

## Avant-propos

Les différentes actions décidées au niveau mondial pour assurer un développement durable et répondre aux enjeux climatiques se traduisent par une législation de plus en plus contraignante en termes d'émission de gaz à effet de serre. Dans le domaine de l'automobile ces réglementations conduisent les industriels à développer de nouveaux systèmes mécatroniques permettant d'électrifier les différentes fonctions des véhicules. Confrontées par la mondialisation des échanges à un accroissement de la concurrence et à une surenchère sur les performances des nouveaux produits, les entreprises du secteur de la mécatronique embarquée doivent pour rester compétitives développer de nouveaux produits dans des temps de plus en plus courts.

Pour améliorer les performances des systèmes embarqués en termes de réduction de volume ou de masse, ou encore de dissipation d'énergie, les industriels de la mécatronique introduisent dans leurs produits de nouvelles méthodes d'assemblage (par exemple les multimatériaux) ou de nouveaux matériaux (par exemple les nanotubes de carbone). Ils utilisent la modélisation pour réduire le coût de développement et raccourcir les temps de mise à disposition sur le marché. La compréhension des mécanismes de défaillance leur permet d'anticiper les défaillances potentielles dans les conditions d'emploi et d'optimiser la conception avant le lancement de la fabrication série. La méthode d'optimisation fiabiliste (RBDO) qui associe la modélisation et l'assurance d'une probabilité suffisante de fonctionnement dans les conditions opérationnelles répond à cette problématique d'optimisation de la conception et de levée des risques industriels. Pour que la méthode RBDO soit efficace, il faut disposer d'une bonne compréhension des phénomènes physiques sous-jacents et de leurs imbrications ainsi que de méthodes et de modèles représentant aussi fidèlement que possible la réalité du dispositif technologique à la conception comme à l'usage.

Traditionnellement, pour modéliser un système dynamique constitué de parties en interaction, on part d'un modèle simplifié de son comportement basé sur des hypothèses réalistes et sur les paramètres-clés de son fonctionnement. La dynamique

de ce système est régie par des équations aux dérivées partielles (EDP) de ses grandeurs caractéristiques. Par la suite, ce modèle est amélioré en introduisant des éléments ou des paramètres négligés au premier abord et en améliorant les EDP (non-linéarité, couplage etc.) pour tendre vers une représentation aussi fidèle que possible de la réalité du système en fonctionnement et ainsi obtenir des résultats de simulation pertinents.

Les modèles théoriques qui utilisent les lois fondamentales de la physique sont construits selon une méthode ascendante (*bottom-up*). On part des lois connues et d'hypothèses réalistes et on en déduit les conséquences. La résolution des modèles peut être analytique ou numérique. Lorsqu'il est possible de mettre en œuvre l'expérimentation on compare les résultats de simulation aux résultats expérimentaux. On peut également partir des méthodes expérimentales et dans une approche descendante (*top-down*), constituer une base de données d'expérimentation à partir de la réponse du système étudié à une contrainte appliquée volontairement. On analyse ensuite ces données en les confrontant à des modèles théoriques ou empiriques. Dans tous les cas, on retrouve une part d'incertitude dans l'analyse des données qu'on traite par des études statistiques, ce qui conduit à des interprétations avec des marges d'erreur. La problématique est de réduire cette marge d'erreur pour pouvoir faire des prévisions réalistes et comprendre les fonctionnalités des matériaux actifs.

Ce livre décrit des méthodes expérimentales et théoriques qui sont mises en œuvre dans le cadre de recherches fondamentales pour mieux comprendre les processus physico-chimiques qui, à l'échelle nanométrique, sont à l'origine des propriétés remarquables des matériaux utilisés dans des dispositifs technologiques innovants. Il présente des techniques optiques basées sur la lumière polarisée qui permettent de caractériser les défauts des matériaux ou de leurs interfaces qui sont susceptibles d'impacter la performance. Il décrit aussi comment connaître les propriétés mécaniques de nanomatériaux par l'utilisation de modèles théoriques et l'analyse des résultats d'expérimentation et de leurs incertitudes.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants de master et de doctorat, aux enseignants et chercheurs en science de matériaux et étude expérimentale ainsi qu'aux industriels de grands groupes et des PME des secteurs de l'électronique, de la mécatronique ou des matériaux optiques ou électroniques.

Le [chapitre 1](#) décrit les méthodes de prise en compte des incertitudes qui sont utilisées pour analyser le comportement statique et dynamique des systèmes et des structures. Le [chapitre 2](#) présente une méthode d'optimisation de la conception d'un système garantissant un équilibre entre le coût de sa définition et l'assurance de sa performance dans les conditions d'emploi prévues. Cette méthode est basée sur la prise en compte des incertitudes et sur la résolution simultanée de deux problèmes : l'optimisation du coût de réalisation des structures réalisant les fonctions attendues

et l'assurance d'une probabilité suffisante de fonctionnement. Les [chapitres 3 et 4](#) rappellent les théories qui décrivent la lumière classiquement ou selon l'approche quantique ainsi que les différentes méthodes proposées pour décrire l'état de polarisation de la lumière.

Dans le [chapitre 5](#), les théories sur l'interaction entre la lumière et la matière sont revues après une description de différents matériaux utilisés sous une forme ou une autre dans l'industrie. La notion d'information incomplète sur un système quantique est introduite à travers la matrice densité qui permet de traiter du problème de l'interaction entre ce système et son environnement. Le [chapitre 6](#) décrit les lasers, sources de lumière polarisée et les méthodes expérimentales basées sur les lasers pour étudier les matériaux en volume par la technique de fluorescence induite et de double résonance IR-IR ou en surface par les techniques de réflexion d'une sonde sur les ondes ultrasonores générées par un laser pompe. Ces méthodes permettent de déterminer les différentes voies de relaxation de l'énergie dans les matériaux en présence de défauts, ce qui permet de construire les modèles théoriques pour appréhender les effets thermiques dans les matériaux composites.

La mise en oeuvre des méthodes sur des systèmes modèles en volume est décrite dans le [chapitre 7](#). Après une description de l'appareillage nécessaire pour élaborer les systèmes constitués de molécules piégées en matrice solide à basse température (gaz rare (GR) ou azote), les différents lasers et détecteurs IR utilisés pour les techniques de fluorescence induite et de double résonance IR-IR sont présentés. Les résultats obtenus sur les systèmes O<sub>3</sub>-GR, CO<sub>2</sub>-GR, et N<sub>2</sub>O-GR, sont analysés au moyen de modèles théoriques adaptés pour déterminer les constantes de vitesses de relaxation de l'énergie selon les différentes voies disponibles pour les transferts d'un état du système à un autre. Des prédictions et des extrapolations à d'autres systèmes sont proposées.

Dans le [chapitre 8](#), l'étude des interfaces de matériaux assemblés par la technique d'ellipsométrie spectroscopique dans le domaine IR est abordée. Après un rappel de la technique et de la description de l'appareil utilisé et des méthodes d'analyse par méthode inverse au moyen d'algorithme d'optimisation et de modèles d'interaction avec la lumière polarisée, les résultats obtenus sur différents types d'interfaces que l'on trouve dans l'assemblage de dispositifs mécatroniques de puissance sont présentés et discutés. La technique d'ellipsométrie permet d'une part de déterminer les modifications engendrées sur les propriétés des matériaux en contact par les processus physiques ou physico-chimiques et d'autre part de suivre l'évolution des interfaces en fonction de la température en atmosphère humide ou sèche.

Dans le [chapitre 9](#), on décrit comment déterminer les propriétés de nanotubes de carbone, dans une démarche RBDO couplant méthodes d'élaboration et de caractérisation et modèles théoriques et statistiques.