

Préface

Maurice LEMAIRE

SIGMA Clermont, Clermont-Ferrand, France

Conseiller scientifique de Phimeca Engineering, Cournon, France

Pendant des siècles, la mécanique s'est présentée comme une science rationnelle motivée par les astronomes observant le système solaire et les remarquables prévisions des éphémérides jusqu'à ce que Henri Poincaré mette en évidence le chaos. De leur côté, les constructeurs savaient que leurs prévisions pouvaient se trouver contrariées par des événements incertains ou imprévus dont ils se protégeaient depuis Claude-Henri Navier par la justification de coefficients dits de sécurité.

Le xx^e siècle a vu les progrès de la modélisation du comportement des matériaux et des systèmes mécaniques et le développement considérable des solutions numériques. Cependant, il existe et existera toujours un écart incertain (et non une erreur) entre modèle et réalité physique.

Si Andreï Kolmogorov a rendu la théorie des probabilités quasi parfaite, le modèle statistique nécessaire à sa mise en œuvre reste et restera toujours incertain même si le *big data* du XXI^e siècle apportera beaucoup à l'exploration du Médianistan (de la vie autour de la médiane), mais peu à celle de l'Extrémistan (de la vie aux frontières) selon la cartographie de Nassim-Nicholas Taleb.

Plongée dans l'incertain de ses modèles et de ses données, la mécanique s'est tout d'abord appuyée sur l'expertise et le retour d'expérience pour justifier ses créations. Ce n'est qu'assez récemment qu'elle a pris conscience que la théorie des probabilités pouvait apporter une précision supplémentaire en élicitant le contenu de ses règles et codes. Les ingénieurs acceptent petit à petit de passer de la justification de

quantités d'intérêt par un calcul déterministe à l'acceptation de distributions de probabilité soulignant l'acceptation de la défaillance.

Ce changement de paradigme est à la fois culturel, scientifique et technologique. Il est culturel car il implique une nouvelle manière de penser à laquelle les communautés tant scientifiques que pédagogiques n'étaient pas préparées. La mécanique des matériaux et des structures, la statistique, limitée à l'aspect contrôle, et les probabilités relevaient de champs disciplinaires trop indépendants. Il est scientifique car il implique le développement de nouveaux algorithmes reconnaissant le caractère incertain des modèles et des paramètres par la théorie des probabilités ou d'autres approches. Il est technologique car il implique une nouvelle approche de règles maintenant fondées sur un contenu probabiliste comme l'ont fait les Eurocodes de la construction. Enfin, il implique une réflexion sur la décision : la confier aux probabilités dans le Médianistan et aux conséquences de l'échec dans l'Extrémistan.

Quelques visionnaires prirent conscience de l'importance de la variabilité dès le début du xx^e siècle. Le concept d'indice de fiabilité introduit en 1949 par Rzhantzyn en construction métallique a rapidement été popularisé, poussé d'une part par la nécessité d'apporter des réponses à des situations nouvelles, par exemple celles des plates-formes *off-shore*, et par le développement des outils informatiques motivant les travaux méthodologiques désormais susceptibles d'une implémentation numérique.

Depuis le début des années 1980, la communauté scientifique dans le monde s'est emparée du sujet apportant toujours plus d'arguments à l'approche probabiliste afin de lui donner une consistance scientifique et des outils opérationnels permettant de sortir des applications académiques. Permettez-moi d'avoir ici le plaisir de souligner que l'équipe de Clermont-Ferrand a su y apporter sa part.

Christian Gogu a su rassembler des auteurs de talent issus de centres universitaires et d'organismes de recherche pour qu'aujourd'hui ils puissent apporter leur contribution à une École française de la mécanique de l'incertain et je tiens tout particulièrement à les en féliciter.

Le lecteur trouvera dans cet ouvrage, qui inclut de larges listes de références bibliographiques, une clarification des notions d'épistémique et d'aléatoire, car la première exigence est de s'assurer du vocabulaire qu'il ne soit pas aléatoire, des rappels sur les méthodes historiques et l'introduction de celles qui en pallient les insuffisances. Cet ouvrage aborde la question des facteurs de sensibilité, essentielle tant pour la fiabilité que pour l'optimisation, et donne un éclairage sur l'incertain fondamental du modèle statistique qu'il faudrait considérer fractal. Il n'oublie pas la question de l'incertitude des modèles à côté de celle des paramètres. Il donne un sens à la notion d'optimisation en variables incertaines. Il laisse cependant en retrait

des questions ouvertes sur la course à la dimensionnalité, sur le facteur temps, ce sera pour une prochaine édition dans quelques années. Il illustre les démarches par des domaines technologiques variés en génie mécanique pour l'ingénierie aéronautique et spatiale, en génie civil pour l'ingénierie nucléaire. Le lecteur y trouvera aussi bien matière à initiation qu'introduction à des outils avancés.

Je souhaite que cet ouvrage soit une motivation pour que les chercheurs, et en particulier les jeunes chercheurs, y trouvent un terrain d'application de leurs compétences, là où il faut innover pour un progrès scientifique et technologique face aux défis de plus en plus audacieux que l'Homme a à affronter pour le progrès de l'humanité.

Avant-propos

Christian GOGU

Institut Clément Ader, Université Toulouse III – Paul Sabatier, Toulouse, France

Cet avant-propos vise à remercier tous ceux qui ont contribué à cet ouvrage ainsi qu'à placer chaque contribution dans son contexte.

Je voudrais tout d'abord remercier Sylvain Drapier, professeur à l'École des Mines de Saint-Étienne, que j'ai eu comme professeur durant mes études et que j'ai par la suite côtoyé au sein du Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes, où j'ai effectué ma thèse, portant sur l'identification sous incertitudes de propriétés mécaniques. Responsable du thème « Modélisation numérique en mécanique » de la nouvelle encyclopédie *Sciences* lancée par ISTE Editions, Sylvain Drapier m'a invité à coordonner cet ouvrage et je le remercie pour la confiance accordée.

Je voudrais ensuite remercier très chaleureusement Maurice Lemaire, professeur émérite de l'IFMA/SIGMA Clermont et conseiller scientifique de Phimeca, pour avoir accepté de rédiger la préface de cet ouvrage. J'ai connu Maurice il y a fort longtemps, d'abord sur un plan personnel puis professionnel. Il a été l'un des pionniers de la recherche sur la prise en compte des incertitudes en ingénierie mécanique et c'est un honneur d'avoir sa contribution à cet ouvrage.

Par la suite je voudrais remercier l'ensemble des auteurs des différents chapitres de cet ouvrage, tout en plaçant chacune de leur contribution dans son contexte afin de mettre en évidence la structuration et l'articulation de l'ouvrage.

Sans être exhaustif, cet ouvrage vise à présenter en même temps un certain nombre de concepts fondamentaux et d'approches classiques ainsi que plusieurs développements récents et méthodes avancées. Il est divisé en deux parties, chacune

de quatre chapitres. La première partie est consacrée à la modélisation, la quantification et la propagation d'incertitudes. La deuxième partie est, quant à elle, consacrée à la prise en compte des incertitudes à travers les analyses de fiabilité et l'optimisation sous incertitudes.

Le [chapitre 1](#), que j'ai rédigé, vise à passer en revue un certain nombre de méthodes classiques de modélisation des incertitudes. Il cherche également à introduire un certain nombre de notations et terminologies. Une distinction est en particulier faite entre des incertitudes aléatoires et épistémiques et différentes modélisations associées à chacune d'entre elles sont présentées, illustrées et discutées.

Le [chapitre 2](#) est rédigé par François Willot, que je remercie. Ce chapitre illustre l'utilisation d'outils probabilistes afin de caractériser des milieux ayant une microstructure hétérogène, dont un exemple typique est le béton. Une telle caractérisation de microstructures « aléatoires » permet par la suite de remonter à une caractérisation statistique des propriétés macroscopiques, nécessaire à la caractérisation de la fiabilité ou de la robustesse des structures.

Le [chapitre 3](#) est rédigé par David Bouhjiti, Julien Baroth et Frédéric Dufour, que je remercie. Ce chapitre illustre des méthodes de propagation d'incertitudes sur des grands ouvrages de génie civil, en l'occurrence des enceintes de confinement de centrales nucléaires. Il aborde les notions essentielles de variabilité de propriétés matériaux et leur caractérisation par des champs aléatoires. La technique des éléments finis stochastiques, ainsi que plusieurs améliorations, sont ensuite introduites pour effectuer la propagation des champs aléatoires aux grandeurs d'intérêt.

Le [chapitre 4](#) est cosigné avec Sylvain Dubreuil, Nathalie Bartoli et Thierry Lefebvre, que je remercie. Ce chapitre présente une nouvelle méthode permettant de caractériser puis de réduire les incertitudes dues à l'utilisation de modèles de substitution de type processus gaussiens dans une analyse multidisciplinaire. Cette méthode est illustrée sur un exemple classique de couplage multidisciplinaire, en l'occurrence le couplage fluide-structure sur une voilure aéronautique.

Le [chapitre 5](#) est rédigé par Jean-Marc Bourinet, que je remercie. Ce chapitre passe en revue de nombreuses méthodes de calcul de probabilités d'événements rares, typiquement des probabilités de défaillance. Le lecteur trouve ici une initiation aux concepts fondamentaux et à ces différentes méthodes de calcul de probabilités de défaillance.

Le [chapitre 6](#) est rédigé par Cécile Mattrand, Pierre Beaupaire et Nicolas Gayton, que je remercie. Ce chapitre passe en revue de nombreux développements relativement récents associés à un certain type de méthodes, dites adaptatives, pour le calcul de probabilités de défaillance. Ces méthodes sont basées sur l'utilisation de

modèles de substitution de krigeage et leur enrichissement adaptatif afin de calculer une probabilité de défaillance avec un coût numérique le plus modéré possible.

Le [chapitre 7](#) est rédigé par Vincent Chabridon, Mathieu Balesdent, Guillaume Perrin, Jean-Marc Bourinet et Nicolas Gayton, que je remercie. Ce chapitre propose une nouvelle méthode pour le calcul de la sensibilité (globale) d'une probabilité de défaillance prenant en compte l'incertitude sur les paramètres des distributions, caractérisant les variabilités du problème. Cette méthode est illustrée par un exemple dans le domaine des lanceurs spatiaux.

Le [chapitre 8](#) est rédigé par Quentin Mercier et Fabrice Poirion, que je remercie. Ce chapitre présente une nouvelle méthode pour la résolution de problèmes d'optimisation multi-objectifs stochastiques et plus particulièrement ceux où l'on cherche à optimiser l'espérance des différents objectifs. Il est également montré comment cette formulation peut servir à résoudre de manière efficace des problèmes d'optimisation sous contraintes fiabilistes, en les reformulant comme des problèmes d'optimisation multi-objectifs.