

## Avant-propos

L'insertion et la distribution de l'électronique dans des systèmes mécaniques commandés engendrent des dispositifs mécatroniques, toujours plus innovants, plus légers, moins encombrants et moins énergivores. Cependant, cette démarche mécatronique, qui est adaptée aux ruptures technologiques, doit aussi tenir compte des contraintes parfois contradictoires que sont les délais de mise sous le marché et la réduction de coûts. Il en résulte que la mise en œuvre d'un dispositif mécatronique et la maîtrise de sa fiabilité ne peuvent pas toujours être en phase. C'est le cas par exemple, de systèmes qui fonctionnent dans des environnements agressifs ou selon des modes d'usage qui sont sources de défaillances. En effet, lorsque les origines de ces défaillances n'ont pas été appréhendées, ces dernières sont plus difficiles à maîtriser. Cet ouvrage essaye de répondre à cette problématique. Il est destiné aux acteurs de la filière de la mécatronique embarquée afin qu'ils puissent réduire les risques industriels et financiers liés aux défauts de fonctionnement. On y présente une méthodologie de développement de produit mécatronique intégrant la fiabilité dès le processus de conception. Elle est basée sur la compréhension des mécanismes de défaillance des systèmes mécatroniques, par leur modélisation pour simuler leurs conséquences et par l'expérimentation pour optimiser l'approche numérique. La simulation permet de raccourcir les délais pour anticiper les causes de défaillances. L'expérimentation permet d'affiner les modèles représentatifs des systèmes étudiés.

Cet ouvrage est le résultat de travaux de recherche partenariale entre des agents du secteur privé (grands groupes du secteur de la mécatronique, petites et moyennes entreprises) et des agents du secteur public (laboratoires d'universités ou d'écoles d'ingénieur). Les orientations de ces travaux de recherche sont issues des réflexions du Domaine d'action stratégique mécatronique du pôle de compétitivité Mov'eo pour répondre à la nécessité de conception de produits mécatroniques fiables.

Cet ouvrage s'adresse aux ingénieurs et chercheurs travaillant dans la filière de la mécatronique ainsi qu'aux étudiants de niveau master ou doctorants souhaitant se

spécialiser dans les essais expérimentaux, dans les caractérisations expérimentales des contraintes physico-chimiques (thermique, vibratoire, électrique, électromagnétique ou humidité), dans l'analyse de la défaillance, dans la modélisation des mécanismes de défaillance qui permettent de simuler les conséquences des sources des défaillances et d'aborder la fiabilité par une approche statistique. Ces thématiques sont utiles pour les besoins d'expertise dans le domaine de la mécatronique.

Il est organisé en deux volumes. Le **volume 1** présente deux méthodologies, l'approche statistique d'optimisation de la conception par la fiabilité et l'approche expérimentale, pour la caractérisation de l'évolution des systèmes mécatroniques en mode de fonctionnement. Le **volume 2** est axé sur les essais et la modélisation multiphysique des défauts, qui permettent de révéler les faiblesses de conception et les mécanismes de défaillance et l'élaboration de métamodèles qui permettent d'optimiser la conception.

Le **chapitre 1** décrit la méthodologie de conception par la fiabilité en s'appuyant sur un cas d'étude. On y décrit comment analyser le profil de vie et déterminer la distribution des contraintes pouvant provoquer des défaillances. Les effets des contraintes sont caractérisés expérimentalement. Des essais sont menés pour provoquer les défaillances attendues. L'analyse de défaillance permet de modéliser les mécanismes de défaillance par des modèles multiphysiques. Avec des approches statistiques, ces modèles multiphysiques des défaillances peuvent prendre en compte la variabilité des sollicitations du profil de vie et la variabilité du processus de fabrication et permettent d'optimiser la conception.

Le **chapitre 2** présente une méthode d'analyse non destructive telle l'ellipsométrie spectroscopique (SE), afin de sonder la qualité des surfaces et interfaces lorsqu'on fait varier les contraintes environnementales. Dans le domaine de la spectroscopie de caractérisation, l'ellipsométrie spectroscopique est devenue indispensable en microélectronique, ainsi que pour l'étude des semi-conducteurs, les revêtements protecteurs à base de polymères, les métaux ou autres types de méta-matériaux. Dans ce chapitre, on présente deux exemples de caractérisation, celui de l'argent fritté et celui de polymères présents dans un module mécatronique. Une étude des effets de la température en milieu sec et humide est également présentée et discutée en termes de propriétés optiques.

Le **chapitre 3** a pour objectif l'étude d'un concept innovant de détermination des émissions rayonnées par les structures hyperfréquences se trouvant dans des cavités métalliques. En se basant sur des cartographies de champ proche, on propose une méthode pour la maîtrise de l'environnement électromagnétique d'une structure fermée à partir de son rayonnement sans cavité de protection. Cette méthode est basée sur une modélisation des émissions rayonnées de la structure ouverte par un réseau de dipôles.

Le **chapitre 4** présente l'étude expérimentale des déformations statiques et dynamiques des composants et des équipements électroniques, par des techniques optiques en lumière cohérente basés sur des méthodes plein champ. Les techniques appliquées, interférométrie et non-interférométrie, conduisent à des résultats complémentaires en termes de résolution temporelle et spatiale et de sensibilité de mesure. Ces résultats ont été obtenus en appliquant les techniques de l'interférométrie de speckle (IS) à intégration temporelle, du moiré de projection (MP) et de la lumière structurée (LS) pour étudier les phénomènes liés au comportement thermomécanique et vibratoire des dispositifs électroniques embarqués.

Le **chapitre 5** décrit une méthode de caractérisation de la robustesse de transistors de commutation aux contraintes de surtension électrique. Elle reproduit les phénomènes de décharge électrostatique (ESD).

Le **chapitre 6** porte sur l'étude de la fiabilité et de la robustesse des transistors radiofréquence (RF) de puissance utilisés dans les cartes d'amplificateurs de puissance (HPA : *High Power Amplifier*). Ces transistors constituent l'élément central des modules de transmission (Tx) des applications radars. On s'intéresse ici aux comportements des transistors RF en technologie nitrure de gallium (GaN) sous l'effet d'agressions par des ondes électromagnétiques rayonnées, par des signaux RF ou des agressions thermiques.

Le **chapitre 7** présente les résultats d'une étude destinée à dégager une méthode de mesure des températures et des micro-déplacements sur des composants haute fréquence utilisés dans les télécommunications et les radars. Différentes techniques sont mises en compétition de façon à pouvoir dégager les intérêts, les limites et éventuellement les plages de recouvrement de chacune. Des résultats sur un certain nombre d'échantillons montrent des convergences intéressantes. La simultanéité de mesure des paramètres de température et d'expansion représente l'originalité de la présente méthode. Cette particularité permet le calcul ultérieur de la résistance thermique d'un composant électronique et surtout de l'évolution de cette résistance au cours de la vie du composant.

Le **chapitre 8** présente le guide méthodologique FIDES et une application à un cas d'étude mécatronique automobile. FIDES est performant pour définir le profil de vie et prédire le taux de défaillance des systèmes mécatroniques. Il est fréquemment réactualisé pour suivre l'évolution de la technologie de l'électronique. On décrit un exemple d'application de FIDES à un système mécatronique automobile.

Le **chapitre 9** présente un nouvel algorithme d'optimisation de la recherche en recul pour l'optimisation multiobjectif. Cet algorithme qui est nommé BSAMO est un algorithme évolutif (EA) qui résout des problèmes d'optimisation numérique à valeurs réelles. Afin de tester les performances de cet algorithme, un problème multiobjectif

de référence a été choisi : une aile 3D soumise à des charges aérodynamiques. Les solutions de Pareto obtenues sont présentées et comparées à celles de l'algorithme génétique de tri non dominé II (NSGA-II). Les résultats numériques démontrent l'efficacité de BSAMO et sa capacité à résoudre des problèmes multiphysiques du monde réel.

## **Remerciements**

Nous tenons à remercier DGCIS, CR Haute-Normandie, CG 95, CG91, CG78, CRBN, CRIF, CA Cergy-Pontoise, Mov'eo et NAE pour leur soutien au projet AUDACE.