



# CONSEIL SCIENTIFIQUE DE L'INSTITUT DES SCIENCES DE L'INGÉNIERIE ET DES SYSTÈMES

## Composition du conseil scientifique

Anne-Sophie BONNET-BEN DHIA (présidente); Boris GRALAK (secrétaire scientifique); Sylvain ALLANO ; Christophe BAILLY; Philippe BLANC; Lionel BUCHAILLOT; Jean CHAZELAS; Laurent CHUSSEAU; Anne DE WIT; Veronique DOQUET; Christophe FONTE; Dominique GOBIN; Dominique HABAULT; Georges HADZIIOANNOU; Nicolas HERAUD; Marie-Christine HO BA THO; Pascal LAUGIER; Thierry LE MOGNE; Frédéric LEBON; Patrick MASPEYROT; Dimitry PEAUCELLE; Leanne PITCHFORD; Alain RICHARD; Michel SARDIN.

---

## Introduction

---

L'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS) du CNRS a vocation à mener des recherches sur la conception, la fabrication et l'utilisation optimale d'objets matériels ou logiciels complexes.

Tout en contribuant ainsi à répondre aux besoins de la société, notamment en relation avec le secteur industriel, l'INSIS participe à l'avancée générale des sciences : en effet, les recherches menées à l'INSIS requièrent le développement de concepts nouveaux, pour relever les défis spécifiques que pose inévitablement l'intégration dans l'objet complexe des concepts existants. De plus, cette complexité exige une approche résolument interdisciplinaire qui se traduit par des relations importantes avec les autres instituts du CNRS et induit actuellement une réflexion sur l'évolution de la formation des étudiants (avec l'ouverture de nouveaux masters transverses).

L'INSIS veut à la fois être un véritable acteur dans les domaines scientifiques émergents et produire des recherches utiles pour ses nombreux partenaires industriels. Cette double ambition crée une tension entre l'accompagnement de thématiques prospectives et le maintien de compétences traditionnelles, ceci ne devant pas être sacrifié au profit de cela. L'institut doit donc veiller à soutenir ses écoles traditionnelles dont le fort

potentiel applicatif est sans cesse renouvelé. Il doit d'autre part accompagner l'investissement de ses chercheurs dans le développement des thématiques émergentes, en maintenant une approche raisonnée face aux effets de mode.

Ce rapport est organisé en trois parties.

L'identité de l'INSIS est décrite dans la première partie : quelques exemples particulièrement significatifs dans les domaines du transport, de l'énergie et de la santé illustrent tout d'abord la synergie fructueuse entre les recherches menées à l'INSIS et les grands enjeux économiques et sociétaux. La spécificité des questions scientifiques soulevées par l'étude des systèmes complexes est ensuite présentée, en mettant l'accent sur les notions de couplage, d'intégration et de fiabilité.

Un atout de l'INSIS est d'associer des compétences allant de la théorie à l'expérience pour appréhender les systèmes complexes dans leur globalité. Ainsi, les chercheurs de l'INSIS développent des outils de modélisation (théorique ou numérique), conçoivent et fabriquent de nouveaux objets, et enfin participent aux progrès des techniques permettant l'acquisition de données et leur traitement. Ces trois approches méthodologiques, fortement connectées, sont décrites dans la deuxième partie du rapport.

Dans la troisième partie, un certain nombre de thématiques scientifiques sur lesquelles l'investissement de l'INSIS doit être maintenu ou renforcé sont présentées. Il ne s'agit pas,

loin s'en faut, d'une liste exhaustive des thèmes abordés dans les unités de l'institut, mais d'une présentation de problématiques partagées, au sens où elles sont jugées importantes dans plusieurs sections de l'INSIS. On distingue les études menées à l'échelle du nanomètre, où certains effets sont exaltés et ouvrent de nouvelles perspectives, des approches multi-échelles en espace et en temps, typiques de l'INSIS, pour s'intéresser enfin aux approches stochastiques encore insuffisamment développées, qui doivent rendre compte des incertitudes et de la richesse potentielle du désordre.

---

## I. Concepts et systèmes complexes : enjeux

---

### A. Enjeux sociétaux et économiques

Les besoins de la société en développement technologique ont profondément évolué. Il s'agit aujourd'hui non seulement de faire progresser les technologies et de contribuer aux innovations futures, mais aussi d'apporter des éléments de réponse aux problèmes globaux induits par les développements technologiques eux-mêmes. Ainsi, les questions d'énergie, de transport et de communication sont devenues indissociables de leur impact environnemental. De même, la sécurité est maintenant une exigence sociale incontournable et omniprésente. L'INSIS est appelé à jouer un rôle majeur dans cette profonde mutation qui vise à prendre en compte ces enjeux sociétaux dès la conception du produit.

Ces défis sont au cœur du partenariat privilégié de l'INSIS avec l'industrie et plus généralement avec le monde économique. Ce partenariat, issu d'une longue tradition de collaboration de recherche avec les centres industriels des grands domaines d'excellence français, contribue à assurer le continuum recherche fondamentale – technologie – ingénierie. Les unités de l'INSIS sont pleinement engagées dans cette démarche, comme en témoigne la labellisation Carnot de nombre d'entre elles.

Cette préoccupation, dont le secteur des sciences de l'ingénieur au CNRS a été historiquement un précurseur, est aujourd'hui

partagée par l'ensemble du CNRS. Dans ce contexte, l'INSIS conserve une spécificité liée à ses objets d'étude. Ceci lui confère un rôle important dans la coordination de nombreuses actions scientifiques aux interfaces avec les autres Instituts du CNRS. Des exemples significatifs d'enjeux économiques et sociétaux dans lesquels l'INSIS est un contributeur essentiel sont présentés ci-dessous : ils concernent le transport, l'énergie, le développement durable et la santé.

Le domaine des transports illustre parfaitement la pluridisciplinarité de l'INSIS.

L'aéronautique est un secteur en fort développement au cœur d'une compétition économique très agressive qui stimule une activité scientifique importante. Les contraintes environnementales et économiques comme les nouvelles normes acoustiques à partir de 2018 pour les plus gros avions civils, l'optimisation du rendement propulsif et la réduction des polluants issus de la combustion, poussent à développer des moteurs avec des taux de dilution de plus en plus élevés, et à étudier de nouvelles architectures de propulsion. La mutation vers l'avion de plus en plus électrique pose des problématiques d'intégration et de puissance très fortes pour les composants et les actionneurs. L'exigence de fiabilité de ces systèmes requiert des modélisations multi-physiques (électrique, mécanique et thermique). L'allègement des structures par un dimensionnement au plus juste nécessite des modèles mécaniques plus précis et le choix de matériaux plus légers (composites, alliages de magnésium...) dans le but d'économiser l'énergie. Ce souci est partagé par toutes les filières de transport.

Les problèmes de durabilité des structures, en particulier dans le secteur ferroviaire, stimulent des recherches avancées dans le domaine de la mécanique de la rupture. Plus généralement, le développement de simulations numériques permettant de reproduire de plus en plus fidèlement la physique dans des domaines très différents (instabilités de combustion, rayonnement acoustique de la turbulence, traitements acoustiques en paroi, aérodynamique compressible instationnaire, comportement des matériaux sous sollicitations thermo-mécaniques sévères...) devrait être à la source de multiples innovations dans la conception des moteurs et des structures.

Enfin, la stratégie de recherche et d'innovation dans les transports ne peut se concevoir qu'en collaboration étroite avec les sciences humaines et sociales. Ainsi, par exemple dans le secteur automobile, la place grandissante des nouveaux véhicules électriques très silencieux dans le paysage urbain induit des changements de comportements, à la fois pour le conducteur qui n'a plus les mêmes repères sonores et pour le piéton qui ne reçoit plus les mêmes signaux d'alerte venant des véhicules proches. Ce changement impose de développer une nouvelle stratégie de sonification des véhicules, dans le cadre global des ambiances sonores urbaines.

L'énergie est actuellement au centre des débats sur le développement durable. Pour l'énergie de demain, se posera la question de la combinaison d'énergies fossiles, d'énergie nucléaire, de biomasse et d'une part significative d'énergies renouvelables (hydraulique, éolienne et solaire). En parallèle, il est nécessaire de réduire la consommation dans tous les domaines (transports, habitat, etc.). La transition énergétique impose d'innover dans toutes les filières et interroge les disciplines de l'INSIS en relation avec l'INSHS, l'INSB et l'INSU.

Ainsi, les énergies renouvelables intermittentes nécessitent d'imaginer de nouveaux modes de gestion et de stockage. Le génie électrique est interrogé sur les convertisseurs de puissance et sur l'intégration dans les réseaux. Plus généralement, tous les procédés de conversion/stockage de l'énergie font ou vont faire l'objet d'un examen à la lumière des évolutions technologiques et des progrès dans la gestion intelligente des réseaux (INS2I). Les progrès en mécanique des matériaux, dans la compréhension du comportement des structures géologiques, dans l'évolution hydro-bio-géochimique des stockages souterrains devraient autoriser leur utilisation rationnelle et sûre : citons le stockage/déstockage d'air comprimé ou d'hydrogène dans des cavités souterraines, la séquestration de CO<sub>2</sub> ou encore la gestion à très long terme des déchets radioactifs vitrifiés entreposés en sous-sol.

Parallèlement aux recherches sur les moteurs hybrides ou tout électriques (pile à combustible ou batteries), les objectifs de réduction de consommation de carburant dans les moteurs à combustion interne continueront

d'induire de nombreux travaux à la fois sur leur rendement et sur l'utilisation de carburants alternatifs. Par exemple, le développement de modèles détaillés de cinétique de combustion devrait permettre d'optimiser le fonctionnement des moteurs à combustion interne. En parallèle, de nouveaux carburants contenant des quantités croissantes de molécules d'origine végétale sont à l'étude pour limiter la production globale de CO<sub>2</sub>. Plus généralement le développement, l'optimisation et l'élaboration de matériaux biosourcés et biodégradables (bétons végétaux, composites renforcés avec des fibres naturelles...) capables de remplacer à terme des matériaux pétrochimiques nécessitent la maîtrise de leur comportement hygrothermique, mécanique et acoustique.

Le développement des énergies marines renouvelables (hydroliennes, éoliennes flottantes ou fixes offshore, énergie houlomotrice, énergie thermique des mers...) engendre de nouveaux problèmes de mécanique des fluides, d'interactions fluide – structures et de durabilité de ces dernières sous des sollicitations complexes couplées à des phénomènes de corrosion.

L'INSIS participe également aux recherches sur la fusion nucléaire dans le cadre du projet ITER. Cette source d'énergie, encore loin d'être maîtrisée, représente un défi en termes de matériaux, tant les conditions de fonctionnement qu'ils y subiront sont extrêmes (ambiance cryogénique ou température très élevées, exposition à un plasma chaud, à un flux de neutrons, à des champs magnétiques intenses...).

Par ses activités dans le génie des procédés, l'INSIS peut aussi contribuer au maintien d'industries de procédés, aujourd'hui très énergivores, en favorisant leur mutation en « usine du futur ». A court et moyen terme, les objectifs d'optimisation énergétique et d'économie de matière sous-tendent une démarche essentielle visant à augmenter la productivité, la sûreté de fonctionnement et à diminuer l'impact environnemental, pour tendre vers le confinement des usines en termes de pollution et la valorisation optimale des sous-produits. A plus long terme, la recherche de nouveaux procédés « verts » et de modes de production optimisés requiert une complète maîtrise du fonctionnement des unités et de la qualité des produits, dans une perspective de recyclage optimal de la matière

épargnant la ressource. Une grande évolution est aussi attendue de la conception de procédés flexibles et permettant un contrôle total des divers processus à toutes les échelles. Le principal enjeu est en effet de remplacer le concept d'économie d'échelle, où le plus gros est considéré comme le plus économique, par celui où des procédés sont optimisés à des échelles intermédiaires. Il s'agit pour cela d'« intensifier » les procédés en utilisant des réacteurs microstructurés et d'adopter des principes de conception de « procédés continus » à des échelles de production où le réacteur discontinu était d'usage traditionnel. Ceci permet d'envisager des productions localisées et parfaitement contrôlées de produits intermédiaires. La conception des nouvelles usines n'est évidemment pas seulement une question technologique, elle devra mobiliser les sciences humaines et sociales dans leur conception architecturale et leur implantation dans les territoires.

Les sciences de l'ingénieur, en lien étroit avec l'ensemble des autres champs disciplinaires, sont au cœur des innovations pour la santé. Nos sociétés modernes sont aujourd'hui confrontées au vieillissement, à la perte d'autonomie des personnes âgées, ainsi qu'à l'exposition croissante des populations à des pathologies chroniques (neuro-dégénérescence, pathologies ostéo-articulaires, cardio-vasculaires, diabète, cancer). De façon plus générale, les grands défis d'aujourd'hui pour les sciences de l'ingénieur sont de contribuer à fournir un accès généralisé aux soins à l'ensemble des populations tout en assurant la maîtrise des coûts, de garantir la qualité et la sécurité de ces soins (réduction des risques associés aux outils diagnostiques et thérapeutiques), de mieux prendre en compte les handicaps et les déficiences et de les suppléer.

Les grandes lignes de force traditionnelles de la recherche à l'INSIS en ingénierie biomédicale sont la modélisation, l'imagerie non invasive ou endoscopique et sans marquage, la biomécanique, l'ingénierie tissulaire, la robotique et les biocapteurs. Grâce aux nouveaux concepts apparus dans les domaines des MEMS, de la microfluidique, des nanotechnologies, des plasmas froids et des technologies de l'information (télémédecine), les recherches peuvent apporter des solutions innovantes pour répondre aux exigences de la maîtrise des

coûts, de l'autonomie de la personne et d'une médecine régénératrice.

Les concepts de médecine personnalisée (traitement médical adapté aux caractéristiques individuelles des patients issues de l'imagerie, de la génomique et de la protéomique) et de la médecine régénératrice (remplacement des tissus/organes endommagés par des tissus/organes artificiels) constituent notamment des enjeux majeurs pour les recherches entreprises au sein de l'INSIS pour la santé au 21<sup>ème</sup> siècle.

## **B. L'approche système révèle de nouvelles questions**

Les chercheurs de l'INSIS s'intéressent à des objets complexes qui ont vocation à être fabriqués et utilisés. Ceci se traduit par une démarche scientifique spécifique qui vise à appréhender les systèmes dans leur globalité et leur environnement.

Pour étudier un système complexe, il est tout d'abord essentiel de tenir compte toujours plus finement des couplages entre des phénomènes physiques variés. Ces phénomènes peuvent se produire au sein d'un même composant (dont on est amené à considérer les différentes fonctions), ou par interaction entre différents composants, ou encore par interaction entre le système et son environnement. Ensuite, l'assemblage et l'intégration des méthodes et des technologies engendrent de nombreuses difficultés liées au nombre croissant de composants, à leur variété, et à leur hétérogénéité d'échelle. Enfin, s'intéresser à la conception et à l'optimisation des systèmes implique aussi de s'intéresser aux questions scientifiques posées par leur fabrication effective et leur utilisation, notamment en termes de compatibilité, de fiabilité et de co-conception.

La prise en compte de l'ensemble de ces aspects, illustrés ci-après, caractérise « l'approche système ». Elle représente un enjeu emblématique de l'identité de l'INSIS.

La nécessité d'une approche multi-physique s'exprime particulièrement dans le domaine des matériaux, où la frontière entre matériaux de structure et matériaux fonctionnels tend à s'estomper. Ainsi, les matériaux de l'électronique doivent supporter de fortes contraintes thermo-mécaniques ; les matériaux des prothèses combinent à la fois résistance mécanique, résistance à l'usure, bio-

compatibilité et résorbabilité ; les matériaux à gradients de propriétés permettent le passage continu d'un métal à un polymère ou à une céramique et assurent à la fois tenue mécanique et protection contre la corrosion, l'oxydation et l'usure. Leur développement passe par un dialogue étroit entre mécaniciens et électroniciens, ou mécaniciens et médecins ou encore mécaniciens et physico-chimistes.

La prise en compte optimale de l'interaction du système avec son environnement peut être une source de progrès. Ainsi, le génie des procédés, en synergie avec le développement de la « chimie verte », vise à concevoir de nouvelles usines sur des sites écologiquement conçus. L'usine est vue dans son environnement de ressources et dans son interaction avec le territoire industriel dans lequel elle baigne ou qu'elle engendre par son activité : c'est l'écologie industrielle. L'usine pourra alors bénéficier à plein des nouvelles voies de synthèse issues d'une (bio)chimie douce, sans solvant, spécifiquement catalysée, mettant en œuvre des réactifs biosourcés et/ou recyclés.

Les questions d'assemblage se posent de façon aiguë dans les systèmes électroniques. L'électronique de puissance, destinée à la conversion de l'énergie, suit un chemin similaire, en termes d'intégration, à celui de l'électronique « traditionnelle », support de l'information. La tâche est compliquée par la diversité des échelles dimensionnelles, le caractère tridimensionnel et l'hétérogénéité des composants. Ceci nécessite d'ouvrir de nouvelles voies technologiques pour élaborer les matériaux proprement dits, les composants actifs et passifs, les matrices d'interconnexion et les circuits de contrôle – commande. Le prototypage virtuel implique une connaissance expérimentale approfondie des couplages multi-physiques mis en jeu (transferts thermiques, effets thermomécaniques et émissions électromagnétiques) ainsi que l'élaboration de modèles compacts susceptibles d'être pris en compte dans la chaîne de conception – réalisation.

L'approche système n'est envisageable qu'avec la prise en compte de la fiabilité des composants qui constituent le système et la connaissance des interactions entre ses parties. Cela impose des recherches approfondies sur le vieillissement et la variabilité des caractéristiques intrinsèques des composants unitaires, prenant en compte les conditions

environnementales (température, humidité, rayonnement...). L'architecture du système lui-même doit prendre en compte ces critères de fiabilité et de sûreté dès sa conception. L'incorporation de méthodes et de sous-systèmes permettant une autoréparation du système est une piste possible pour aider à une fiabilité ou une sûreté accrue.

Les systèmes modernes intègrent des technologies venant d'horizons variés pour réaliser de plus en plus de fonctions (électronique, optique, mécanique, fluide, biologique...). Il devient donc impératif de prendre en compte la compatibilité des différentes filières entre elles au moyen d'une co-conception des différentes parties. Pour les systèmes les plus complexes, la notion de fiabilité et de sûreté de fonctionnement inclut aussi l'immunité vis-à-vis d'attaques externes intentionnelles ou non. Travailler sur le système implique aussi l'optimisation du packaging qui doit assurer l'immunité sans altérer les performances du composant élémentaire. Par exemple, pour les composants électroniques haute fréquence, les développements récents de l'impression 3D par frittage peuvent amener des solutions originales car elles permettent des formes autrement inaccessibles.

Dans le cas des applications à la santé, émergent des questions spécifiques relatives à la sécurité, la bio-intégration et la bio-compatibilité des systèmes. Par exemple, des matériaux bio-inspirés, des bio-matériaux « intelligents », des composants synthétiques ou biologiques, sont utilisés pour la réalisation d'implants ou d'organes bio-artificiels, pour l'administration de médicaments, la thérapie génique, ou le diagnostic. La modélisation et la compréhension du fonctionnement des systèmes neuronaux sont nécessaires pour procéder à leur réparation ou leur remplacement par des bio-prothèses neuronales issues de la micro- nanoingénierie. L'enjeu est la restauration fonctionnelle de la motricité avec le développement de stratégies de rééducation en s'appuyant sur la modélisation des systèmes complexes intégrant la vision, l'apprentissage, le contrôle neuronal, et les interfaces cerveau – machine.

---

## II. Concepts et systèmes complexes : méthodologies

---

### A. Modélisation et simulation numérique

La modélisation est présente et essentielle à l'INSIS, pour atteindre les deux objectifs scientifiques que constituent la compréhension des phénomènes physiques d'une part et la conception des composants et des systèmes d'autre part. Progresser dans la compréhension des phénomènes physiques peut se faire en suivant deux démarches assez différentes. La première consiste à mener une étude théorique (mathématique et/ou numérique) d'un problème modèle, de nature académique, qui illustre à lui seul une difficulté importante non résolue. La seconde vise à résoudre numériquement les équations de la physique aux plus petites échelles accessibles, en exploitant au mieux les ressources disponibles du calcul intensif. Voici quelques exemples de ces deux approches très complémentaires.

Ainsi, la mécanique des contacts entre solides, qui a connu un développement considérable au cours des dernières décennies, continue pourtant de stimuler de nombreux travaux mathématiques et numériques, car des questions essentielles restent non résolues en raison du caractère non régulier des modèles et des nombreuses non-linéarités. De même, l'électromagnétisme suscite toujours de nouvelles études théoriques, comme l'illustre parfaitement l'exemple des métamatériaux à indice négatif. Pour ces deux exemples, les difficultés théoriques soulevées par les modèles simplifiés justifient d'envisager la résolution numérique de modèles physiques plus riches, incorporant par exemple les aspects physicochimiques dans le cas du contact et la prise en compte de la microstructure pour les métamatériaux. On devrait pour cela suivre l'exemple de la mécanique des fluides : le calcul intensif a en effet permis de progresser dans la compréhension de la turbulence, en prenant en compte toutes les échelles spatiales et temporelles du problème, comme on le ferait expérimentalement dans un environnement parfaitement contrôlé. On peut ainsi aujourd'hui examiner des écoulements à très grand nombre de Reynolds, des écoulements

diphases, le transport dispersif de particules ou les transferts thermiques. Notons enfin que face aux défis posés par la modélisation de certains problèmes complexes de sciences de l'ingénieur (topologie des écoulements turbulents, problèmes de grandes déformations, comportements singuliers des mécanismes en robotique, visionique...), il apparaît aujourd'hui important d'étendre la palette des outils mathématiques traditionnellement utilisés à l'INSIS (homogénéisation, analyse modale, analyse numérique...) aux outils de la géométrie (différentielle et algébrique).

La simulation numérique joue également un rôle essentiel à l'INSIS, en tant qu'outil permettant d'assister le chercheur dans la conception de systèmes complexes. Un enjeu vient alors des couplages entre différents phénomènes, et souvent à différentes échelles, qu'il s'agit tout d'abord de formuler correctement puis de résoudre par une méthode appropriée, ceci générant d'intéressantes questions de mathématiques appliquées. C'est le cas par exemple de la microélectronique, car l'augmentation de la densité d'intégration dans les circuits impose désormais d'évaluer l'impact de l'interaction entre composants élémentaires sur l'intégrité du signal. Un autre enjeu vient de la volonté de tenir compte de conditions toujours plus réalistes, avec des géométries complexes et des problèmes de très grande taille, comme *l'avion complet* en aérodynamique ou en compatibilité électromagnétique, et des contraintes de temps réel dans le domaine du contrôle et de la commande. On cherche aussi à tirer parti dans le calcul de données disponibles en très grand nombre : ainsi par exemple, dans le domaine de la santé, pour l'évaluation *in silico* de traitements thérapeutiques, des modèles biomécaniques personnalisés du patient sont de plus en plus utilisés via les données acquises par imagerie médicale. Enfin, le développement d'approches probabilistes, capables de gérer les incertitudes, est aujourd'hui incontournable dans des domaines comme l'électronique et la géophysique. L'objectif ultime est de disposer d'outils performants de conception assistée par le calcul, permettant un véritable prototypage virtuel.

Le passage au calcul intensif est donc un enjeu majeur dans de nombreux domaines de l'INSIS, et il est nécessaire d'accompagner les

chercheurs et les laboratoires dans cet investissement nécessaire mais très lourd à mettre en place ; il faut encore et encore informer la communauté des chercheurs sur les moyens existants et clarifier les démarches à effectuer pour les utiliser (toujours très mal connues par une majorité), identifier les réponses les mieux adaptées aux demandes des personnes qui veulent s'y lancer, valoriser un travail de développement non productif en publications pendant une période longue, etc... Mais cet effort ne doit pas se faire au détriment du maintien au sein de l'INSIS de compétences théoriques en modélisation, compétences déjà mises à mal par l'évolution de la formation des étudiants dans les domaines de l'ingénierie, qui ne comporte plus toutes les bases requises en mathématiques.

Le renforcement des relations entre l'INSIS, l'INSMI et l'INS2I devrait permettre de préserver et d'enrichir ces deux aspects complémentaires que sont le calcul haute performance et les outils mathématiques pour l'ingénierie.

## **B. Conception, fabrication et caractérisation de nouveaux objets**

L'expérimentation réelle reste incontournable dans les recherches menées à l'INSIS. Ses laboratoires doivent pouvoir continuer à élaborer les technologies « ultimes » grâce aux moyens les plus appropriés. Ce potentiel de fabrication doit être développé pour réaliser de nouveaux composants et les caractériser, soit en cours d'élaboration, soit *in fine*.

Depuis plus de 10 ans, le CNRS dispose d'un réseau de centrales de micro- et nanofabrication (RENATECH) ouvert à des utilisateurs issus des mondes académique et industriel. Inspiré du National Nanotechnology Infrastructure Network (NNIN) américain, RENATECH a permis dans un premier temps une remise à niveau de l'outil microtechnologique français, le plaçant ainsi à la pointe aussi bien en termes d'équipements que d'expertise humaine. Les dernières années ont favorisé l'acquisition exclusive au niveau international de machines expérimentales qui ont procuré et procurent encore à ce jour un avantage compétitif aux groupes de recherche et aux industriels qui les exploitent dans leurs projets. L'INSIS est le principal promoteur de

RENATECH. Afin de faire face aux nouveaux enjeux scientifiques et industriels de la microélectronique tels que la transition vers des substrats flexibles, l'exploitation de matériaux biosourcés, l'électronique moléculaire ou bien encore l'appréhension de composants nanométriques, l'institut doit maintenir ce réseau qui s'inscrit parfaitement dans les priorités européennes des technologies clés génériques à l'horizon 2020.

Une partie des ressources et de la richesse de l'INSIS réside également dans des infrastructures techniques de recherche élaborées au fil des années dans ses laboratoires. Souvent géographiquement loin des grands équipements, ces plates-formes spécialisées sont généralement de plus petite taille mais constituent à chaque fois un atout unique pour la recherche sur un site donné. De par le regroupement d'équipements et de moyens humains accessibles autant aux partenaires académiques qu'industriels, de nombreuses synergies scientifiques ou de valorisation ont ainsi vu le jour. En l'état actuel, l'INSIS doit maintenir ce réseau de plates-formes à « l'état de l'art mondial » afin de rester compétitif en préservant le niveau de service et en facilitant l'accès des scientifiques aux technologies les plus avancées (soufflerie, bassin à houle, chambre anéchoïque, microscopes, tomographes...). Cela passe par une meilleure promotion des outils existants et par un renforcement des compétences autour de ces plates-formes.

Aujourd'hui des moyens « légers » de fabrication très prometteurs sont en progression rapide. Par exemple, les imprimantes 3D facilitent la fabrication de matériaux architecturés, éventuellement biomimétiques, et les procédés lasers permettent l'élaboration de matériaux à gradients de composition et de propriété, la réparation de pièces endommagées et le micro-usinage pour texturer des surfaces. La maîtrise de ces nouveaux procédés pose des problèmes multi-physiques intéressants couplant mécanique des fluides et des solides, thermique et sciences des matériaux. Les perspectives d'application sont immenses.

Enfin, les techniques de fabrication en nano-, micro- et opto-électronique ont bénéficié des progrès des procédés plasma, qui permettent d'obtenir des motifs nanométriques par gravure ionique réactive. Cette approche est aujourd'hui complétée par des procédés

plasma, venant du domaine du dépôt de couches minces, qui permettent la fabrication d'agrégats, de nanocristaux et de nanofils à base d'une grande variété d'atomes (Si, Ge, C, N, O...) introduits dans le réacteur plasma sous forme de gaz. Une connaissance détaillée des procédés, alliant expérience et modélisation, devrait permettre d'accéder à la fabrication contrôlée de structures nanométriques sur des surfaces de l'ordre du  $m^2$ .

Les systèmes hétérogènes de dimension micrométrique ou décananométrique, alliant des fonctionnalités électroniques ou optiques à des composants MEMS ou microfluidiques, est l'objet d'une attention très marquée, tant dans les laboratoires qui conçoivent ces systèmes que dans l'industrie qui doit les fabriquer. Les limites des capacités actuelles à fabriquer les systèmes complexes hétérogènes ne résident pas uniquement dans les moyens de lithographie ou de gravure ultimes, mais concernent aussi les interconnexions entre les composants hétérogènes formant le système, et entre le système et son environnement d'implantation. Cela nécessite de développer des efforts de recherche qui permettront d'assurer que l'ensemble des principes physiques mis en jeu coexistent efficacement et communiquent entre les sous-systèmes avec un minimum de perte. Il s'agit par exemple d'optimiser le couplage entre une fibre optique et des structures microfluidiques, phononiques, ou d'autres structures photoniques. L'assemblage devient aussi un verrou qui pourrait être levé au moyen de solutions offrant des garanties maximales en termes de métrologie. Il est envisageable à l'échelle la plus grande de faire travailler de manière collaborative des micro- ou des nanorobots qui seraient capables, dans le futur, d'accomplir une telle tâche. Pour les dimensions ultimes, des techniques d'auto-assemblage en solution, inspirées de la chimie, pourraient présenter un coût de production extrêmement compétitif par rapport à celui induit par les technologies de la microélectronique. Ces techniques consisteraient à fonctionnaliser les surfaces des composants et des sous-systèmes, à les mettre en contact et à les connecter entre eux, puis à les immerger en solution afin de réaliser l'auto-assemblage. Une telle technique d'auto-assemblage a déjà été mise en œuvre et, si la preuve de concept existe et a été publiée, cela

reste un défi à l'échelle d'un système 3D hétérogène.

Parmi les composants à concevoir et fabriquer, il convient de mentionner les besoins toujours renouvelés en capteurs et actionneurs qui s'appuient sur le traitement numérique des informations.

### **C. Acquisition et traitement de données**

Dans l'histoire du CNRS, comme dans celle des établissements d'enseignement supérieur, les sciences de l'ingénieur et les sciences de l'information étaient le plus souvent regroupées. Elles sont aujourd'hui réparties entre deux instituts, l'INSIS et l'INS2I, qui ont vocation à maintenir des relations étroites, l'interaction entre ces deux champs scientifiques étant essentielle pour l'avancée des connaissances. Les nouveaux objets physiques incorporent des méthodes algorithmiques, intègrent des capacités logicielles ou servent d'interface dans les systèmes cyber-physiques. La compréhension de phénomènes impose de résoudre des problèmes inverses, d'identifier les paramètres des modèles mais aussi, par la commande, de placer les systèmes dans des états stables. L'imagerie et le traitement des images sont essentiels pour la mesure des phénomènes et le contrôle non destructif. La multiplication des types de capteurs et du nombre des expérimentations génère des masses de données. Ce sont là autant de raisons qui font que l'acquisition et le traitement de données sont et seront dans l'avenir parmi les méthodologies essentielles des sciences de l'ingénierie.

A l'image des formidables développements réalisés et à venir dans le domaine des circuits intégrés et systèmes sur puce à l'interface de l'électronique et de l'informatique, et à mesure qu'émergent les systèmes cyber-physiques (robotiques et autres), la conception de capteurs et d'actionneurs suppose de tenir compte des traitements en temps réel associés. Un exemple est la nécessité d'intégrer des horloges internes aux capteurs pour que ceux-ci échangent leurs informations de façon synchronisée avec le reste des éléments d'un système. Cette solution est coûteuse en technologie et en énergie. Avec le développement de méthodes de traitement de l'information asynchrone, de nouveaux



capteurs et actionneurs sont à concevoir. Un autre exemple est la question de la sécurité des données. Même au sein d'un système comme un avion de ligne, les données utiles au pilotage sont transmises par le biais de réseaux informatiques. La sûreté impose de sécuriser les données au plus près de leur source, dans les capteurs, soit par des méthodes logicielles, soit en exploitant des phénomènes physiques, soit en combinant ces deux aspects.

L'imagerie combine indissociablement le traitement du signal et des ondes électromagnétiques, acoustiques, ou mécaniques. Les enjeux en imagerie sont d'augmenter la résolution spatiale et temporelle via le développement de l'instrumentation et des algorithmes pour éclairer structurés, de développer l'imagerie quantitative en milieux complexes, en temps réel et en trois dimensions. Ces questions sont particulièrement importantes dans le domaine du contrôle non-destructif des procédés de collage ou de tissage, où les techniques d'imagerie sont à prendre en compte dès la conception des matériaux. Dans le domaine de l'imagerie biomédicale, des ruptures sont nécessaires pour que des techniques optiques aient des chances de s'imposer réellement dans des domaines d'application ciblés. Les avancées techniques des dix dernières années dans la manipulation de fronts d'onde en régime optique, au-delà du régime de faible diffusion de l'optique adaptative traditionnelle, pourraient constituer une de ces ruptures et permettre des avancées majeures. En effet, le contrôle de fronts d'onde apporte une richesse qui génère un changement de paradigme : le travail sur le faisceau incident est au moins aussi riche que celui sur la détection qui a été le plus exploité jusqu'à maintenant. Le prix à payer est un traitement de l'information efficace, les images produites n'étant pas directement des images « habituelles », il faut les rendre exploitables. Le traitement du signal au sens le plus large du terme devient indissociable de l'imagerie : il n'est pas un plus qui améliore mais prend une place centrale dans la technique d'imagerie elle-même.

Comme rappelé dans une section précédente, la modélisation est essentielle à la démarche scientifique. L'étude des phénomènes physiques permet d'établir des modèles mathématiques qui, dès lors qu'ils sont correctement étalonnés, reproduisent en

simulation les réalités observées. L'étalonnage des modèles sur la base d'expériences, autrement dit l'estimation des paramètres qui les caractérisent, constitue un problème d'identification, qui peut aussi être vu comme un problème inverse. Déterminer, sur la base d'expérimentations, si ce problème inverse peut être résolu, et développer des algorithmes d'identification représentent des aspects méthodologiques importants des recherches de l'INSIS qui sont empruntés au champ de l'automatique. A cela s'ajoutent, pour les processus dynamiques, les questions d'estimation ou d'observation des états ou encore de commande en boucle fermée. Il est par exemple inenvisageable de procéder à des études dans le cadre d'ITER sans la boucle de régulation par électroaimants du plasma en fusion.

Pour toutes ces questions, le positionnement des chercheurs de l'INSIS est celui d'utilisateurs avisés de développements théoriques issus de l'automatique et des mathématiques appliquées, utilisateurs qui peuvent également concevoir des solutions ad hoc, sources de nouveaux questionnements théoriques. Un exemple récent est la réinterprétation, par les systèmes affines à commutation, de lois de commandes classiques pour les convertisseurs électriques.

---

### III. Des thématiques scientifiques partagées

---

A l'INSIS, les systèmes complexes sont étudiés à toutes les échelles, à la fois pour exploiter les phénomènes nouveaux les plus pertinents jusqu'à l'échelle du nanomètre et pour optimiser les systèmes complets.

#### A. Des questions émergentes en nanosystèmes

L'émergence de grands domaines de rupture comme la nanomédecine, la nanofluidique, la nanophotonique et la nanoélectronique repose sur l'utilisation et la conception de nanosystèmes. La réduction des dimensions des systèmes jusqu'aux échelles décanométrique et nanométrique permet en effet d'envisager des niveaux ultimes de miniaturisation, de sensibilité, de rapidité de fonctionnement, ou d'efficacité énergétique. Ces échelles sont aussi un lieu d'expression

privilegié de l'interdisciplinarité, là où la physique, la chimie, la biologie et la mécanique présentent des dimensions caractéristiques qui autorisent toute une gamme de nouvelles combinaisons. Cette richesse favorise l'émergence de nouveaux effets et nanobriques de base, desquels sont attendues les ruptures conceptuelles et technologiques qui, par exemple, permettront de poursuivre la croissance prédite par la loi de Moore ou de révolutionner la pratique médicale. Tous ces développements présentent la caractéristique commune de poser des questions liées à l'usage des nano-objets comme la dissémination, la biocompatibilité, ou plus généralement la compatibilité avec l'environnement d'intégration.

Des nouveaux matériaux et nanosystèmes sont particulièrement prometteurs. Les nanotubes de carbone présentent des caractéristiques mécaniques et conductrices qui devraient être mises à profit dans les MEMS ou dans les interconnexions de circuits. Objet de l'initiative de recherche la plus importante de la commission européenne, le graphène présente des propriétés uniques de semiconducteur laissant présager des applications électroniques en très haute fréquence par exemple. D'autres pistes prometteuses reposent sur le développement de nouveaux matériaux ferroélectriques, ferromagnétiques, piézoélectriques, ou à transition de phase, et sur leur intégration hétérogène dans les plates-formes existantes (Si, InP, InGaAs et semi-conducteurs III-V en général). Ces matériaux permettent d'accéder à de nouvelles fonctionnalités, avec par exemple le memristor qui ouvre la voie vers de nouveaux paradigmes du traitement de l'information comme les architectures neuro-inspirées. Ces objectifs supposent de continuer à développer une forte compétence en fabrication et caractérisation des matériaux, et en techniques d'assemblage et d'auto-assemblage. En sciences du vivant, des nanoparticules, des nanomoteurs et des nano-plates-formes multifonctions, activables et contrôlables à distance, sont utilisés comme biocapteurs, instruments d'imagerie, ou vecteurs de médicament. Ces nanotechnologies ont conduit à l'émergence ces dernières années du concept de nanomédecine qui devrait profondément révolutionner la pratique médicale, et permettre de dépasser les limites rencontrées

avec les méthodes diagnostiques ou thérapeutiques actuelles.

La compréhension des phénomènes aux échelles nanométriques nécessite de développer de nouveaux moyens de caractérisation. Ces moyens peuvent s'appuyer sur des instruments de précision arrivés à maturité, largement répandus dans les laboratoires et utilisés dans de nouvelles situations. Par exemple, le microscope à force atomique (AFM) ouvre non seulement de nouvelles possibilités en caractérisation microstructurale et mécanique des matériaux, mais peut aussi être utilisé en association avec la nanolithographie ou comme un outil de sollicitation mécanique de nanopiliers ou de nanopoutres. La nanotomographie de phase en synchrotron, le contrôle de l'aimantation (nano-aimantation) et de la température à l'échelle nanométrique (hyperthermie) sont des techniques de nanocaractérisation particulièrement prometteuses. En optique et en électromagnétisme, les mécanismes de contraste non-linéaires ouvrent la voie vers une résolution à l'échelle nanométrique, notamment en sciences du vivant. Une attention particulière doit être portée à l'exaltation de ces mécanismes non-linéaires par des nanosystèmes utilisés comme instruments, et à la compréhension de ces mécanismes dans les milieux complexes. Ces mécanismes doivent également pouvoir être combinés avec l'optique linéaire et d'autres contrastes physiques à l'échelle moléculaire dans des nanosystèmes multi-modaux et multi-physiques.

La structuration aux échelles nanométrique et décanométrique engendre l'exaltation de certains effets et la manifestation de nouveaux phénomènes physiques. L'amélioration des technologies de fabrication permet de réaliser des nanostructures mécaniques résonantes avec un nombre très limité de modes en très haute fréquence. Le couplage avec l'optique produit déjà des composants pour le traitement optique de l'information mais ouvre aussi la voie à toutes sortes de systèmes utilisant des structures mécaniques cohérentes et commandables. En photonique, le confinement et l'exaltation du champ électromagnétique dans des nanostructures permettent d'augmenter de plusieurs ordres de grandeur l'interaction lumière-matière à l'échelle moléculaire. Cette exaltation joue un rôle essentiel dans la détection de molécules

uniques et, en augmentant le signal, offre de nouvelles possibilités de mécanismes de contraste non-linéaires.

Les dimensions des nanosystèmes atteignent des échelles où se pose la question de la validité des modèles classiques des sciences pour l'ingénieur : mécanique, hydrodynamique, électromagnétisme macroscopique, thermique... Par exemple, en mécanique et en nanofluidique, l'augmentation du rapport surface/volume privilégie des effets d'interface qui doivent être explorés et mis à profit. En nanophotonique, le caractère délocalisé des électrons et de leur interaction demande de reconsidérer le modèle local et la notion d'interface. De manière générale, il est nécessaire de développer une compréhension fine des phénomènes physiques et des couplages qui se révèlent à ces échelles, aussi bien pour mettre à profit les nouvelles possibilités que pour éviter les perturbations de fonctionnement. En complément des méthodes rigoureuses *ab initio* qui se limitent à de « petits » ensembles de quelques centaines d'atomes ou molécules, les modèles classiques des sciences pour l'ingénieur doivent être développés à l'INSIS afin de décrire finement des nanosystèmes plus complexes et plus grands de plusieurs ordres de grandeur. Ces descriptions classiques doivent être enrichies par des modèles de couches limites, des modèles non-locaux ou des déplacements d'interfaces spécialement calibrés pour rendre compte des phénomènes à l'échelle moléculaire ou atomique.

Les objets de dimensions nanométriques présentent des problématiques majeures liées à leur usage. Par exemple, en nanofluidique et en nanoélectronique, la puissance thermique prend des proportions gigantesques et des effets parasites de température engendrent de véritables difficultés. Le contrôle des flux et des effets de chaleur, mais aussi l'augmentation de la durée de vie et l'amélioration de la fiabilité des nanosystèmes, constituent des axes de recherche privilégiés. Les nano-objets se caractérisent également par leur capacité à se disséminer dans les environnements complexes. Le développement de nouvelles approches métrologiques de détection de ces nano-objets est indispensable à moyen terme pour en assurer une utilisation encadrée. A plus long terme, l'étude de l'interaction des nano-objets avec les interfaces biologiques doit permettre d'établir les

connaissances nécessaires pour contrôler la couronne de biomolécules susceptibles de recouvrir les nano-objets, et d'orienter leurs propriétés qui, dans l'état actuel des connaissances, peuvent être délétères ou bénéfiques. En particulier, la biofonctionnalisation des nano-objets doit permettre d'obtenir des propriétés ciblées pour de nombreuses applications catalytiques, diagnostiques, thérapeutiques, et de biocapteurs.

Ces problématiques découlant de l'usage des nano-objets sont intimement liées aux questions de régulation, et doivent être traitées dans un cadre interdisciplinaire avec les sciences humaines et sociales.

## **B. Le rôle central des approches multi-échelles**

Les approches multi-échelles (en espace, en temps, en énergie) sont présentes dans tous les domaines de l'INSIS. On distingue d'une part la modélisation fine de la physique, s'appuyant sur la simulation numérique des équations fondamentales et faisant intervenir un très grand nombre de degrés de liberté, et d'autre part, une approche dans laquelle on cherche à dégager des lois physiques ou macroscopiques permettant de définir des critères opérationnels pour l'ingénieur. Autrement dit, il est nécessaire de résoudre des problèmes d'algorithmiques complexes, qui reposent sur une utilisation optimale des ressources du calcul haute performance, mais aussi d'améliorer la compréhension des phénomènes à des échelles macroscopiques, c'est-à-dire finalement de pouvoir prédire pour comprendre.

Les recherches développées en mécanique des fluides pour la turbulence et en aéroacoustique pour le bruit aérodynamique démontrent la nécessité de développer des approches numériques et expérimentales spécifiques pour l'étude des couplages impliquant des échelles spatiales et temporelles, ou bien encore des niveaux d'énergie, qui sont très disparates. Deux exemples de modélisation sont présentés dans ce qui suit. Le premier concerne la propagation des infrasons sur de très grandes distances dans l'atmosphère terrestre, c'est-à-dire de signaux acoustiques de fréquence inférieure au dixième de Hertz. La signature au sol de ces ondes sonores de très faible amplitude est

détectée et utilisée pour caractériser un certain nombre d'événements naturels. Cet exemple permet d'explicitier la disparité des échelles : la longueur d'onde acoustique de quelques kilomètres, les échelles de stratification de l'atmosphère sur quelques dizaines de kilomètres et les échelles de la turbulence atmosphérique allant jusqu'à quelques dizaines de mètres du sol. La résolution numérique d'un tel problème nécessite non seulement des maillages importants (plusieurs dizaines de milliards de points), mais aussi l'utilisation d'algorithmes numériques très performants pour pouvoir par exemple inclure les effets météorologiques sur la propagation acoustique non linéaire en haute atmosphère. Dans un autre contexte, l'optimisation du bruit transmis dans un habitacle, afin de conserver des niveaux sonores acceptables dans un cockpit d'avion commercial avec l'utilisation de matériaux composites, ou pour développer des commandes vocales dans un habitacle de voiture, nécessite d'identifier expérimentalement et numériquement la contribution acoustique à l'excitation turbulente externe de la structure. Elle ne représente cependant qu'une fraction extrêmement faible en termes de niveau énergétique (de l'ordre de 0.01%), mais possède des longueurs d'onde très grandes devant l'épaisseur de la couche limite turbulente. Une modélisation numérique est maintenant possible sur des géométries simples en s'appuyant de nouveau sur des algorithmes spécifiques et sur le calcul massivement parallèle.

Le développement du calcul intensif permet d'étudier des problèmes non-linéaires comportant des échelles spatiales et énergétiques encore plus disparates, comme les écoulements réactifs, les instabilités de combustion, l'aéroacoustique, la dispersion de polluants à l'échelle de la ville et la simulation de la couche limite atmosphérique, pour aboutir par la suite à de meilleures prédictions dans des simulations numériques plus globales, où la physique est plus intégrée, mais où la complexité géométrique et les interactions avec d'autres disciplines sont présentes.

Ces problématiques sont également rencontrées dans les solides. C'est ainsi le cas pour les matériaux à grains ultrafins ou nanostructurés, pour lesquels la proportion des interfaces par rapport au volume est élevée. La

plasticité dans les grains devenant problématique du fait de leur taille, le glissement aux joints des grains, assuré par transfert diffusif de matière et/ou la microplasticité au voisinage du joint deviennent des mécanismes prépondérants de déformation. La caractérisation et la modélisation des structures et réponses mécaniques des interfaces reposent là aussi sur une description multi-échelles de la physique.

En tribologie, la compréhension des effets locaux à petite échelle, des couplages physico-chimiques et de leurs liens avec les mécanismes mécaniques globaux pour le frottement et l'usure, est encore un objectif non atteint. Pour avancer sur cette voie, il paraît nécessaire de mettre en place de nouvelles méthodes expérimentales permettant d'atteindre et de visualiser les phénomènes mis en jeu à des échelles pertinentes, dans des zones qui par définition sont souvent non visibles. Un autre objectif est de faire dialoguer l'expérience et la modélisation numérique en rapprochant les échelles mises en jeu. L'enjeu actuel est de combiner efficacement les derniers développements utilisant la dynamique moléculaire couplée à la chimie quantique, le numérique continu et le numérique discret. Ces verrous scientifiques pourront être repoussés en utilisant des moyens de calculs puissants.

Les modélisations multi-physiques intégrant des connaissances issues de mesures biochimiques, physico-chimiques, mécaniques ou thermiques, et l'établissement de lois de comportement multi-échelles, par exemple de la molécule (modélisation fine à grand nombre de degrés de liberté) au système macroscopique (molécule, cellule, tissu, organe, système), restent un défi pour la modélisation du vivant. Cela est d'autant plus critique que les lois de comportement sont également rendues complexes par leur caractère évolutif dans le temps.

Les mécanismes multi-échelles omniprésents à l'état naturel sont aussi utiles pour concevoir des systèmes complexes innovants. Ainsi par exemple, la notion de métamatériaux a été proposée en électromagnétisme, puis déclinée dans toutes les équations des ondes (hydrodynamique, mécanique, acoustique). Ces structures multi-échelles artificielles peuvent être modélisées avec un nombre réduit de paramètres effectifs en utilisant les techniques les plus fines de

l'homogénéisation. En donnant accès à toute une gamme de propriétés effectives qui n'existent pas à l'état naturel, ces métamatériaux ont suscité un réel enthousiasme dans la communauté. Il s'agit pour l'avenir d'être exigeant sur la pertinence des réalisations et des applications, et d'identifier les véritables verrous sur les deux plans théorique et expérimental : par exemple la difficulté d'utiliser les nouvelles fonctions (couplage difficile), la fabrication 3D, et l'homogénéisation aux fréquences de résonance.

### **C. Un intérêt croissant pour les phénomènes incertains, l'approche stochastique et la complexité**

Les sciences de l'ingénierie visent à comprendre des phénomènes et des processus pour mieux les maîtriser et les intégrer dans des systèmes. Dans les différentes étapes de cette démarche, tout ne peut être appréhendé avec le même niveau d'exactitude. Ceci conduit à ranger une partie des phénomènes dans la classe des phénomènes imprévisibles, représentés par des modèles aléatoires et/ou incertains. Longtemps l'ingénierie a fait en sorte que cet aléa soit suffisamment négligeable pour maintenir des performances souhaitées. Les exigences actuelles imposent de mieux appréhender toutes ces incertitudes. Même si de nombreux travaux en ce sens existent, cet axe de travail de recherche est en grande partie prospectif.

Ainsi, par exemple, les valeurs d'impédance électrique sont connues à un niveau de précision près. Les amortissements des modes dynamiques de matériaux flexibles sont difficilement identifiables avec précision. La rupture des matériaux quasi-fragiles a un caractère intrinsèquement imprévisible, lié à l'hétérogénéité des microstructures, dont une bonne représentation est stochastique. De même, ce sont des modèles stochastiques qui permettent de décrire la photonique dans un milieu désordonné. Les incertitudes sur les phénomènes s'ajoutent et se combinent quand on procède à l'intégration de composants pour concevoir des systèmes.

Le caractère aléatoire vient aussi souvent de l'impossibilité de construire des représentations exactes pour des phénomènes complexes, pour lesquels on n'a accès qu'à des

mesures bruitées. Il peut être alors utile de faire appel à des représentations d'ordre réduit augmentées de perturbations aux lois (apparemment) simplistes, de type bruit gaussien non-stationnaire. Un exemple de cela est le contrôle du décollement d'un fluide sur une aile d'avion. Le contrôle actif suppose de modéliser l'influence d'un actionneur situé en amont, sur le décollement mesuré par des capteurs en aval de l'écoulement. Les objectifs de commande en temps réel conduisent à privilégier des modèles bruités et incertains de type boîte noire à l'utilisation de modèles complexes de type éléments finis, pour représenter les écoulements turbulents. Le choix du modèle dépend donc de l'objectif de traitement. Pour un même système, différents modèles doivent même pouvoir s'articuler et un moyen de ne pas perdre la complexité des plus précis d'entre eux est de donner des marges d'incertitude sur les modèles plus simples. La variété des sources d'incertitude impose de savoir leur donner des représentations mathématiques localisant leur influence et mesurant leur importance relative (normes, variances, etc). Cela suppose une compréhension commune de ces notions entre différents champs des sciences de l'ingénierie et lors des changements d'échelle. Un avion de transport civil est par exemple un assemblage de milliers de composants faisant intervenir de la mécanique des fluides, de la mécanique des structures, de l'électronique et de l'informatique. Même dans l'éventualité où chacun des composants pourrait être décrit par quelques paramètres scalaires méconnus, la description et la manipulation de l'ensemble est actuellement hors d'atteinte. Cela impose de développer des représentations incertaines de haut niveau (matrices incertaines, vecteurs propres incertains, opérateurs incertains...) ainsi que des outils pour la manipulation des incertitudes (représentations linéaires-fractionnaires, éléments finis stochastiques, chaos polynomial...) qui doivent être échangeables entre communautés. C'est là un enjeu interdisciplinaire sur la modélisation, l'identification et la réduction de modèles, au sein de l'INSIS et au-delà.

Outre les aspects précédemment cités, l'enjeu est de pouvoir garantir des niveaux de performance et de fiabilité. Pour éviter de multiplier les expérimentations et les simulations, toutes deux coûteuses en temps et en moyens, deux approches sont utilisées, qui

pourraient à l'avenir être combinées : une approche probabiliste qui associe par les mathématiques un niveau de confiance aux résultats (mais n'exclut pas le risque), et une approche déterministe robuste qui par des outils mathématiques (certificats de Lyapunov par exemple) permet d'exclure catégoriquement des phénomènes pour toute valeur bornée des incertitudes.

L'approche probabiliste suppose tout d'abord d'identifier des lois de probabilité sur des ensembles incertains complexes. On peut ensuite développer des méthodes de tirage aléatoire, ou des méthodes permettant de propager les incertitudes sur les modèles. Il faut enfin associer aux résultats une formalisation des niveaux de confiance. L'étude statistique des phénomènes se retrouve également au niveau matériel, par exemple pour le test de circuits électroniques. L'apport de perturbateurs (impulsions optiques ou électromagnétiques) au comportement stochastique permet l'évaluation de sa sûreté de fonctionnement ou de sa sécurité.

L'approche robuste de son côté suppose de mettre en évidence des invariants et/ou des fonctions de type énergétique dont les caractéristiques garantissent des propriétés pour toutes les incertitudes. Le défi est ensuite la réduction du pessimisme des résultats. On peut noter dans ce domaine des avancées majeures dans le champ théorique de la commande des systèmes, avec les nouvelles méthodes mathématiques dites de relaxation.

Enfin, en acoustique, comme en électromagnétisme et en optique, la complexité du milieu peut s'avérer un atout en permettant la manipulation cohérente d'un grand nombre de degrés de liberté spatiaux et temporels. Par exemple, le contrôle des ondes dans un milieu désordonné peut être utilisé avantageusement pour focaliser spatialement et temporellement, grâce aux diffusions multiples. Il est ainsi possible d'utiliser une couche de matériau diffusant comme une lentille permettant de focaliser au-delà de la limite de diffraction, comme un polariseur ou encore comme un spectromètre. Des sources de lumière peuvent également bénéficier de matériaux diffusants pour améliorer leur efficacité (extraction de lumière par diffusion, laser aléatoire contrôlable, effets de « cavité » pour atteindre des régimes de couplage fort lumière-matière).

---

## Conclusion

---

En conclusion, les rédacteurs de ce rapport rappellent que celui-ci ne prétend pas à l'exhaustivité et ils renvoient les lecteurs intéressés aux rapports de conjoncture des sections 8, 9, 10, 4, 7, 28 et 54. Ils espèrent en revanche avoir illustré de façon convaincante quelques grandes tendances qui traversent l'ensemble de l'institut et esquissent les orientations de la recherche de demain dans le domaine des sciences de l'ingénierie et des systèmes. La transversalité des sujets en plein essor conduit à souligner plus que jamais l'importance des relations entre les sections de l'institut, et au-delà, la nécessité de renforcer les partenariats avec les autres instituts du CNRS. Les conseils scientifiques des instituts du CNRS sont particulièrement bien placés pour développer ces relations et ces partenariats.