

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. Confrontés 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 en 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 que l'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.

Cet ouvrage, qui est le neuvième de la série « Fiabilité des systèmes multiphysiques » est conçu pour donner les applications du volume 2 de la série intitulé *Défauts à l'échelle nanométrique en lumière polarisée*. Cela est réalisé par la description des méthodes expérimentales et théoriques 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 exemples de 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 des dispositifs nanos. Il décrit aussi comment déterminer 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 donnera un historique du développement des nanosciences et des nanotechnologies et décrit les points difficiles que l'on rencontre à l'échelle nanométrique comme la mesure des propriétés physiques des nanomatériaux. Il donne un aperçu de techniques d'élaboration de nanomatériaux : le *spin-coating*, la pulvérisation cathodique et l'ablation laser. Il présente aussi quatre techniques de caractérisation et d'analyse adaptées aux nanotechnologies : le microscope électronique par transmission (TEM), le microscope électronique à balayage (MEB), le microscope à force atomique (AFM) et la spectroscopie par (ATR).

Le chapitre 2 décrira la façon dont les incertitudes sont intégrées dans le processus de conception d'un système. Le but est d'obtenir des performances satisfaisantes, peu sensibles aux incertitudes et de ne pas dépasser un seuil de performances minimales compte tenu d'une probabilité donnée. Plusieurs méthodes de calcul de systèmes en présence d'incertitudes sont présentées avec des applications pratiques : l'approche probabiliste, l'approche algébrique par intervalle, les méthodes basées sur la logique floue, les plans d'expériences ; l'analyse des composantes principales.

Le chapitre 3 sera consacré à différentes applications et usages des ondes électromagnétiques. Après avoir rappelé quelques propriétés caractéristiques de ces ondes, des applications seront abordées : l'étude énergétique d'une onde plane électromagnétique monochromatique, un guide d'ondes rectangulaire, les antennes pour ondes hyperfréquences et l'étude d'une antenne filaire et de réseaux d'antennes. Ces applications permettent de comprendre le fonctionnement des antennes de la cinquième génération (5G) des systèmes de télécommunication mobile.

Le chapitre 4 traitera des matériaux fonctionnels utilisés dans les systèmes intelligents. La caractéristique principale de ces matériaux intelligents est le couplage entre leurs diverses propriétés physiques. La thermodynamique des couplages et les couplages multiphysiques seront abordés pour les matériaux piézoélectriques, magnétostrictifs et à mémoire de forme. Des exercices d'application seront donnés pour les déformations d'une couche mince en forme de plaque, un accéléromètre piézoélectrique, un transducteur piézoélectrique et un capteur piézoélectrique.

Introduction

La métrologie est l'étude scientifique de la mesure. Toute mesure fait référence à un étalon et tout processus de mesure conduit à une valeur forcément entachée d'une incertitude. En sciences pour l'ingénieur la mesure concerne différents types de paramètres. La métrologie légale s'inscrit dans le cadre législatif : qu'un produit manufacturé doit satisfaire pour que sa mise en vente sur le marché public soit autorisée. La métrologie technique ou scientifique implique les méthodes de mesure des caractéristiques techniques du produit manufacturé.

Dans un contexte plus général d'une approche systémique, il faut aussi considérer la métrologie liée aux autres indicateurs du système de production. Ces mesures permettent de suivre et de faire évoluer les processus mis en œuvre pour garantir et optimiser la qualité du produit ou réduire sa défaillance afin que le produit soit conforme aux attentes du client. Ainsi, l'aptitude d'un produit à répondre aux attentes qualité et fiabilité peut être abordée dès la conception, dans le cadre de l'approche fiabilisée de type RBDO (*Reliability Based Design Optimization*) décrite dans le volume 2 de la série « Fiabilité des systèmes multiphysiques », intitulé *Défauts à l'échelle nanométrique en lumière polarisée*. D'une manière plus générale, cette approche RBDO permet de prendre en compte les paramètres incertains des procédés de fabrication, de mesure et des conditions opérationnelles pour optimiser le processus de production, les paramètres de conception et la qualité globale du produit.

Dans le volume 2 de cette série, l'accent a été mis sur trois échelles d'étude dans le cadre de la fabrication d'un produit industriel :

- les méthodes numériques développées en ingénierie à partir de modèles et de théories mathématiques pour optimiser la qualité d'un produit dès sa conception constituant la méthode RBDO. Cette méthodologie est source d'applications en sciences de l'ingénieur pour aborder les problèmes d'optimisation en milieu industriel ;

– les méthodes expérimentales développées en recherche fondamentale s'appuyant sur l'interaction lumière-matière et sur l'analyse par la simulation à partir de modèles théoriques pour effectuer les mesures à l'échelle nanométrique et conduire l'analyse. Ces méthodes trouvent un intérêt en nanosciences pour élaborer les connaissances qui conduisent aux nanotechnologies ;

– l'application de ces deux approches dans l'exemple abordé au chapitre 5 du volume 2 à la mesure des propriétés physiques d'un nanomatériau, nanotube de carbone.

En sciences, la mesure d'une dimension peut être réalisée de différentes manières. Les appareils ou méthodes de mesures dépendent de l'échelle à laquelle la métrologie est abordée. Afin de poser la problématique de la mesure à une échelle donnée, nous présenterons dans un premier temps les méthodes employées pour les processus de mesure aux deux échelles qui intéressent les scientifiques, à savoir l'infiniment petit, qui correspond à la longueur de Planck à $1,6 \cdot 10^{-35}$ m et l'infiniment grand qui correspond au diamètre de l'univers évalué à $8,8 \cdot 10^{26}$ m. Cette démarche a pour but de convaincre le lecteur que, sans devenir un spécialiste d'un domaine scientifique ou d'une discipline donnée, il est au préalable nécessaire de construire un socle de connaissances minimum pour appréhender correctement les méthodes à utiliser pour une métrologie réussie à une échelle donnée.

En 1899, Planck avait déterminé une unité de longueur $l_p = \sqrt{(Gh/2\pi c^3)} \approx 1,6 \cdot 10^{-35}$ m, appelée longueur de Planck à partir des constantes fondamentales, G, la constante de gravité ($6,6 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{Kg}^{-2}$), h, la constante de Planck ($6,64 \cdot 10^{-34}$ Js) et c ($2,99 \ 729 \ 458 \ 10^8 \text{ ms}^{-1}$), la célérité de la lumière. Cette longueur n'est pas mesurable avec les technologies de mesure disponibles sur notre planète Terre. En effet, la plus petite longueur mesurable au LHC (« Large Hadron Collider » du CERN, l'accélérateur de particules qui permet de réaliser une collision frontale entre deux protons dans un anneau de 26,659 km de circonférence) et qui a permis en 2012 de mettre en évidence le boson de Higgs, se situe autour de 10^{-16} m, soit 19 ordres de grandeur plus élevée que la longueur de Planck. Les détecteurs CMS et ATLAS furent mis à contribution pour l'observation du boson de Higgs qui était la dernière prédiction du modèle standard qui n'avait pas encore été observée. La mesure à l'échelle de 10^{-16} m, est réalisée en comprimant l'énergie pour atteindre un volume spatial infiniment petit.

Le principe de mesure à l'échelle des particules fondamentales s'appuie principalement sur trois relations. La relation de De Broglie entre la quantité de mouvement p et la longueur d'onde λ , $p = h/\lambda$ qui introduit la dualité onde-corpuscule pour la matière ; la relation qui lie l'énergie E d'une particule à sa fréquence ou sa longueur d'onde λ , telle que proposée par Einstein pour interpréter l'effet photo électrique $E = hc/\lambda$; la relation qui lie l'énergie E d'une particule à son énergie de masse m au

repos et de son énergie cinétique liée à sa quantité de mouvement $p = mv$, $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ telle qu'elle apparaît dans la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. Dans ces différentes formules, v est la vitesse de la particule de masse m et c est la célérité de la lumière. On peut également exprimer l'énergie E par la formule $E = \gamma mc^2$, où γ est donné $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.

La vitesse d'une particule est ainsi donnée par la formule : $\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{mc^2}{E}\right)^2}$.

Au LHC, l'énergie du proton est de 7 TeV ($1,2 \cdot 10^{-6}$ J), très supérieure (d'un facteur 7 500) à son énergie de masse au repos, mc^2 qui est égale à 938 MeV. La formule donnant la vitesse peut alors se réécrire :

$$\frac{v}{c} = 1 - \left(\frac{m^2c^4}{2E^2}\right)$$

qui est égale à 1 à 10^{-8} . Si on utilise la relation $E = \frac{hc}{\lambda}$ on obtient une valeur de la longueur d'onde de l'ordre de 10^{-16} m, ce qui donne les dimensions qui peuvent être atteintes dans le LHC. La masse mesurée lors des deux expériences du CERN au LHC (8 TeV en 2012 et 13 TeV en 2015) est confirmée à la valeur de 125 Gev.

Pour détecter le boson de Higgs, particule de masse 125 Gev associée au champ de Higgs, alors que le proton a une masse de 938 Mev, il a fallu accélérer le proton de manière à augmenter son énergie cinétique pour que son énergie donnée par $E = \gamma mc^2$ dépasse de manière significative les 938 Mev (8 Tev en 2012 et 13 Tev en 2015). La désintégration des protons entrant en collision, chacun apportant sa charge énergétique, 8 TeV ou 13 Tev permet d'avoir une énergie suffisante pour que le boson de Higgs soit susceptible d'apparaître lors de la recombinaison des particules subatomiques. Comme le boson de Higgs se désintègre quasi instantanément après sa production, il faut analyser les produits de sa désintégration pour identifier l'excès d'énergie et par conséquent la masse en excès au voisinage des 125 Gev.

Notons qu'à la longueur de Planck, les énergies nécessaires qui ne peuvent être envisagées dans un accélérateur de particules, conduiraient à la création de trous noirs.

L'autre extrémité dimensionnelle vers l'infiniment grand correspond à l'étendue spatiale de l'univers qui est positionnée à 1 026 m par les cosmologistes. En cosmologie l'univers observable est un terme utilisé pour décrire la partie visible de notre univers dans le sens où de la lumière nous est parvenue du point considéré. C'est une boule

dont la limite est localisée à l'horizon cosmologique, et dont la Terre constitue le centre. C'est donc une notion relative, et d'autres observateurs situés ailleurs dans l'univers n'auront pas la même boule observable (mais son rayon serait le même).

En cosmologie les distances sont mesurées en **année-lumière**. Une année-lumière est la distance parcourue par la lumière en une année, ce qui correspond à environ $9,5 \cdot 10^{12}$ m. Le mégaparsec qui vaut 3,26 millions ($3,26 \cdot 10^6$) d'années lumière est une autre unité de distance qui est également utilisée en particulier en astrophysique extragalactique. Pour connaître la dimension de l'univers, il faut des mesures précises du rayonnement fossile, ou fond diffus cosmologique (CMB : *Cosmic Background Radiation*) qui date du Big Bang et permet de connaître le volume occupé par l'univers depuis sa création. Prédit pour la première fois par Ralph Alpher en 1948 dans son travail de thèse, le CMB a été découvert par Arno Penzias et Robert Wilson au « Bell Telephone Laboratories » lors de la mise au point d'un nouveau récepteur radio après des interférences détectées indépendamment de l'orientation de l'antenne en construction. Si en première approximation, le CMB est isotrope, des mesures précises de ce rayonnement permettent de déterminer H_0 , la constante de Hubble qui donne la vitesse d'expansion de l'univers.

Les détecteurs en cosmologie sont des télescopes hors sol. Le satellite WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) lancé en 2001 a permis d'atteindre une bonne précision sur la détection du CMB. Son intensité varie très légèrement dans différentes directions du ciel et les fluctuations ont pu être déterminées. Les mesures extrêmement précises de WMAP en 2003 ont permis de calculer une valeur de H_0 de 70 kilomètres par seconde et par mégaparsec, à 5 % près dans l'hypothèse où la vitesse d'expansion est constante. L'univers étant en accélération, lors de son expansion, la correction apportée à H_0 a permis d'estimer l'âge de l'univers à 13,75 milliards d'années avec une marge d'erreur de 0,1 milliard. C'est l'échelle qui correspond au domaine où on peut faire correspondre l'âge de l'univers déduit des observations provenant du Big Bang à partir du modèle inflationniste dans le cadre d'un univers en expansion.

Après le Big Bang, les particules élémentaires subatomiques étaient sans masse et pouvaient se déplacer à la vitesse de la lumière. Après l'expansion de l'univers et son refroidissement, les particules sont entrées en interaction avec le champ de Higgs et ont pu de ce fait acquérir une masse.

Dans l'histoire de l'univers, les particules élémentaires ont interagi avec le champ de Higgs, 10^{-12} s après le Big Bang. La valeur de 125 GeV est considérée comme la valeur critique entre un univers stable et un univers métastable. Le « modèle standard de la cosmologie », élaboré au début de ce siècle vers les années 2000, est probablement

le meilleur actuellement qui permette de décrire l'évolution de l'univers, c'est-à-dire les grandes étapes de l'histoire de l'univers observable ainsi que son contenu actuel tels qu'ils sont révélés par les observations astronomiques. Le modèle standard décrit l'univers comme un espace homogène et isotrope en expansion, sur lequel se superposent de grandes structures formées par l'effondrement gravitationnel d'in-homogénéités primordiales, elles-mêmes formées pendant la phase d'inflation. Il reste bien entendu les questions ouvertes comme la nature de certains constituants de l'univers tels la matière noire et l'énergie noire et leurs abondances relatives.

Le modèle inflationniste fait l'hypothèse d'une expansion de l'univers avec une accélération exponentielle $R(t) = R_0 \exp(H(t)t)$, 10^{-30} s après le Big Bang, où $H(t)$ est la constante de Hubble. Cette constante est mesurée à partir de l'effet Doppler qui est responsable du décalage vers le rouge du rayonnement de la lumière émise par une étoile distante qui s'éloigne du point d'observation. On peut donner une interprétation plausible à l'isotropie du CMB dans le cadre du modèle inflationniste, avec des variations relatives de la température mesurée à 10^{-5} près. À partir des données fournies par les télescopes Hubble, COBE (*Cosmic Background Explorer*), WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), et les expériences BOOMerang (*Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation AND Geophysics*) et MAXIMA (*Millimeter Anisotropy eXperiment IMaging Array*), les scientifiques ont pu établir que l'âge de l'univers est de 13,75 milliards d'années lumière.

Aujourd'hui, l'univers est en expansion tout en accélérant de sorte que si sa vitesse est de 70 Km/s à 1 mégaparsec, elle double à 2 mégaparsec passant à 140 km/s et ainsi de suite. En tenant compte du décalage Doppler ou « red-shift » pour les étoiles qui s'éloignent de nous, et donc du fait que non seulement les étoiles s'éloignent mais que celles qui sont au double de la distance s'éloignent deux fois plus rapidement, il est nécessaire d'apporter une correction au calcul donnant les 13,8 milliards d'années. La métrique à appliquer à l'espace qui s'étire pendant que les galaxies s'éloignent conduit à une valeur 46,5 milliards d'années lumière soit un rayon de 93 milliards d'années lumière. Bien entendu, la lumière des étoiles qui sont à la périphérie ou l'horizon cosmologique ne peuvent plus nous atteindre puisque ce que l'on observe aujourd'hui remonte au temps qu'il a fallu à la lumière pour nous atteindre en parcourant une distance dans un espace qui s'étire.

Ces deux exemples montrent qu'à chaque échelle dimensionnelle, il faut une bonne maîtrise, non seulement des techniques expérimentales appropriées de mesure pour observer, mais aussi des théories adaptées pour interpréter et analyser les données collectées. À chaque échelle, il est ainsi nécessaire à l'ingénieur de s'appropriier les connaissances spécifiques élaborées dans les laboratoires et de développer les compétences permettant la maîtrise des technologies et la mise en œuvre des innovations.

Cet ouvrage, qui donne des applications concerne le domaine des sciences pour l'ingénieur. Les sujets abordés se situent dans le cadre de l'expérimentation, de la simulation et de l'ingénierie des systèmes à l'échelle nanométrique. L'interaction lumière/matière a été privilégiée. En effet l'analyse des propriétés et des caractéristiques de la matière est réalisée en utilisant la lumière comme sonde. La simulation est effectuée à partir de modèles théoriques basés sur les principes de la mécanique quantique en faisant appel à la théorie des champs.

Les nanotechnologies et les nanosciences sont identifiées comme les sources d'innovation de rupture qui vont apporter les technologies considérées comme primordiales au XXI^e siècle. Elles devront se déployer dans le cadre des éco-innovations et vont peu à peu irriguer les nouvelles applications sociétales dans différents secteurs d'activités. On identifie, par exemple, les énergies nouvelles, leur récupération leur stockage, la purification de l'eau, de nouveaux matériaux plus légers et résistants pour l'industrie des transports terrestres et spatiaux, la construction et les bâtiments, les technologies de l'informatique par le calculateur quantique, les systèmes électroniques embarqués et l'usine 4.0, par exemple, sans pour autant que cette liste soit exhaustive. On peut dater l'investissement des États du monde entier dans l'accompagnement du développement de ce domaine au début du XXI^e siècle. Les projets sont financés sur le long terme, traduisant ainsi le potentiel de croissance économique dans le cadre des nanotechnologies.

À l'instar du modèle inflationniste proposé par les cosmologistes pour expliquer les innombrables galaxies et systèmes planétaires, soleils et trous noirs qui les constituent, les nanosciences ont également explosé en termes de volume d'activités. Les sujets abordés dans ce volume et le précédent concernent le champ des ingénieurs œuvrant dans le domaine de la mécatronique, de la robotique et des calculs en modélisation et simulation. Ils sont orientés sur les retombées sociétales des nanotechnologies dans le domaine des transports terrestres et du spatial, du handicap, des technologies de l'information et de la simulation dans une approche systémique. Pour pouvoir innover en nanotechnologie l'ingénieur doit s'approprier les connaissances à un degré suffisant.

Les contenus du volume 2 de la série « Fiabilité des systèmes multiphysiques » (*Défauts à l'échelle nanométrique en lumière polarisée*) et des volumes *Applications et métrologie à l'échelle nanométrique 1 et 2* écrits conjointement par trois auteurs ont pour objectif d'apporter les connaissances essentielles à l'échelle nanométrique qui permettront à des élèves ingénieurs ou à des ingénieurs de développer des dispositifs ou des systèmes basés sur les nanotechnologies. Pour favoriser le déploiement des nanotechnologies, les auteurs de ces trois volumes qui, par leurs compétences et

expériences associent un savoir faire en physique fondamentale, en sciences pour l'ingénieur et en activités industrielles, ont ciblé un large spectre de domaines d'applications. Dans le volume 2, la métrologie à l'échelle nanométrique est abordée sur une base théorique et expérimentale. Ce volume complète cette base théorique par des applications sous forme d'exercices corrigés.