

## 09

# Ingénierie des matériaux et des structures, mécanique des solides, acoustique

### *Président*

KONDO Djimédo

### *Membres de la section*

BREITKOPF Piotr

CHARLIER Robert

CRISTINI Paul

DEPLANO Valérie

DUBUS Bertrand

GRIL Joseph

LE MOGNE Thierry

LEBON Frédéric

MAUREL Nathalie

M. MOES Nicolas

ORGEAS Laurent

PAGNEUX Vincent

PATOOR Etienne

POMMIER Sylvie

PRADA Claire

RAUCH Edgar

SINOUE Jean-Jacques

VALES Frédéric

VERDIER Claude

Les disciplines représentées dans la section 09 sont à la fois des disciplines de savoir, et des disciplines de l'ingénierie. On les retrouve aussi bien dans les activités de génération de connaissances de base, que dans la démarche de mise en oeuvre de ces connaissances dans des réalisations concrètes.

Ce rapport est organisé comme suit. Dans un premier temps, différentes thématiques disciplinaires de la section sont passées en revue avec la préoccupation d'extraire quelques faits marquants, de préciser quelques enjeux scientifiques pour les cinq prochaines années et, enfin, de proposer des recommandations. Dans un second temps, des éléments complémentaires plus transversaux sont apportés en les déclinant sur la multi-disciplinarité, l'impact sociétal des disciplines et les relations avec l'industrie.

## ACOUSTIQUE

L'acoustique est la science de la vibration de la matière et de la propagation de cette vibration sous la forme d'ondes. Elle s'appuie sur un socle scientifique et technique très large, multidisciplinaire, associant étroitement aspects fondamentaux et appliqués. L'acoustique peut être structurée en deux domaines principaux : le premier centré sur la perception des sons par les êtres vivants avec des thématiques comme l'audition, la parole, la psychoacoustique, l'acoustique musicale, la vibro-acoustique, l'aéroacoustique, l'acoustique environnementale et la bioacoustique ; le second concerné par l'exploitation des ondes acoustiques à des fins d'ingénierie sans lien avec la perception sonore (imagerie, contrôle non destructif, sismique, acoustique sous-marine...). La frontière entre «acoustique sonore et perceptive» d'une part et «ingénierie des ondes acoustiques» reste cependant perméable et source d'interdisciplinarité.

### **Acoustique sonore et perceptive :**

L'acoustique sonore et perceptive a une grande importance dans la vie quotidienne de l'être humain comme vecteur d'expression, de communication et de culture. Lui sont naturellement associées des questions sociétales fondamentales :

- les problèmes de santé publique que constituent la malentendance, la surdité et autres pathologies de l'audition ;
- les nuisances sonores liées en particulier aux transports dans un environnement urbain de densité et d'activité toujours croissantes ;
- la question naissante de l'effet du bruit anthropogénique sur le comportement animal et de ses conséquences sur la biodiversité.

### **Caractériser les sources et la propagation du bruit :**

De nombreuses sources de bruit dans les transports font intervenir des phénomènes non linéaires et/ou chaotiques associés à un écoulement, un contact ou un frottement: bruit de turbulence et bang sonique en aéronautique, contacts pneumatique-chaussée ou roue-rail, crissement des freins... La modélisation numérique et la caractérisation de ces phénomènes a connu d'importantes avancées comme le développement de la modélisation directe du bruit rayonné par des écoulements turbulents ou la mise en oeuvre de méthodes laser (anémométrie laser à effet doppler, vélocimétrie par image de particules) pour la caractérisation des champs acoustiques. Ces résultats alimentent les travaux sur le contrôle du bruit à la source qui peuvent être de type passif, actif ou mixte.

La prévision des niveaux sonores implique également la caractérisation sur une large bande de fréquence de la propagation du bruit en incluant les processus de diffraction, de diffusion et d'absorption par des obstacles, de réflexion et d'absorption par des sols hétérogènes, de réfraction et de diffusion en présence de phénomènes micrométéorologiques...

Les travaux sur cette thématique sont pour une part importants conduits dans le cadre du GDR 2493 « Bruit des transports » qui doit se poursuivre sous la forme d'un nouveau GDR orienté sur l'environnement urbain : « Ville silencieuse durable ».

### **Comprendre les liens entre grandeurs acoustiques, mécanismes physiologiques de l'audition et sensation perçue en situations complexes :**

Si le mécanisme de perception de certains attributs élémentaires du son (niveau sonore, hauteur tonale) est aujourd'hui assez bien compris dans un environnement où les stimuli sont parfaitement contrôlés, de nombreuses questions restent ouvertes dans le cas de sons ayant une structure temporelle complexe. La sonie qui quantifie la perception du bruit ou le timbre qui caractérise un son complexe font l'objet de nombreux travaux de nature très interdisciplinaire (acoustique, biologie, neurosciences) qui s'appuient sur les récentes avancées en synthèse de champ sonore et en imagerie cérébrale fonctionnelle. L'étape suivante consiste à tenter d'établir une relation directe entre les propriétés de vibration et de rayonnement des sources de son ou de bruit et les sensations perçues. Il s'agit là d'une thématique riche en applications : facture instrumentale, environnements urbains, qualité sonore de produits manufacturés...

### **Modéliser les systèmes auditifs et vocaux :**

La parole est une activité propre à l'homme, sans doute l'une des plus importantes. Sa production et sa perception font intervenir des mécanismes vocaux et auditifs spécifiques à notre espèce. Il s'agit de phénomènes d'une grande complexité dans lesquels l'acoustique joue un rôle important en interaction avec de nombreuses autres disciplines (physiologie, mécanique des fluides, biomécanique, neurosciences, linguistique, informatique). La description fine du fonctionnement de l'audition ou de la voix, nécessaire à la description des physio-pathologies et à l'amélioration des prothèses auditives et vocales, a

engendré une évolution vers des modèles numériques tridimensionnels. Ceux-ci restent pour l'instant, limités à des mécanismes partiels et souffrent d'une connaissance encore insuffisante de la biomécanique des tissus vivants.

### **Ingénierie des ondes acoustiques :**

En ingénierie, l'onde acoustique est principalement un outil d'exploration et de caractérisation de la matière (échographie acoustique incluant l'évaluation et le contrôle non destructifs, le sonar et l'océanographie, la sismique...), mais elle peut également servir à transmettre une information (téléphonie sous-marine...) ou à transformer la matière (sonochimie, soin par hyperthermie...).

L'échographie au sens large est un sujet d'importance économique dans les secteurs du transport, du nucléaire, du médical, où la vie des individus est le critère prépondérant par rapport à celui du coût et où un nombre croissant de pièces et de structures doit être contrôlé en production, en cours d'utilisation ou lors d'opérations de maintenance. La dynamique insufflée par le GDR 2501 « Ultrasons » (devenu franco-anglais) a été particulièrement positive pour le développement de ces thématiques.

L'autre volet important, impliquant des ondes de plus basse fréquence, concerne la caractérisation ou la surveillance des éléments constitutifs de la planète (terre, mer, atmosphère). Les évolutions majeures en ingénierie des ondes acoustique (à l'exception de l'imagerie traitée par ailleurs) sont décrites ci-après des infrasons aux hypersons.

### **Sonder et surveiller la planète :**

De nombreuses expériences ont montré que les ondes acoustiques pouvaient être utilisées à des fins de caractérisation ou de surveillance après propagation via le sol, les océans ou l'atmosphère sur des distances de plusieurs centaines à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres. Les applications sont nombreuses et très actuelles: thermométrie acoustique des océans, détection d'essais nucléaires, surveillance de l'activité volcanique... Ce regain d'intérêt pour les infrasons ou les sons de très basse fréquence pose des défis spécifiques comme la modélisation de la propagation acoustique sur de très grandes distances en environnement incertain, la conception de capteurs et de sources très basse fréquence ou le développement de méthodes de traitement et d'analyse des signaux adaptées. A une échelle plus locale, l'essentiel des efforts porte sur la caractérisation acoustique des fonds marins, activité bien établie soutenue par la défense et par l'industrie pétrolière.

### **Récupérer de l'énergie et refroidir avec des ondes acoustiques :**

Les machines thermoacoustiques (moteurs et pompes à chaleur) sont susceptibles d'apporter des réponses à certains problèmes liés au contexte de changements climatiques et de décroissance des ressources en énergie fossile: génération d'électricité à partir d'une source de chaleur renouvelable, récupération de l'énergie perdue sous forme de chaleur, réfrigération « propre »... Sous l'impulsion du GDR 3058 « Thermoacoustique », la

recherche française en thermoacoustique se développe et se structure avec pour objectif l'amélioration des performances de ces machines.

Les études menées abordent des aspects à la fois fondamentaux (description des phénomènes complexes se développant dans ces machines) et technologiques (développement de machines opérationnelles).

#### **Développer un contrôle santé intégré :**

Pour augmenter la sécurité et réduire les coûts en évitant l'immobilisation et le démontage partiel des structures à

tester, le contrôle santé intégré repose sur un réseau d'actionneurs/capteurs implanté au sein des structures lors de leur fabrication. Celui-ci constitue un système permanent d'évaluation non destructive qui permet de délivrer à tout instant un diagnostic santé. Cette méthode, active ou passive, suppose une connaissance fine de la propagation des ondes ultrasonores guidées dans les structures réelles et la mise en oeuvre de méthodes innovantes de traitement des réseaux de capteurs (décomposition de l'opérateur de retournement temporel, corrélation de champ diffus...) que tendent également à exploiter les méthodes plus traditionnelles de contrôle non destructif.

#### **Gagner en sensibilité grâce aux effets non linéaires :**

Le caractère localisé des non-linéarités des défauts dans le matériaux industriels (béton, métaux et alliages...) fait des phénomènes acoustiques non linéaires des candidats privilégiés pour détecter et caractériser l'endommagement des ces matériaux par fissuration, délamination, décollement, corrosion, fatigue... Les caractéristiques acoustiques non linéaires s'avèrent beaucoup plus sensibles à l'endommagement que les paramètres linéaires. La transposition de ces techniques de laboratoire vers l'industrie constitue le défi actuel de cette thématique.

#### **Soigner avec des ultrasons :**

L'effet des ultrasons sur les tissus vivants est à l'origine d'un grand nombre de techniques médicales interventionnelles en évolution rapide : les ultrasons focalisés à haute intensité (HIFU) pour l'ablation de tumeurs par hyperthermie, la thrombolyse et l'homéostasie ; la biothérapie assistée par ultrasons pour la délivrance ciblée de médicaments, la thérapie génique ou la réparation de fractures osseuses.

La nécessité de décrire l'interaction complexe onde-matière vivante met également l'acoustique non linéaire au coeur de cette thématique.

#### **Explorer la matière aux petites échelles :**

La génération et la détection d'ondes ultrasonores par lasers picoseconde (acoustique nanoseconde) ou femtoseconde (acoustique picoseconde) offrent une méthode unique de caractérisation de la matière aux échelles micrométriques et nanométriques. L'industrie microélectronique constitue le principal domaine d'application. Les travaux émergents sur ce sujet abordent

la caractérisation de nano-objets ou l'imagerie très haute résolution des milieux biologiques.

Pour compléter la description thématique et qualitative qui précède, la situation de l'acoustique en France peut être analysée à la lumière de données statistiques récentes issues du livre blanc de l'acoustique édité par la Société Française d'Acoustique. Sur la période 2006-2009, le pourcentage d'articles d'origine française est de 8,7 % dans le Journal of the Acoustical Society of America et de 7,8% dans l'ensemble des 26 revues d'acoustique référencées dans le Web of Science. Ces chiffres, comparable à ceux de la physique, montrent que la situation de l'acoustique est globalement satisfaisante pour autant que l'on admette la pertinence d'un critère fondé sur le nombre de publications. Si l'on pousse l'analyse en distinguant les sous-disciplines, on peut identifier les sous-disciplines dont le pourcentage de publication d'origine française est notablement supérieur à la moyenne de la discipline (acoustique linéaire générale, acoustique non linéaire, acoustique ultrasonore, vibroacoustique et bruit, acoustique musicale) et celles dont le pourcentage est notablement inférieur (audition dans son ensemble physio-ou psychologique, acoustique sous-marine, bioacoustique qui s'intéresse à l'acoustique des animaux).

Il est préoccupant que l'audition, qui relève d'un problème sociétal susceptible de s'accroître avec le vieillissement de la population et le manque de sensibilisation des plus jeunes, fasse l'objet de peu de travaux scientifiques en France. La difficulté à conduire une recherche fortement interdisciplinaire dans un pays où les grandes disciplines structurent fortement la formation et l'organisation scientifique peut-être l'une des raisons de ce désintérêt. Le cas de l'acoustique sous-marine est différent. Suite au retrait massif des financements militaires dans les années 90, le secteur académique s'est considérablement réduit au point de mettre en jeu la pérennité d'un certain nombre de compétences acquises. Il est important que les pouvoirs publics mesurent l'importance de conserver cette spécialité en France, en raison des nombreuses applications liées à l'environnement et l'énergie.

La bioacoustique est une recherche fondamentale presque absente de France. Le plan stratégique du CNRS à 2020 prévoit les études sur le développement des êtres vivants. La production du son et l'audition sont des aspects de la biologie des animaux qui ne peuvent être ignorés, en lien avec le bruit anthropogénique et ses conséquences sur la bio-diversité.

Enfin, il faut noter que l'audition et l'acoustique sous-marine souffrent d'un manque de coordination et de structuration au niveau national. Le CNRS a sans aucun doute un rôle à jouer pour susciter, soutenir et structurer les initiatives collectives sur ces thématiques.

## **MATERIAUX ET STRUCTURES**

Les travaux sur les structures et sur les matériaux (bois, métal, polymère, béton ...) sont de plus en plus intimement liés dans la mesure où le comportement mécanique d'un objet, qu'il s'agisse d'un micro mécanisme ou d'un bâtiment, dépendra tout à la fois de l'amplitude des sollicitations transmises par la structure et de la capacité des matériaux utilisés à supporter ces charges.

Les études menées dans ce domaine par les laboratoires de la section sont en phase avec les demandes sociétales. Il s'agit aujourd'hui de concevoir ou d'analyser des matériaux ou multi-matériaux de structures et/ou multifonctionnels qui répondent aux impératifs de secteurs industriels majeurs tels que l'énergie, le transport, l'environnement, la santé et le génie civil. Les exigences sont d'assurer la durabilité et la fiabilité des produits ou des structures tout en assurant une « conception verte » en intégrant notamment l'ensemble de la chaîne «de vie» des matériaux, de leur élaboration jusqu'à leur fin de vie.

Si les travaux sont généralement identifiés par leurs particularités et notamment les spécificités des matériaux étudiés (polycristaux, amorphes, multiphasés, milieux divisés ...) les concepts et les méthodes présentent de très fortes potentialités de transversalités. Une des forces de la communauté mécanicienne est de ne pas être cloisonnée par matériaux cibles.

Concernant les sollicitations à considérer, elles sont variées et toujours plus complexes. Et il importe de prendre en compte le comportement mécanique sur des échelles d'espace variées et des échelles de temps très étendues allant de celles très courtes relatives aux sollicitations dynamiques (vibrations et séismes) à celles caractéristiques des géomatériaux. De même les modes de déformation sont sensiblement différents intégrant les faibles voire très faibles déformations (domaine élastique ou microplastique) et les très grandes déformations (élastomères, tissus mous, nouveaux procédés de mise en forme), ainsi que différents couplages dus à des sollicitations thermomécaniques, hydromécaniques ou chimio-mécaniques, ou encore au vieillissement et l'altération ...

A cette fin, les recherches conduites s'appuient sur une démarche alliant, d'une part, les observations de plus en plus fines des microstructures et, d'autre part, l'analyse, fréquemment théorique et/ou numérique, ainsi que l'interprétation des micro-mécanismes de déformation. S'est fait jour depuis quelques années une volonté manifeste d'enrichir les modèles de comportement macroscopique ou des approches multi-échelles (théoriques et/ou numériques) en s'appuyant sur les physiques en jeu aux échelles pertinentes.

Ainsi, la prise en compte des sollicitations multiphysiques, des couplages avec les transferts fluide dans des milieux saturé ou non saturé, avec la température, la chimie ou la biologie, a fortement progressé grâce aux travaux de nombreux laboratoires relevant de la section. D'autre part, on notera que les moyens de mesures ont considérablement évolué au cours des dernières années. Par exemple, les mesures de déplacement ou de champs qui étaient pratiquées de manière quasi artisanale et laborieuse voici près de 30 ans sont aujourd'hui basées sur une prise d'images 2D ou 3D (tomographie notamment) avec des outils en lumière visible, en rayons X, en infrarouges, etc., associée à la corrélation d'images ; ceci permet notamment d'accéder aux champs de déformation en tout point des échantillons. Ces techniques sont pratiquées aujourd'hui par de nombreux laboratoires. On peut espérer voir émerger demain de puissants outils d'observations

finies sur des ouvrages de grande taille (un pont, une aile d'avion, une fondation, une structure en service...).

Outre ces développements, la mécanique des matériaux se trouve intimement liée à des recherches menées en science des matériaux et plus spécifiquement en métallurgie. Les travaux associés à la métallurgie conservent un niveau d'excellence mondiale qui est partie prenante dans l'essentiel des développements des secteurs majeurs de l'industrie et ce malgré la dispersion à la fois des centres de décisions et des sites de productions hors Europe. En particulier, ils ont aujourd'hui dépassé le stade de l'approche explicative pour proposer des démarches prédictives et tendent vers la conception de matériaux « sur mesure » pour répondre aux demandes de plus en plus contraignantes de propriétés spécifiques pour des usages inédits et exigeants. Il est par exemple souvent question d'alléger les structures dans le transport, de stabiliser dans le temps et fiabiliser les matériaux utilisés dans le secteur de l'énergie, de diminuer, à propriétés physique et mécanique constantes, la taille des objets produits dans le secteur de la microélectronique, etc.

Les enjeux des prochaines années portent également sur la prise en compte de plus en plus fine de couplages multiphysiques (e.g. : perméabilité-mécanique) en mettant à profit diverses techniques de changement d'échelle. Si beaucoup d'espoirs sont fondés sur ces dernières méthodes, il est peu probable qu'elles permettent dans un délai court de traiter tous les problèmes posés, ce qui justifie de maintenir un dialogue fort entre ces méthodes et le développement d'approches phénoménologiques, éventuellement enrichies.

De nombreuses questions restent très ouvertes notamment autour de la fissuration / rupture dont il est bien connu qu'elle dépend de l'échelle à laquelle on observe les phénomènes. Des efforts notables de recherche théorique et numérique sont encore nécessaires dans ce domaine. Les contributions récentes de l'Ecole française de mécanique, tant par des approches variationnelles de la fissuration tout à fait originales que par le développement de modèles constitutifs régularisés sont importantes. Elles laissent espérer des avancées notables pour la description de la transition des modes de déformation continus vers la rupture.

Une des difficultés liées aux évolutions récentes concerne la diversification des matériaux. Celle-ci provient des possibilités d'élaborer de nouveaux matériaux à partir de constituants usuels, mais également de la nécessité d'optimiser les propriétés d'usage. Ainsi, au delà des composites à matrice métallique ou polymère qui font dorénavant partie du paysage, voit-on émerger des composites verts, des nanocomposites, des matériaux «intelligents» (matériaux biomimétiques, alliages/polymères à mémoire de forme, matériaux piézo-électriques, micro/mésosstructures adaptatives...), des matériaux architecturés (renforts nanométriques/millimétriques, cellulaires, mousses, milieux poreux, granulaires, fibreux...), sans oublier les biomatériaux ou les tissus vivants. Ces « nouveaux » matériaux, le plus souvent « porteurs », suscitent de nouvelles problématiques de fond capables de faire progresser les connaissances

mais également les méthodes et les outils en mécanique des matériaux.

Enfin, il faut constater qu'il se crée de plus en plus un continuum entre Ingénierie des matériaux, Ingénierie des structures et mécanique des solides. Cette tendance doit beaucoup aux travaux expérimentaux sur l'analyse de champs mécaniques qui fait l'objet du paragraphe suivant.

## IMAGERIE ET MESURE DE CHAMPS

L'imagerie, accompagnée de ses chaînes de « post-traitement », comme par exemple l'analyse d'images et les techniques mesures de champs, se positionne aujourd'hui comme un moyen incontournable dans la section, que ce

soit pour répondre à des problématiques applicatives, comme le Contrôle Non Destructif (dans l'industrie, le génie civil, le biomédical...) ou bien encore pour observer et décrire les sous-structures, et leurs mécanismes de déformation, dans les milieux hétérogènes sur lesquels les chercheurs de la section 09 se penchent (matériaux naturels, manufacturés, géomatériaux, structures du génie civil, milieux vivants,...). Elle contribue ainsi, et de plus en plus significativement, à la compréhension et la modélisation des phénomènes physiques et mécaniques de ces milieux.

Dans cette optique, de multiples techniques d'imagerie sont développées et mises en oeuvre par les chercheurs expérimentateurs de la section 09. Pour certaines techniques, ces chercheurs se positionnent même comme des acteurs principaux de leur développement : c'est le cas des techniques d'imagerie émergentes basées sur la propagation d'ondes élastiques. Ils sont également fortement impliqués dans le développement d'essais (micro)mécaniques avec observations in situ couplés à des mesures de champs, cinématiques et/ou thermiques. D'une manière générale, les tendances qui se dessinent sont d'aller vers :

- de plus en plus d'imagerie 3D (microscopie confocale, IRM, microtomographies à rayons X - dont l'utilisation en mécanique des (géo)matériaux a été initiée par les chercheurs de la section -, optique, acoustique, par résistivité électrique...),
- les échelles d'observation de plus en plus fines (nanotomographie à rayons X ou sous ESEM, microscopie à transmission, microscopie à force atomique, sonde atomique 3D, imagerie par enlèvement de couches MEB-FIB),
- les structures pour leur contrôle en service (CND) mais également lors de leur certification (dans l'aéronautique par exemple), voire lors de leur conception (utilisation de démonstrateurs) où différents moyens de mesure peuvent être mis en oeuvre,
- les couplages entre différentes méthodes (observations de surface dans le visible et l'infrarouge, DRX, microtomographie à rayons X en modes d'absorption et de diffraction...).

Une autre tendance très nettement renforcée ces derniers temps est la volonté accrue de voir bouger les milieux étudiés, de plus en plus vite (dynamique rapide), le cas

échappant dans des conditions d'observation de plus en plus sévères (par exemple lors de l'usinage des métaux ou lors d'essais faits pour des applications militaires).

### Imagerie par propagation d'ondes élastique<sup>1</sup>

Utilisée depuis longtemps en échographie médicale, l'imagerie ultrasonore multiéléments se développe de façon significative pour le contrôle non destructif des matériaux, notamment avec l'utilisation des ondes de cisaillement.

De nombreux algorithmes de traitement des signaux multiélément, en rupture avec l'échographie conventionnelle, sont développés pour le CND comme pour l'acoustique sous marine et le médical.

Pour l'étude des tissus vivants, l'élastographie transitoire est une technique récente en plein essor<sup>1</sup> qui exploite également les possibilités des multiéléments. Pour ce sujet au coeur de la section 09, il s'agit d'engendrer des ondes de cisaillement au sein des tissus par pression de radiation acoustique, d'observer leur propagation à l'aide des ondes longitudinales en utilisant une technique d'imagerie ultra-rapide, puis par résolution du problème inverse de réaliser des cartes de propriétés élastiques. Les ondes de cisaillement peuvent également être observées par IRM ou par opto-élastographie. Ces méthodes ouvrent de nombreuses perspectives dans l'étude des propriétés viscoélastique des tissus débouchant notamment sur des applications au diagnostic du cancer.

A souligner également, le développement d'autres méthodes mixtes couplant ondes optiques et ondes élastiques :

l'imagerie acousto-optique et l'imagerie photo-acoustique. Enfin, l'imagerie passive par corrélation de bruit semble une piste prometteuse déjà initiée en acoustique sous-marine et en géophysique ; elle est aussi étudiée dans les microsystèmes intégrés pour l'inspection de structures.

L'imagerie, qu'elle soit « tout acoustique » ou couplée « acoustique – optique », est ainsi une thématique majeure de l'acoustique française, en forte évolution et répondant à des besoins sociétaux importants.

### Essais in situ et mesures de champs

Par la réalisation d'essais (micro)mécaniques couplés d'une part aux techniques d'imagerie sus citées et d'autre

part à des méthodes de mesures de champs cinématiques (principalement par corrélation d'images 2D, 3D surfacique ou 3D volumique) et/ou thermiques (thermographie infrarouge) et/ou de déformations élastiques de microstructures (EBSD, DRX, DCT), la mécanique expérimentale des milieux hétérogènes connaît à l'heure actuelle une véritable révolution. Il est important de souligner que cette dernière est en grande partie conduite par les équipes de chercheurs de la section, particulièrement actifs (notamment grâce au GDR CNRS 2519 « mesure de champs et identification en mécanique des solides »). Le positionnement de ces travaux au niveau

<sup>1</sup> Les publications en élastographie ont été multipliées par 10 en 10 ans et la France occupe aujourd'hui la seconde place derrière les USA. Deux start-up (Echosens, Supersonic Imagine) ont été créées en France en relation avec cette thématique.

international est très bon, et les efforts de recherche dans ce secteur doivent être poursuivis et soutenus. En effet, le développement et la diffusion de ces méthodes, qui peuvent parfois faire appel (tendance actuelle, originale et judicieuse) à des méthodes avancées de mécanique numérique (X-FEM par exemple pour analyser les champs de déplacement discontinus) et qui sont en particulier utilisées pour analyser les résultats de l'imagerie 3D citée précédemment, sont pertinents puisqu'ils permettent aujourd'hui :

- de définir de nouvelles stratégies pour le pilotage d'essais mécaniques en vue de reproduire des situations plus proches de l'utilisation finale des matériaux et des structures,
- de concevoir de nouveaux essais permettant l'identification robuste de modèles de comportement et de rupture,
- d'étudier finement et à différentes échelles des mécanismes de déformation dans des systèmes complexes : endommagement et fissuration (céramiques, composites, matériaux du génie civil), bandes de cisaillement (rhéologie des milieux granulaires et suspensions concentrées), plasticité (poly)cristalline, effet Portevin Le Chatelier, transformation de phases et couplages thermomécaniques (alliages métalliques, alliages à mémoire de forme), instabilités (par exemple, flambement de sousstructures architecturées, de tissus vivants)...
- de valider/invalidier des modèles et de revisiter ainsi les concepts des théories usuelles de la thermodynamique des milieux continus, standards ou généralisés, ou bien encore ceux de la mécanique des systèmes discrets.

## MULTI-ECHELLE ET MULTI-PHYSIQUE

Même si les approches multi-échelles et multi-physiques ont été déjà mentionnées à plusieurs reprises dans ce rapport et dans différents secteurs disciplinaires, il convient de souligner qu'un corpus de méthodes propres à ces problématiques s'est développé de manière significative ces dernières années. En particulier, le domaine des régimes non linéaires (plasticité, élastoviscoplasticité, endommagement, couplages thermo-hydrémécaniques, etc.), réputé jusque là ardu et presque hors d'atteinte, de même que l'investigation des très petites échelles connaissent aujourd'hui des avancées remarquables, pour la plupart trans-disciplinaires. Ceci n'a été possible que grâce à la conjonction d'approches expérimentales innovantes, de méthodes théoriques ou variationnelles originales et de méthodes numériques permettant en particulier une analyse fine de l'hétérogénéité des champs mécaniques (Eléments Finis ou Transformée de Fourier Rapide (FFT)).

Parmi les nombreux points qui font l'objet d'efforts remarquables de recherches et qui connaîtront probablement des développements importants dans les prochaines années, on notera :

- la caractérisation expérimentale des couplages multiphysiques : thermomécanique, hydrémécanique, couplages chimiomécaniques (géomatériaux, milieux vivants...), piézoélectricité, magnéto élasticité, etc. Les progrès attendus dans ces domaines proviendront non seulement de développements d'expériences fines adaptées au type de couplage en jeu, mais également de la mise au point de capteurs appropriés et de grande précision. Les méthodes d'imagerie et de mesures de

champs, déjà évoquées, devront également jouer un rôle important dans l'étude de ces phénomènes couplés, par exemple pour caractériser l'évolution de fronts de dissolution lors de couplages mécano-chimiques.

- La prise en compte des non linéarités comportementales des matériaux dans les méthodes de changement d'échelle. Ce domaine de recherche mobilise, à juste titre, de nombreuses équipes dont l'activité scientifique se place au plus haut niveau international. Ceci se traduit notamment par un foisonnement de travaux de modélisations théoriques de qualité, très soutenus par des outils numériques innovants (éléments finis étendus, FFT, techniques de réduction de modèles). Les approches par champs de transformations, le calcul multiéchelle de microstructures ou calculs en champs complets (aussi bien pour des composites que pour des milieux polycristallins) sont des exemples de ces développements. Les récentes modélisations s'appuyant sur des approches incrémentales variationnelles constituent également une voie très prometteuse, indispensable pour investiguer les matériaux hétérogènes dissipatifs dont la modélisation du comportement local nécessite plusieurs potentiels. Un sujet connexe à ces problématiques est la caractérisation et la prise en compte des hétérogénéités des champs intraphase.

- L'étude des phénomènes d'endommagement/fatigue et rupture en Micromécanique des matériaux qui reste encore difficile à aborder, en raison des évolutions complexes de microstructures que cela induit. La formulation de modèles d'endommagement régularisés à l'aide des méthodes d'homogénéisation est souhaitable. Elle pourrait fournir une base précieuse aux différentes modélisations phénoménologiques disponibles.

- La dynamique des dislocations pour la plasticité. Une tendance forte qui semble se dégager dans ce domaine est l'analyse des comportements mécaniques aux très petites échelles ainsi que l'étude des liens entre le discret et le continu en mécanique des matériaux. Ce dernier aspect intéresse également les milieux granulaires.

- La modélisation multiéchelle des couplages multiphysiques, avec des développements importants en géomécanique, mais également en physique et mécanique des polymères. Les simulations de procédés ou de la mise en forme constituent des enjeux scientifiques et industriels majeurs pour lesquels les évolutions microstructurales au cours des procédés doivent être prédites avec précision.

- La prise en compte de la variabilité, en particulier dans les matériaux hétérogènes. A ce titre, les méthodes d'homogénéisation pourraient bénéficier des progrès récents en mécanique stochastique.

- La descente dans les très petites échelles, principalement motivée par l'émergence des matériaux nanostructurés. Elle incite à travailler de plus en plus avec les physiciens et les chimistes. Car de nouveaux concepts doivent être introduits dans les approches multi-échelles pour rendre compte de phénomènes induits par la considération d'objets dont au moins une dimension est nanoscopique (par exemple. effet de taille d'inclusions dans les nanocomposites). On assiste

à un essor de la mécanique des surfaces/interfaces, déjà présente dans les problèmes de tribologie ou même de structures, mais dont l'incorporation dans les approches multi-échelle est un enjeu scientifique de grand intérêt.

## MECANIQUE POUR LE VIVANT

Les recherches en biomécanique, ou plus largement en mécanique pour le vivant, bénéficient du large spectre des compétences théoriques, numériques et expérimentales de la section 09 et ce quelles que soient les échelles spatiotemporelles considérées. Basées sur le développement de nouveaux modèles, méthodes et approches « mécaniques », ces recherches permettent de mieux décrire, comprendre et par suite appréhender la complexité des fonctionnements et des dysfonctionnements de systèmes biologiques humain, animal et végétal.

### Frontières disciplinaires, finalités et objets d'étude

Les relations entre la mécanique et la biologie sont diverses, selon la finalité de la recherche et les frontières disciplinaires associées. L'application pour la santé humaine est largement dominante ; l'objectif est principalement la prévention, le diagnostic et la thérapie des dysfonctionnements. S'y rattache une partie des recherches sur l'animal, que ce soit comme modèle pour l'humain ou pour des applications vétérinaires. Les applications agroalimentaires, agronomiques et forestières concernent autant la croissance et la production que la valorisation.

En amont de ses recherches finalisées et au-delà du clivage animal/végétal, la mécanique peut contribuer à répondre à des questions fondamentales en biologie, qu'il s'agisse du fonctionnement des êtres vivants ou de leur interaction avec l'environnement.

Enfin, l'application à l'ingénierie concerne l'étude des matériaux d'origine biologique soit pour leur utilisation ou leur transformation, soit pour la conception de matériaux ou structures bioinspirés ; à strictement parler on sort du champ de la mécanique pour le vivant, toutefois ce thème s'y rattache par de nombreux aspects.

La section 09 traite autant de questions de mécanique spécifiques des objets vivants que d'ingénierie dédiée. Les objets d'études sont divers, tant par les échelles considérées (du sub-cellulaire à l'individu, voire la population) que par leur nature biologique (animal ou plante, tissu vivant ou mort...). A titre d'exemple, on peut citer la biomécanique des systèmes ostéo articulaire et musculo-squelettique chez l'humain, l'architecture des parois et la biomécanique des arbres dans le monde végétal, la mécanique cellulaire, la mécanique des matériaux biologiques (tissus mous, gels déformables, biopolymères, os, bois).

L'étude de ces objets nécessite des développements spécifiques dans le cadre d'approches typiquement mécaniciennes :

- Lois de comportement mécanique et couplages avec d'autres phénomènes physico-chimiques
- Approches multi-échelles particulièrement pertinentes du fait de la complexité structurelle inhérente au monde vivant

- Interactions fluides-structures, écoulements complexes (sang, sève élaborée...), suspensions concentrées
- Biomécanique des chocs
- Membranes biologiques, coques minces
- Tribologie et propriétés de surface

Par ailleurs, le développement d'approches moins conventionnelles est nécessaire pour la prise en compte de couplages forts entre mécanique et biologie :

- Morphogenèse de tissus, comportement collectif de systèmes cellulaires
- Mécanismes de régulation intégrant perception, transduction et réponse biologique à des sollicitations mécaniques, que ce soit à l'échelle cellulaire (migration, étalement, comportement sous flux), de l'organe (remodelage, cicatrisation), de l'individu (sport chez l'homme, thigmomorphogénèse chez la plante) ou des populations (évolution, adaptation des écosystèmes aux changements climatiques)
- Genèse des forces et des mouvements (cytosquelette, gravitropisme des plantes)

Enfin sur certaines thématiques, les développements nécessitent une contribution forte de l'ingénierie :

- Maîtrise de l'ingénierie cellulaire, tissulaire et osseuse
- Conception de matériaux bio-compatibles, tissus artificiels et biologiques, vieillissement
- Conception de matériaux bio-inspirés (biomimétique)

Les outils utilisés sont très variés : essais mécaniques classiques (traction-compression, ultrasons, ondes), nouvelles techniques (magnéto-rhéologie, nanomécanique, microfluidique, PIV, acoustique picoseconde), méthodes d'imagerie (optique, IRM, RMN, MEB, microscopie confocale et NL, ultrasons, X, RMN, tomographie, élastographie, AFM, spectroscopie Raman), mesures cinématiques (systèmes optoélectroniques, électromagnétiques, mesures de déformations cristallines par diffraction, corrélation d'images). Parmi les nombreux modèles mécaniques et numériques utilisés on peut citer : tenségrité, approches granulaire et discrète, poroélasticité, lois hyperélastiques avec couplages, couplage fluide/structure. Tous ces outils, qu'ils soient expérimentaux et numériques, doivent pouvoir rendre compte de la variabilité, l'hétérogénéité et la complexité structurelle inhérente aux milieux biologiques.

### Situation actuelle

Quelques laboratoires de la section 09 ont des activités de recherche entièrement dédiées à la mécanique pour le vivant. Ils sont structurés autour de cette thématique. Toutefois, il reste assez délicat de faire un état de l'art exhaustif des travaux menés en mécanique pour le vivant dans les autres laboratoires émergeant à la section.

Plusieurs raisons peuvent expliquer ce point mais une des principales est à relier à la structuration des recherches qui restent le plus souvent « éparses » et « isolées » au sein d'équipes ou d'axe transversaux rendant leur lisibilité difficile. D'autre part, cette thématique est par nature multi disciplinaire, et les frontières, 09-10, 09-30 mais également 09-05 pour ses approches physiques de la biomécanique sont bien souvent perméables. Les activités de la section 09 bénéficient, notamment, de trois GDR au sein de l'INSIS:

Biomécanique des fluides et des transferts - Interaction fluide/structure biologique (GDR2760), Approche multi-échelles de la mécanotransduction (GDR 3162), Recherche sur la biomécanique du choc (GDR2610). La mécanique pour le vivant, dans ses aspects liés à l'humain, l'animal et le végétal, est également la thématique de la section 09 qui est à l'interface avec le plus grand nombre d'autres instituts du CNRS (INSB, INP, INEE) et d'autres organismes (Centres hospitaliers et INSERM-CEA/INRIA-Pasteur-Curie-INRA-CIRAD via les alliances AVIESAN et ALLENI,....).

Concernant le positionnement par rapport à l'international, en biomécanique humaine ou animale une trop faible visibilité subsiste en France avec une structuration et une organisation de la communauté qui restent à améliorer. Le déploiement opérationnel d'une politique scientifique de pluridisciplinarité apporterait sans nul doute beaucoup à la mécanique pour le vivant. La situation est un peu différente en biomécanique du végétal, où existe un réseau international « plant biomechanics » très minoritaire dans l'ensemble de la biomécanique mais au sein duquel les laboratoires français sont bien reconnus (réseau constitué depuis 1994 à l'initiative de la France et du CoNRS, avec une conférence tous les 3 ans).

## Recommandations

Parmi les activités prometteuses ou méritant d'être développées, on peut citer :

- les approches multi-échelles que ce soit au niveau de l'os, du bois ou des tissus mous
- les approches multi-physiques : approches mécaniques, physiques, biologiques, chimiques couplées (exemple : aéroacoustique, mécano-transduction, modèle poreux multi phasique, modèle métabolique)
- Caractérisation in vitro mais également in vivo des tissus en tenant compte des spécificités des matériaux vivants notamment en terme de variabilité et d'incertitude. Etude et modélisation de l'évolution in vivo de ces tissus au cours du temps en fonction de paramètres mécaniques, biologiques, chimiques (remodelage, cicatrisation des tissus, vieillissement des tissus, lignification ...)
- Nouvelles approches pour mieux connaître les sollicitations mécaniques s'exerçant chez un sujet vivant (efforts exercés par les muscles, efforts exercés sur les articulations, efforts subis par le système aérien ou racinaire d'un arbre au vent...)
- Nouvelles approches expérimentales autour de la microscopie, l'acoustique et les mesures de champ, combinaison de méthodes
- Développement de biomatériaux en intégrant notamment l'aspect multi échelle et la bio tribologie
- Aller vers une recherche intégrative de la molécule à la cellule, l'organe et l'individu

Il est important de souligner qu'il existe en pratique de très faibles interactions entre les recherches en biomécanique concernant le monde humain (et animal) et le monde végétal. Bien que d'importantes différences existent dans le type de problèmes posés de nombreux points similaires apparaissent et il serait enrichissant de favoriser des interactions. Cela permettrait de promouvoir des approches amont sur des questions d'intérêt commun telles que :

- La mécanique cellulaire avec interaction entre membranes et fluides biologiques
- Les mécanismes de régulation (systèmes nerveux centralisé versus auto organisation d'un système complexe)
- Design mécanique : comment produire de la résistance en compression à partir de tissus conçus pour la traction, quelles sont les solutions optimales pour des matériaux aux fonctions biomécaniques multiples (exemple du bois)
- Méthode d'investigation du vivant : prise en compte des spécificités des objets d'étude biologiques (variabilité, hétérogénéité, complexité structurelle)

Comme cela pourrait être le cas pour d'autres axes de recherches de la section 09, les interactions avec les sections 10, 30 et 05, voire 28 et 29, gagneraient à être développées en complémentarité notamment sur les thématiques micro-fluidiques, milieux poreux multi phasiques, transferts, dynamiques des fluides complexes, ingénierie tissulaire, imagerie biologique, physique de la cellule, propagation des ondes dans les milieux hétérogènes.... Cette complémentarité constructive pourrait notamment s'élaborer autour de recrutements aux interfaces. Il faudrait enfin renforcer les interactions avec les biologistes et les cliniciens, promouvoir les confrontations in vivo avec notamment des modèles animaux.

## ROBOTIQUE

La robotique est une discipline au coeur de l'ingénierie, se situant à la croisée de la mécanique, de l'informatique et de la physique. Cette discipline jeune se renouvelle assez rapidement; elle fait face à des verrous dont la résolution nécessite les compétences présentes dans la communauté mécanique. Il est important d'encourager les ponts entre les laboratoires au coeur de la mécanique et cette discipline, qui ne peut pas être considérée comme une discipline mineure. Historiquement, l'interface avec la communauté mécanicienne s'est établi autour des méthodes liées à la description cinématique et mécanique des systèmes articulés; des recherches gravitent encore autour de ce secteur historique mais il existe aussi quantité de sujets nouveaux où des interactions seraient souhaitables.

Une première gamme de problèmes actuels en robotique à l'interface avec la mécanique concernent la perception, l'action et le mouvement, les capteurs et actionneurs constituant les composants actifs de base d'un robot. Les problèmes mêlent traitement du signal, physique et acoustique (par exemple pour la commande par la parole ou l'écoute binaurale), ainsi que la mécanique du solide. On mentionnera l'exemple du développement récent par des équipes françaises d'un robot marcheur ou roulant dans un environnement glissant, sur glace ou neige, où le contact unilatéral et la possibilité de glissement doivent être modélisés; le système de commande et la coordination des mouvements doivent être conçus en conséquence. Un important effort concerne aussi les drones volants; l'exemple du vol à ailes battues pose des problèmes de modélisation difficiles en dynamique de l'interaction fluides-structures et commande avec prise en compte des incertitudes.

Une deuxième classe de problèmes à l'interface avec la mécanique concerne la conception des robots. Au delà des questions classiques concernant la conception et l'optimisation des systèmes de préhension articulée ou des manipulateurs mobiles, on relève l'émergence de problématiques liées au couplage avec des milieux dont le comportement mécanique est complexe. Ainsi, la mise au point de simulateurs chirurgicaux est un sujet actuel pour lequel il manque encore des simulateurs physiques efficaces, robustes et mécaniquement réalistes donnant la réponse du tissu; une meilleure compréhension du comportement du système musculo-squelettique aiderait la mise au point de robots aidant à la rééducation; une description mécanique fine du contact et des chocs demanderait à être incorporée dans le dimensionnement de robots subissant des impacts avec le sol. Le développement de constituants technologiques tels qu'éléments de structure, actionneurs, capteurs ou articulations fait appel à la science des matériaux et micro-matériaux (fort développement de la nano-robotique).

## TRIBOLOGIE ET INTERFACE

Sur les dernières années et les objectifs affichés par la recherche des laboratoires français, il convient de noter la nécessité d'aller vers une analyse multi-physique et une compréhension accrue du comportement des systèmes complexes aux échelles spatio-temporelles pertinentes pour optimiser leurs performances et/ou prédire leur durée de vie. Les enjeux futurs portent donc sur la résolution de problèmes mécaniques multi-physiques complexes, mettant en jeu différents couplages entre dynamique des systèmes, tribologie, physico-chimie, usures, élastoplasticité, aspects thermomécaniques, avec une vision multi-échelle.

Cela se traduit par des interactions entre les mécanismes locaux et le comportement global des systèmes. Un dimensionnement au plus juste des systèmes passe alors par une compréhension et une modélisation des phénomènes physiques des systèmes aux différentes échelles, ainsi qu'une estimation et identification fines des mécanismes aux interfaces ainsi que des propriétés mécaniques des matériaux, de leurs endommagements sous conditions extrêmes et des couplages thermique-mécanique-microstructures existants.

Enfin, la nécessité de s'orienter vers une prédiction plus robuste et une optimisation du comportement des systèmes impose la prise en compte non seulement des comportements non-linéaires mais aussi des dispersions physiques et incertitudes inhérentes aux systèmes.

### Quelques faits marquants :

- développement de techniques non-linéaire de réduction de modèles aux interfaces en dynamique
- compréhension des mécanismes et des problèmes mécaniques multi-physiques complexes (tribologie, physico-chimie, élasto-plasticité, thermique)
- développement d'outils numériques d'analyse des phénomènes aux différentes échelles (micro/mésomacro)

### Synthèse des axes thématiques et orientations apparaissant prioritaires :

- Compréhension fondamentale des comportements mécaniques aux surfaces et interfaces. Etudes des mécanismes de transformation physique et chimique d'un contact dans différents milieux, du frottement, de l'usure, de la lubrification, des aspects physico-mécaniques, chimie analytique des surfaces, et des effets mécaniques induits.
- Approches numériques en utilisant la dynamique moléculaire afin de comprendre pour prédire les phénomènes physiques, chimiques et mécaniques à l'échelle atomique.
- Développement de techniques numériques avancées pour la prédiction du comportement dynamique des systèmes complexes incluant les non-linéarités liées aux interfaces et la prise en compte des dispersions afin de mettre en évidence la variabilité des réponses des modèles.
- Développement d'outils afin d'aboutir à une identification de paramètres de comportements mécaniques des surfaces et interfaces, linéaires et non-linéaires, aux échelles spatio-temporelles pertinentes.
- Approche couplée itérative et confrontation entre les aspects expérimentaux, de modélisation et de simulation numériques des mécanismes aux interfaces et des phénomènes physiques locaux et globaux associés. Recouvrement des échelles spatio-temporelles.
- Etudes sur les instabilités dans un contact, l'analyse des débits, la rhéologie des matériaux sous sollicitations extrêmes (pression, cisaillement) pour aboutir à des lois de comportement spécifiques.

## ENJEUX COMPLEMENTAIRES DANS LE DOMAINE DES SIMULATIONS NUMERIQUES

Un certain nombre d'enjeux ont déjà été dégagés dans le descriptif des différentes disciplines et thématiques de la

section, certains enjeux complémentaires ou transversaux méritent encore d'être précisés :

- Le temps réel que ce soit sur les aspects numériques que sur la modélisation de la modification de système en temps réel (lien avec le contrôle actif).
- Prise en compte du caractère probabiliste incontournable de certains phénomènes ou de certaines réponses.
- Développement des approches de réduction de modèles: une prise de conscience claire est intervenue ces dernières années : malgré des progrès vertigineux des moyens de simulation numérique, la modélisation de certains systèmes restera hors d'atteinte par des approches de représentation classique, en particulier si des enveloppes de réponses à différents paramètres sont attendues.
- Créer des relations avec la communauté de la « computational graphics ». Cette communauté tend à intégrer de plus en plus de mécanique dans les algorithmes de rendu visuel pour améliorer le réalisme (pour les jeux vidéos, films, réalité virtuelle). Les algorithmes proposés sont souvent très robustes et utilisent au mieux les ressources informatiques actuelles. Même si la qualité visuelle prime sur le contenu strictement mécanique (contrainte par exemple pour fixer les idées), les algorithmes développés

par cette communauté méritent d'être inspectés.

· Prise en compte dans la simulation numérique des spécificités matérielles des ordinateurs. Alors que c'était le cas à la naissance des ordinateurs, leur évolution n'est plus pilotée par le calcul scientifique mais par le jeu ou le multi-media. Il est donc important que les méthodes numériques et leur implantation suivent au mieux l'évolution des solutions matérielles. L'arrivée des cartes GPU en est un exemple.

· La vérification et la validation des modèles numériques dans le domaine du non linéaire et de la dynamique : estimation d'erreur a posteriori des modèles sur les quantités d'intérêt et recalage

## **MULTI-DISCIPLINARITE INTER-SECTION**

La descente dans les échelles plus fines de la matière ou le traitement de phénomènes couplés poussent les recherches de mécanique vers des champs pluridisciplinaires (physique/chimie/biologie...) qui sont riches d'enseignements et de perspectives. Ce potentiel ne saurait toutefois être pleinement exploité que si la frontière se définit bien comme l'interface entre des disciplines solides. La fertilisation croisée entre chercheurs d'horizons différents nécessite l'excellence de chacun dans son propre domaine. En d'autres termes, il convient de ne pas tout mettre aux interfaces mais bien de s'assurer que cet espace sépare bien des domaines dont l'existence ne serait pas qu'un simple souvenir.

Il est capital de continuer à maintenir l'excellence des thématiques au coeur de la section (certes en les faisant évoluer en lien avec les nécessités de l'inter-disciplinarité). Ce maintien est le gage d'une qualité d'interaction présente et future avec les autres disciplines.

Pour alimenter les recherches à caractère multidisciplinaire sans risquer une dilution trop importante des forces vitales, on ne saurait que trop recommander de le faire dans le cadre d'une démarche intégrée dont les implications sociétales, industrielles, économiques et écologiques sont à la hauteur des grands enjeux nationaux.

## **SYNERGIE DE COMPETENCES A L'INTERIEUR DE LA SECTION**

La section couvre des chercheurs manipulant des outils et méthodologies assez variées (on ne parle pas ici de différentes thématiques mais plutôt de différentes manières d'appréhender une problématique : mécanique théorique avec une dose plus ou moins grande de mathématique, démarche d'explication de phénomène «à la physicienne», mise en oeuvre de connaissances dans des réalisations concrètes, modélisation de système, génération de connaissances via l'expérimentation, développement de nouvelles méthodes numériques, ...

Avec la complexité grandissante des systèmes adressés, chaque approche prise individuellement se trouve très vite limitée. Un renforcement de l'interaction entre ces démarches est important. En particulier, la mécanique théorique mériterait d'être renforcée dans cet esprit d'interaction. De même les initiatives visant à regrouper au

sein d'une même équipe d'un laboratoire expérimentateurs et numériciens méritent d'être saluées et soutenues.

## **ASPECTS SOCIETAUX et RELATIONS AVEC L'INDUSTRIE**

La très grande majorité des laboratoires rattachés à la section ont des relations contractuelles avec l'industrie. Ceci n'est pas surprenant compte tenu du positionnement de la section à la fois sur la génération de connaissances de base, que dans la démarche de mise en oeuvre de ces connaissances dans des réalisations concrètes. Il faut cependant insister sur la qualité actuelle de ces relations. Elles sont souvent de longue durée (cadre CIFRE par exemple) et bien souvent pérennes (parfois courant sur plusieurs décennies). Les travaux réalisés sont le plus souvent un mixage de génération de connaissance et de mise en oeuvre. Le rôle du CNRS dans l'équilibre des relations entre laboratoires et industriels doit être salué que ce soit d'un point de vue contractuel via les nombreux contrats cadres mis en place que via la « surveillance » scientifique des travaux réalisés. Cet équilibre est une chance pour la recherche française et l'industrie française et doit être préservé. La France a réellement une position originale sur cette question (dans de nombreux pays, les relations sont soit beaucoup moins présentes soit très axées sur du service et/ou du très court terme).

Cette position originale devrait servir de levier pour aider au maintien des emplois de production en France en innovant sur les procédés de fabrication avec une vision durable et de préservation de l'environnement :

- réduction des utilisations énergétiques
- possibilité de transformer et assembler de nouveaux matériaux (composites, bois, fibre végétale, ...).
- nouvelles technologies de production liées au recyclage: (40% des aciers produits en France sont déjà basés sur l'acier recyclé, de même le béton ou les matériaux plastiques sont réutilisés). La réutilisation optimale des matériaux est un enjeu très important de la recherche actuelle. En clair comment déconstruire (rupture à différentes échelles : chimique ou à plus grande échelle) et reconstruire (réassemblage des matériaux).

### **Pôle de compétitivité et PME**

Si les relations laboratoires / industrie sont à saluer pour leur vigueur, il n'est pas de même pour les relations laboratoires / PME. Les raisons sont complexes. Il faut noter qu'il y a une opportunité nouvelle de mise en relation des PME et laboratoires de recherche via les pôles de compétitivité qui font maintenant partie du paysage comme nouvel acteur dans l'organisation de la recherche.

### **Mise en relation des industriels via les laboratoires**

Les approches génériques développées dans les laboratoires relevant de la section permettent des applications multiples et les chercheurs impliqués participent à la diffusion des technologies d'un domaine à un domaine connexe.

Les pièces tournantes conduisent par exemple à beaucoup de préoccupations similaires que ce soit pour les turbines

de centrale électrique que pour les réacteurs d'avion. De même l'analyse numérique de pièces géométriquement complexes touche à la fois l'automobile et l'aéronautique. Un dernier exemple est la similitude des mécanismes entre bandes de cisaillement dans les matériaux et les failles géologiques dans le sol. En conclusion, la section participe à la création de connaissances et à leur mise en oeuvre pour de nombreuses industries différentes. Dans ce domaine les chercheurs de la section jouent le rôle de médiateur entre industriels sur des produits non concurrents mais qui requièrent des outils proches.

### **Sécurité des personnes et des biens**

La construction des bases scientifiques des outils de gestion de durée de vie des installations industrielles et de génie civil est un enjeu important. Non seulement il est question de protéger les personnes et les biens mais la dégradation écologique liée à un incident est à juste titre devenue intolérable. L'explosion de la plateforme BP dans le golfe du Mexique en est un exemple suffisant.

La construction des bases scientifiques des outils de gestion de durée de vie implique des recherches dans de nombreux axes de la section dont l'amélioration des techniques de contrôle non destructif, l'amélioration des outils de simulation et la prise en compte d'approche probabiliste dans ces outils.

### **Préservation du patrimoine**

Dans le domaine de la préservation du patrimoine, la section joue un rôle important dans la lutte contre le vieillissement des oeuvres d'art, bâtiments de tout type. Cette activité va certainement se renforcer dans le futur avec la prise de conscience de la valeur économique de la culture dans de nombreux pays.

### **Santé et vieillissement**

La «Mécanique pour le vivant» est, par nature, au coeur d'enjeux sociétaux et industriels importants et d'autant plus avérés si l'on considère par exemple : le vieillissement de la population, la réduction des utilisations énergétiques, l'augmentation de la pollution, l'augmentation de l'obésité...

Quelques exemples de travaux à impact sociétal direct sont :

- la possibilité de transformer et d'assembler de nouveaux matériaux (composites, bois, fibre végétale, ...)
- l'innovation nécessaire pour utiliser le bois de moins bonne qualité
- l'utilisation de la mécanique/acoustique dans le diagnostic de pathologies liées aux systèmes cérébral, auditif, cardio vasculaire, osteo articulaire, respiratoire...
- la conception de biomatériaux durables de remplacement
- l'étude de l'impact sur la santé de nanoparticules impliquées dans les matériaux nanostructurés.