

Préface

Prédire puis garantir la fiabilité d'un système industriel est un enjeu majeur pour les industriels des domaines de l'automobile, de l'aéronautique, de la défense mais aussi pour ceux du ferroviaire, des télécommunications, du nucléaire, du médical et bien d'autres. Mais c'est avant tout un enjeu majeur pour nous, utilisateurs au quotidien de ces équipements, qui doivent avoir une confiance absolue dans les informations transmises et les décisions prises en temps réel. Le développement croissant des objets connectés (IoT, robots et cobots, domotique, etc.), des systèmes autonomes (automobile, drone et demain avion et hélicoptère) va conduire à réduire de façon drastique l'intervention de l'homme au profit de l'intervention des systèmes mécatroniques. Tous ces systèmes ne pourront se déployer que si les utilisateurs ont une confiance absolue dans la fiabilité de ces équipements.

Ces équipements se décomposent en trois grandes fonctionnalités, une partie matérielle composée principalement de cartes électroniques (couplées à des systèmes mécaniques), de systèmes de télécommunication permettant le contrôle à distance et une partie logicielle embarquée temps réel permettant la mise en œuvre des équipements et la réalisation des tâches attendues.

Prédire et garantir la fiabilité des équipements électroniques est une tâche à la fois immense et sans fin. D'une part, le nombre de type de composants utilisés pour réaliser ces cartes est très élevé et d'autre part l'intégration de fonctionnalités innovantes et complexes dans les équipements nécessite de nombreux essais de fiabilité et de robustesse.

Grâce au soutien des pôles de compétitivité Astech et NextMove, de la filière Aéronautique Normandie NAE, des régions Normandie et Île-de-France, des chambres de commerce de Rouen et Versailles, des programmes ont pu être mis en œuvre et aboutir à des résultats exceptionnels (Audace, First-Mep, etc.).

Compte tenu de la richesse des résultats de ces trois ouvrages, je tiens à remercier très chaleureusement messieurs Abdelkhalak El Hami, David Delaux et Henri Grzeskowiak pour leur travail remarquable à la mise en œuvre de ces trois volumes ainsi que tous les auteurs qui ont consacré de nombreuses heures à mettre en forme tous leurs résultats de façon à ce que ces informations primordiales ne restent pas la propriété de quelques-uns mais soient partagées par le plus grand nombre d'ingénieurs, de techniciens, de chercheurs et d'étudiants. Ces trois volumes peuvent se lire séparément et couvrent à eux trois tous les aspects de la fiabilité, tout d'abord la prédiction, puis les tests et enfin les retours d'expérience.

Le volume 1 est consacré à la fiabilité prédictive pour estimer ou prédire les performances de fiabilité des systèmes.

Le volume 2 est dédié à la fiabilité expérimentale utilisant des outils et méthodes d'essais pour démontrer la fiabilité des systèmes.

Le volume 3 présente la fiabilité opérationnelle. C'est au cours de cette étape que l'on vérifie la performance de fiabilité des systèmes dans leurs vies réelles par une analyse des données terrain.

Je tiens à remercier l'ensemble des acteurs des programmes de recherche qui ont contribué à faire avancer cette science ainsi que les financeurs (État, régions) sans qui ces projets n'auraient pu aboutir et je fais le vœu que les membres du noyau dur mis en place dans ces programmes (Audace, First-MFP, etc.) continuent leur association car leurs compétences seront indispensables pour garantir la fiabilité des très nombreuses technologies qui vont émerger dans les années à venir et qui équiperont les systèmes mécatroniques de demain.

Philippe EUDELIN
Président de Normandie AeroEspace (NAE)

Avant-propos

Mars 2020, un tournant dans notre vie, dans l'industrie planétaire... La Covid-19 frappe le monde ! Cette pandémie a mis en évidence les **fragilités** de nos industries tout en exacerbant les paradigmes du développement, de l'innovation, de la compétition commerciale et de l'accélération des phases de recherche.

Plus que jamais, nous devons être **agiles** dans nos business plans américains, européens, asiatiques, mondiaux, tout en **sécurisant** l'utilisation de nos produits dans leur exploitation opérationnelle. Force est de constater les **défis** d'avoir à combiner les concepts de variabilité et de stabilité, de standardisation et d'accélération du développement des produits. Le monde « post-Covid » pousse l'ensemble des industries dans les derniers retranchements de l'ingénierie de la fiabilité.

Il est vrai que le mot « fiabilité » est quotidiennement utilisé comme cosmétique marketing sans vraiment se soucier du fondement scientifique sous-jacent ! Mais derrière ce mot se cache une science appliquée et validée par des analyses, des recherches et des personnes talentueuses.

Quel type d'approche fiabiliste un concepteur, un ingénieur, un manager peut utiliser dans son environnement professionnel ? Quel que soit le domaine industriel (aéronautique, spatiale, défense, automobile, domotique, etc.), comment est-il possible de concevoir un produit fiable plus rapidement tout en préservant les aspects sécuritaires ?

Cet ouvrage illustre, avec de nombreux détails, l'état de l'art de la science pluridisciplinaire de la fiabilité prévisionnelle. De nombreux experts sont convaincus que la fiabilité ne se limite pas à la science de la statistique. Des disciplines diverses et variées

interagissent pour conduire le produit à son meilleur niveau de fiabilité permis par les technologies et méthodes de développement et de production actuelles.

Dans un contexte de recherche perpétuelle d'amélioration de la compétitivité industrielle, l'évolution des méthodes et des outils de conception des produits apparaît comme une nécessité stratégique au regard d'un impératif de réduction des coûts. Néanmoins, la diminution des coûts de conception ne doit pas se faire au détriment de la fiabilité des nouveaux systèmes proposés qui se doit par ailleurs de progresser elle aussi de manière significative.

Pour accroître la compétitivité de leurs dispositifs mécatroniques, les équipementiers des domaines automobiles et aéronautiques doivent innover tant au niveau de la conception qu'au niveau des processus d'assemblage, et ce pour réduire les durées de développement des produits. De plus, ces produits innovants doivent bien évidemment allier d'excellentes performances fonctionnelles et opérationnelles incluant la fiabilité pour pouvoir pleinement répondre aux attentes du marché mondial. Ces attentes de fiabilité chez les constructeurs automobiles vont certainement s'amplifier avec la forte pénétration du marché des véhicules électriques ou hybrides à l'horizon 2020-2025, estimée à 10 % du marché. À ces attentes de fiabilité opérationnelle s'ajoute le besoin de rapidement lever les risques d'immaturité associés à des innovations de produits. Ce besoin est fortement lié à la réduction au strict minimum des temps de développement des véhicules.

Dans le domaine de l'aéronautique, les besoins portent principalement sur la prévision et la maîtrise des coûts induits par les défaillances apparaissant à la mise en service, pendant la période de garantie, et pendant l'exploitation de l'avion sachant que, dans le futur, les nouveaux contrats de vente de matériels aéronautiques s'orienteront de plus en plus vers de la vente à l'heure d'exploitation. Bien que le secteur aéronautique présente des volumes de production relativement faibles par rapport à l'automobile (en termes de nombre d'unités par type de produit), les enjeux financiers sont forts et de fait, les constructeurs aéronautiques sur-dimensionnent les composants mécatroniques en cas de méconnaissance des problèmes. La fiabilité est définie entre autres par le standard international ISO/TR 12489 comme étant : « La caractéristique d'un élément ou d'un système exprimé par la probabilité qu'il exécute une mission requise dans les conditions indiquées pour un temps de mission donné. »

Cet ouvrage a pour ambition de proposer de nouvelles méthodes permettant l'analyse du cycle de vie d'un système. Le cycle en V permet d'inscrire les phases de développement dans la dimension du temps de développement et les niveaux de complexité d'intégration.

Les trois grandes familles d'activité régissant le développement de la fiabilité pour un système mécatronique sont la fiabilité prédictive, la fiabilité expérimentale et la fiabilité opérationnelle.

La fiabilité prédictive regroupe l'ensemble des activités d'ingénierie pour **estimer ou prédire** les performances de fiabilité du système mécatronique final. La fiabilité prédictive est particulièrement décrite dans ce volume 1.

La fiabilité expérimentale utilise l'ensemble des outils et méthodes d'essais pour **démontrer** la fiabilité du système mécatronique. La fiabilité expérimentale est développée dans le volume 2.

La fiabilité opérationnelle **vérifie** la performance de fiabilité du système mécatronique dans sa vie réelle par une analyse des données terrain. La fiabilité opérationnelle est présentée dans le volume 3.

Le chapitre 1 présente FIDES, une méthode d'évaluation et de construction de la fiabilité des systèmes électroniques. Le chapitre 2 présente la fiabilité dans le transport maritime : choix d'un système de manutention de conteneur. Le chapitre 3 présente la genèse d'un modèle de défaillance par interaction probabiliste « contrainte-résistance » dans un contexte de faible information. Le chapitre 4 est consacré à l'optimisation fiabiliste d'implant dentaire en utilisant la méthode du chaos polynomial généralisé. Le chapitre 5 présente l'optimisation fiabiliste multi-objectif basée sur les modèles de substitution avec une application d'une prothèse de la hanche. Le chapitre 6 propose une adaptation de la méthode CMA-ES assistée par le métamodèle de krigeage pour l'optimisation globale d'un problème. La mise en œuvre de cet algorithme proposé a été réalisée dans l'optimisation globale des joints de brasure d'un boîtier de type PQFP. Les résultats des études numériques montrent que l'algorithme KA-CMA-ES proposé est plus efficace et plus performant que l'algorithme CMA-ES standard. Le chapitre 7 présente l'optimisation fiabiliste des problèmes vibro-acoustiques en présence d'incertitudes *via* le chaos polynomial.

Pour conclure, il y a un « avant » et un « après » Covid-19. Les défis de fiabilité de nos industries à adresser dans cette nouvelle période qui s'ouvre sont importants. Le contexte mondial, mais aussi les objectifs écologiques, durables et d'empreinte carbone neutre sont les prochaines étapes d'une compétition économique farouche pour la prochaine décennie. Les auteurs espèrent que ce volume consacré à la fiabilité opérationnelle appliquée à l'industrie donnera les bons réflexes et orientera les lecteurs vers les bonnes pratiques pour les aider à concevoir efficacement et prendre les bonnes décisions.

Cet ouvrage est dédié à toutes les personnes qui ont perdu un être cher pendant la pandémie de Covid-19 (2020-2021) dans le monde.