2005), *The Reliability Data Handbook*, Ed. Professional Engineering Publishing, 2005.
- Nikulin M., Bagdonavicius V. (2002), *Accelerated Life Models, Modelling and Statistical Analysis*, Monographs on statistics and applied probability, Chapman, & Hall CRC, 94.
- Peirce F. T. (1926), *Tensile Tests for Cottons Yarns v. "The Weakest Link" Theorems on the Strength of Long and of Composite Specimens*, Journal of the Textile Institute Transactions, Volume 17, Issue 7, pp T355-T368.
- Shigley Joseph Edward (2006), *Mechanical Engineering Design*, Mc Graw Hill, 8<sup>th</sup> edition.
- Student (William Gosset) (1908a), *The probable error of a mean*, Biometrika. 1908; 6:1-25.
- Student (1908b), *The probable error of a correlation coefficient*, Biometrika 1908; 6: 302-310.
- Thoft-Christensen P. *et al.* (1998), *Industrial Application of Structural Reliability Theory*, ESReDA Safety Series N°2, Det Norske Veritas.
- Villemeur A. (1988), *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*, collection de la direction des études et recherches d'Electricité de France, 67, Eyrolles.
- Weibull W. (1939), *A statistical theory of strengths of materials*, Ing. Vetenskaps Akad. Handl. N° 151; *The phenomena of rupture in solids*, Ing. Vetenskaps Akad. Handl. N° 153.
- Yalamas T. (2013), *Méthodes probabilistes*, journée IMdR « Sensibilisation à l'analyse de fiabilité des structures », 14 novembre 2013.



# Chapitre 1

## Les problèmes « contrainte-résistance »

Thierry Yalamas<sup>1</sup>, Julien Baroth<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Phimeca, 34 rue de Sarliève, 63800, Cournon, France

<sup>2</sup>Université Grenoble-Alpes, 3SR, F-38000 Grenoble, France  
CNRS, 3SR, F-38000 Grenoble, France

---

*RÉSUMÉ : Nous introduisons les problèmes « contrainte-résistance », qui seront développés dans les chapitres suivants. Une présentation générale met en lumière plusieurs des difficultés pouvant être rencontrées dans ce type de problème. Quelques illustrations bibliographiques suivent.*

*ABSTRACT: We introduce « stress-strength analysis », which will be developed in next chapters. A general presentation is proposed, highlighting several obstacles to the resolution of such problems. Some examples are given to illustrate them.*

*MOTS-CLÉS : contrainte-résistance, état-limites, modes de défaillance, fiabilité système*

*KEYWORDS: stress-strength analysis, limit states, failure modes, system reliability*

---

### INTRODUCTION

Cet chapitre « propose une introduction des problèmes « contrainte-résistance » par des exemples à visée pédagogique. Il s'agit formellement d'un système mécanique, proposé à l'étape de la conception ou soumis à la dégradation. Le système peut éventuellement être décomposé en éléments simples. Plusieurs difficultés relatives à la formulation du problème sont soulevées et illustrées, soit à l'échelle du système, soit à l'échelle d'un composant.

#### 1. POSITION DU PROBLÈME « CONTRAINTE-RÉSISTANCE »

Cette appellation recouvre des problèmes analogues mais dans des domaines d'applications différents :

- sûreté de fonctionnement : contrainte-résistance (Lannoy, 2004 ; Ligeron, 2009) ;
- mécanique statique ou dynamique : résistance-sollicitation (« R-S ») (Ditlevesen, 1996 ; Lemaire, 2005) ;
- dégradation par corrosion, usure, fatigue (à grand nombre de cycles, oligo-cyclique (Lannoy, 2004)) ;
- analyse de tolérances (valeur seuil-caractéristique fonctionnelle (Dumas *et al.* 2014) ;

- voire plus généralement des problèmes de type (offre/ressource-demande/besoin), etc.

On prend le parti dans cet article introductif d'utiliser le vocabulaire de la sûreté et de la sécurité de la mécanique des structures.

On considère un système mécanique, dépendant de paramètres incertains, que ce soient des caractéristiques d'un matériau (physiques ou mécaniques), géométriques ou de chargement. Ce système peut être décomposé de manière structurelle (en composants ou structures élémentaires) ou fonctionnelle (en fonctions principale ou secondaires) (Baroth *et al.* 2011). L'analyse (résistance-sollicitation) peut s'appliquer à l'échelle du système (ouvrage complexe) ou d'un composant isolé. Dans tous les cas, on s'intéresse à la réponse mécanique, que l'on écrit sous forme d'un vecteur en vue de représenter  $m$  fonctions de performance de type  $G_i(R,S)$ ,  $i=1,\dots,m$ , telles que :

- $G_i(R,S) < 0$  et  $G_i(R,S) > 0$  représentent respectivement les domaines de défaillance et de sûreté ;
- $G_i(R,S) = 0$  représente l'état-limite. Ces  $m$  fonctions de performance peuvent être par exemple :
  - $m$  modes de fonctionnement ou défaillance du système ou de composants ;
  - $m$  conceptions du système à comparer.

On se propose dans cette introduction de poser quelques questions utiles à la formulation d'un tel problème, qui peut conduire à des résultats différents :

- dans le cas où  $m = 1$ , un même problème peut être formulé avec des fonctions de performance équivalentes mais différentes, ne conduisant pas à la même fiabilité ;
- dans le cas de  $m$  conceptions du système à comparer, on peut aussi se demander quel est le regard sous lequel on étudie la sûreté du système : déterministe, semi-probabiliste, probabiliste, probabiliste avec optimisation économique ;
- dans le cas de  $m$  modes de défaillance, le choix des fonctions de performance doit d'autant plus être mené avec attention que des grandeurs de dimensions différentes peuvent intervenir.

Ce dernier aspect est par exemple illustré dans (Noret *et al.* 2012 ; Yasumura *et al.* 2012). Les deux premiers aspects sont illustrés dans la section 3. La section 4 aborde ensuite les questions de maintenance et réparation, avec un problème « R-S » dépendant du temps.

## 2. UNE CONCEPTION SENSIBLE AUX HYPOTHÈSES ET AU CONTEXTE D'ÉTUDE

On souhaite évaluer une estimation de la probabilité de défaillance du système à concevoir, notée  $P_f$ , définie telle que :

$$P_f = \text{Prob}(G(R, S) < 0) = \int_{G < 0} f_{R,S}(r, s) dr ds \quad (1)$$

où  $f_{R,S}(r, s)$  est la densité conjointe de probabilité du couple  $(R, S)$ .

Nous ne rentrerons pas ici dans le détail des méthodes mécano-probabilistes permettant d'évaluer  $P_f$ , celles-ci sont présentées dans (Lemaire, 2005). Nous souhaitons néanmoins poser quelques notations et rappels.

### 2.1. Quelques rappels concernant les calculs simplifiés de fiabilité

On considère une fonction de performance de type marge, notée  $g = r - s$ , modélisée par la variable aléatoire (v.a.)  $G = R - S$ , de moyenne  $m_G$  et d'écart type  $\sigma_G$ . Si  $R$  et  $S$  sont des v.a. gaussiennes, de moyennes  $m_R, m_S$  et d'écart types  $\sigma_R, \sigma_S$ , l'indice de fiabilité de (Rjanitzyne-) Cornell  $\beta_C$  s'écrit :

$$\beta_C = \frac{m_G}{\sigma_G} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2 - \text{cov}[R, S]}} \quad (2)$$

où la covariance  $\text{cov}[R, S] = \sigma_R \sigma_S \rho_{R,S}$  est nulle si les v.a.  $R$  et  $S$  sont indépendantes (coefficient de corrélation  $\rho_{R,S}$  nul si les v.a. sont gaussiennes).

La v.a.  $G$  est aussi gaussienne (additivité de la loi) de densité de probabilité  $f_G$ . La probabilité de défaillance s'exprime alors :

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_G(z) dz = \frac{1}{\sigma_G \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\beta_C} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z - m_G}{\sigma_G}\right)^2\right) dz \quad (3)$$

D'où, en posant  $u = (z - m_G) / \sigma_G$  (normalisation de l'espace) et en notant  $\Phi$  la fonction de répartition de la loi gaussienne standard, largement diffusée sous forme de tables (mais aujourd'hui disponible dans la plupart des logiciels), il vient :

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\beta_C} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = \Phi(-\beta_C) \quad (4)$$

La probabilité est exacte si et seulement si l'état-limite est défini dans l'espace normé par une relation linéaire. Si par exemple l'état-limite s'exprime par  $Z = R/S - I$ ,  $Z$  n'est plus Gaussienne et l'existence de ses moments statistiques n'est plus assurée.



# Table des matières

<b>Préface .....</b>	<b>7</b>
Philippe Le Poac	
<b>Avant-propos.....</b>	<b>9</b>
Nicolas Gayton	
<b>Les auteurs .....</b>	<b>11</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>15</b>
Alain Delage, André Lannoy, Maurice Lemaire	
<b>Chapitre 1 - Les problèmes « contrainte-résistance » .....</b>	<b>35</b>
Thierry Yalamas, Julien Baroth	
<b>Chapitre 2 – La méthode contrainte-résistance au bureau d’étude .....</b>	<b>47</b>
Jocelyn Bastide, Paul Schimmerling	
<b>Chapitre 3 - Optimisation fiabiliste de la conception.....</b>	<b>69</b>
Younes Aoues, Abderahman Makheloufi, Abdelkhalac El-Hami, Didier Lemosse	
<b>Chapitre 4 - Calibration de coefficients partiels.....</b>	<b>91</b>
Olivier Pasqualini, Franck Schoefs, Mathilde Chevreuil, Mikaël Cazuguel	
<b>Chapitre 5 - Approche probabiliste de la tenue d’un pressuriseur .....</b>	<b>107</b>
Emmanuel Ardillon	
<b>Chapitre 6 - Optimisation de la maintenance d’un assemblage.....</b>	<b>125</b>
Alaa Chateauneuf, Francis Cocheteux	
<b>Chapitre 7 - Modélisation d’une cinétique de dégradation .....</b>	<b>141</b>
Antoine Grall	
<b>Chapitre 8 - Dimensionnement au séisme en génie civil .....</b>	<b>155</b>
Fabien Duco, Carmen Martin, Jean-Pierre Faye, Serge Caperaa	
<b>Chapitre 9 - Caractérisation de la robustesse structurale .....</b>	<b>169</b>
Nadia Kagho Gouadjio, André Orcesi, Christian Cremona	



**Chapitre 10 - L'envol de ballast pour les lignes ferroviaires..... 193**

Nicolas Paradot, Eliane Allain, Gilles Saussine

**Conclusion ..... 207**

Alain Delage, André Lannoy, Maurice Lemaire

**Glossaire ..... 219**

Alain Delage, André Lannoy, Maurice Lemaire

**D**epuis les années 1990, la fiabilité mécanique a fortement évolué grâce, notamment, à la mise au point de méthodes nouvelles dans le domaine de l'analyse de risque, de la fiabilité structurale, de la gestion des incertitudes ou encore de la décision en contexte incertain.

Aujourd'hui, ces démarches sont arrivées à maturité et les méthodes et outils disponibles peuvent être utilisés en toute confiance pour des applications industrielles.

Cet ouvrage présente dix études de cas dans les secteurs de l'industrie électronique, du génie civil, du risque sismique, de l'automobile, du ferroviaire et du nucléaire. Les structures concernées sont à la fois des structures industrielles (pressuriseur), des structures de génie civil (pont, ouvrage maritime, bâtiment d'habitation) ou des composants (bogie, amplificateur de puissance).

Ce livre, rédigé par des membres de l'Institut pour la Maîtrise des Risques (IMdR), est destiné à tous ceux qui traitent l'incertitude dans le domaine mécanique : décideurs, ingénieurs, concepteurs, ingénieurs de maintenance, enseignants, chercheurs, doctorants, autorités règlementaires, chefs de projet.