

09

MÉCANIQUE GÉNIE DES MATÉRIAUX ACOUSTIQUE

MICHEL JEAN

Président de la section

MARCEL BERVEILLER

Rapporteur

Pierre Alart

Jean-Pierre Amirault

Didier Baptiste

Anne-Sophie Bonnet-Bendhia

Charles Deleglise

Marc Deschamps

Gilbert Fantozzi

Bernard Halphen

Jean Hardy

Philippe Kapsa

Jean-Claude Lachat

Jean-Paul Lallemand

Jean-Pierre Lefebvre

Gérard Maugin

Péricles Meneses

Paul Parniere

Jean-Marc Pelletier

Jean-Claude Risset

Michel Suery

INTRODUCTION

Les disciplines de la section 09 ont toujours suscité l'intérêt des savants qui s'efforcent de comprendre les lois régissant les systèmes matériels et les ingénieurs qui conçoivent des machines et des ouvrages. La section 09 s'intéresse aux solides, du point de vue de leur mise en forme, de leur tenue aux chargements et aux contraintes d'environnement. L'acoustique occupe une large part dans tous ces aspects, comportement vibratoire, bruit rayonné, signaux, perception et musicalité. Le champ d'investigation comprend les matériaux traditionnels de grande diffusion aussi bien que matériaux nouveaux, aciers, alliages divers, bois, céramiques, composites, bétons fibrés, alliages à mémoire de forme, tissus vivants, et se prolonge à des matériaux parfois solides, parfois fluides, tels les polymères ou les sols. Enfin, notre section s'intéresse aux structures, poutres, ponts, bâtiments, véhicules, avions, mécanismes, machines, robots, et au contrôle de ces structures et des bruits émis, par absorption d'énergie ou par contrôle actif, c'est-à-dire par pilotage des sources d'énergie. Il est naturel que les travaux des mécaniciens suscitent l'intérêt des disciplines voisines comme la géologie ou l'électronique, l'électromagnétisme, l'électrotechnique, où la fiabilité des composants est requise.

La modélisation s'accompagne d'une double démarche intellectuelle. D'une part, le secteur

industriel est confronté à des problèmes de conception, de mise au point, d'optimisation, de mise sur le marché dans les meilleurs délais, de produits finis, puis à la fiabilité, au contrôle non destructif, à la maîtrise des nuisances. D'autre part, le mécanicien sait identifier un problème posé et le réduire à un problème simplifié porteur des difficultés principales. Pour en faire une description complète, il peut être amené à créer des concepts, notion de fatigue, de rupture, interactions entre grains de matière à l'échelle microscopique ou nanoscopique, comportement d'une collection de grains à une échelle plus grande, modes de vibration, diverses typologies de signaux, etc. L'identification de ce modèle, c'est-à-dire l'attribution de valeurs numériques représentant les propriétés mécaniques, se fait au moyen de campagnes d'essais sur des éprouvettes ou des maquettes, voire en résolvant un complexe problème inverse, faisant appel à des techniques d'optimisation classiques ou récentes, apprentissage, algorithmes génétiques. Le comportement du modèle est ensuite étudié par diverses méthodes mathématiques ou numériques. Reste à vérifier si les prédictions du modèle sont conformes au comportement réel.

Il existe ainsi une interaction permanente entre, d'une part, le réalisme et la motivation apportés par les problèmes pratiques et, d'autre part, l'abstraction et l'inventivité exercées pour construire des outils intellectuels aptes à résoudre ces problèmes pratiques.

Il est donc normal que la totalité des laboratoires relevant de la section entretiennent des relations scientifiques et contractuelles avec le secteur socio-économique, tout en veillant à l'indépendance de leur démarche intellectuelle.

De l'exposé relativement détaillé qui suit, mais qui ne rend pas toujours justice à la richesse des recherches entreprises ou futures, on retiendra quelques éléments qui reflètent des tendances pour l'avenir proche. Tout d'abord, dans la démarche décrite plus haut, l'interactivité avec des sciences connexes (mathématiques appliquées, informatique, théorie du signal, métallurgie, physique des matériaux, etc) est une évidence dans des développements qui s'accompagnent de calculs prédictifs et une modélisation de plus en plus fine et réaliste.

L'activité résultante est marquée par la production de concepts radicalement nouveaux, de méthodes de résolution, d'algorithmes, de logiciels, d'instrumentations. Ainsi les notions de microstructure et de mésostructure, et les effets d'interaction fortement non linéaires et couplés, peuvent maintenant être pris en compte, donnant naissance à des écoles de pensée, telles que "mécanique des matériaux", "mécanique du contact", "acoustique non linéaire"...

Comme soulignés dans différentes parties du rapport, des efforts sont à faire si l'on veut conserver ou conquérir une place honorable en recherches appliquées et, en retour, dans le développement des industries de pointe correspondantes. Les aspects que l'on souhaite mettre en relief sont :

- le développement des matériaux nouveaux, une meilleure optimisation des matériaux traditionnels et des technologies de mise en forme associée,
- les efforts dans le sens d'une approche physique plus fine et d'une analyse des signaux et d'images en relation avec le précédent,
- le développement des méthodes inverses d'identification géométrique ou constitutive,
- la miniaturisation physique des instruments ou réalisations (capteurs, robotique, microtechnique),
- l'explosion en taille des calculs numériques et la diminution des temps de calcul,
- la prise en compte du facteur humain,
- bien que CNRS, Universités, Grandes Écoles, aient déjà fait un effort remarquable de coopération, la création d'unités dans un cadre européen.

1 - COMPORTEMENTS PHYSICO-MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX ET STRUCTURES

Avec (1) la mise au point de matériaux artificiels de type composite, à gradient de fonction, exhibant des comportements physico-mécaniques couplés, qui présentent des caractéristiques définies à l'avance, (2) la mise au point de méthodes nouvelles de calculs de propriétés effectives (homogé-

néisation de différents types, passage “micro-macro” effectué de manière raisonnée), (3) la puissance nouvelle de traitement de l’information et des outils de simulation, (4) l’emploi de matériaux nouveaux dans un environnement qui nécessite de connaître et prévoir leur comportement dans des gammes étendues de variation de paramètres physiques jusqu’ici inattendues, et (5) la mise au point de nouveaux dispositifs, grandeurs nature, ou nanosystèmes, qui font appel à des couplages mécaniques physiques, la “micromécanique” a acquis une nouvelle dimension qu’il était difficile de prévoir auparavant.

Cette dimension, elle l’acquiert d’autant plus qu’elle est intimement liée aussi bien au progrès de la connaissance en science des matériaux, des procédés de préparation et de fabrication, qu’au développement de techniques mathématiques nouvelles, fines, analytiques ou autres, tout en touchant une gamme de matériaux jusqu’ici inusitée, allant des alliages métalliques (problèmes de microstructure, d’effets d’échelle), à mémoire de forme (comportement thermo-mécanique prépondérant), aux matériaux électro- et magnéto-mécaniques (piézoélectriques, ferroélectriques, magnétoélectriques, à magnétostriction “géante”, supraconducteurs à haute température) et même au bois dont la complexité du comportement est évidente. Cette variété et cette richesse offrent un défi que les mécaniciens semblent avoir relevé avec plus d’enthousiasme, de conviction et de savoir-faire que les scientifiques et ingénieurs d’horizons différents. Cela est vraisemblablement dû à la formation souvent polyvalente des intéressés et la proximité qu’ils ont des enjeux réels de la société industrielle à travers leurs contacts contractuels. Ils y font preuve à la fois de plus d’intérêt et de pragmatisme, tout en apportant une approche plus raisonnée que d’autres, un “reliquat” de la mécanique rationnelle et de la qualité de formation dans les grandes écoles françaises. Ceci est particulièrement vrai dans le contexte français où une symbiose réelle mécanique-matériaux-structures semble s’être réalisée, en tout cas à un plus fort degré que dans d’autres pays développés tels que la Grande-Bretagne, l’Allemagne et les États-Unis. La symbiose résultante est enrichissante à divers titres, toujours réciproque entre sciences connexes (mécanique-physique, mécanique-mathématiques appliquées).

Elle est marquée par un déplacement de thématiques caractérisé par une interdisciplinarité réelle, des développements inattendus de la connaissance physico-mathématique, et un intérêt profond pour le rôle de la modélisation visant ultimement à une bonne prévision du comportement des structures dans des conditions d’utilisation spécifique, et à la conception de nouveaux moyens d’instrumentation où l’agent “physique” ou “chimique” sert d’intermédiaire dans la mesure mécanique et réciproquement. On voit donc se développer des applications technologiques où l’exploitation multiforme des effets mécaniques complexes purs ou couplés joue un rôle essentiel.

Plus scientifiquement, une connaissance plus fine des matériaux, de leurs microstructures et les effets d’échelle incontournables associés, des effets non linéaires qui s’y développent sous des formes variées et quelque peu imprévisibles, en particulier les problèmes de transformation de phase et de stabilité, des propriétés de “contrôle” de structures, de dimensionnement de ces dernières dans des conditions ultimes (accommodation, ruine, apprentissage, “intelligence”), une nouvelle vision adaptée aux nanostructures et mécanismes, marquée par une forte interaction avec la robotique, sont les points forts d’une recherche à multiples facettes qu’il est parfois difficile d’appréhender dans son ensemble et sa rationalité sous-jacente. En général, on peut néanmoins constater un renouveau fructueux d’une science, la “phénoménologie macroscopique” – mais maintenant appuyée sur des bases thermomécaniques solides et enrichie d’une vision plus fine, micro- ou méso-scopique – que beaucoup, parmi les physiciens et les ingénieurs, croyaient achevée à l’aube de la première guerre mondiale.

La conclusion s’impose d’elle-même : aucun outil expérimental, mathématique ou de simulation numérique, même une vision systémique, n’est à négliger dans cette quête qui conditionnera en partie les développements technologiques du XXI^e siècle, et la recherche et le développement en sciences mécaniques en France : il faut, sans esprit de chapelle, prendre les méthodes les plus efficaces et les connaissances les plus adéquates là où elles sont, tout en ne sacrifiant rien de la raison. L’interdisciplinarité, le savoir-faire et les connaissances requis nécessitent la mise en place d’un ensemble

de masse critique suffisante et de haute qualité, soit par concertation (largement réalisée par des colloques et rencontres informelles et de nouvelles revues scientifiques adaptées à ces nouveaux aspects) des acteurs déjà présents, soit peut-être avec la création de centres d'excellence cultivant plus particulièrement cet aspect interdisciplinaire. Dans le cadre qui nous concerne, c'est l'Europe qui offre un cadre naturel à de telles investigations, avec des contacts informatifs ou co-opératifs, mais certainement plus épisodiques ou ponctuels – malgré les moyens rapides de communication – avec l'Amérique du Nord, la Russie et l'Ukraine, et l'Extrême-Orient.

2 - CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES

Le contrôle non destructif (CND) des matériaux et des structures se situe dans le cadre général de l'amélioration de la **qualité** (lors de l'élaboration) et de la **sécurité** (lors de la tenue en service) et concerne donc des domaines très diversifiés. Si, au départ, son essor est venu des besoins de l'aéronautique et de l'industrie nucléaire, à l'heure actuelle, c'est une nécessité dans tous les secteurs. Citons par exemple la construction automobile ou la surveillance des grands ouvrages, qu'il s'agisse de ponts, de barrages, de centrales nucléaires, d'installations de raffinerie, ...

Au départ nécessité technique, le CND a très rapidement fait appel à des disciplines scientifiques les plus variées, depuis la physique du solide (ferromagnétisme, interactions ondes électromagnétiques/matière, ...), l'acoustique, le traitement du signal (notamment avec toute la thématique relative aux problèmes inverses), la physique des capteurs, les effets biologiques des radiations, ...

2. 1 LES GRANDS TYPES DE CND

- Le contrôle et la tomographie ultrasonore. Ce domaine, très large, puisqu'il touche aussi bien les matériaux que les structures ou le monde médical, se heurte à divers problèmes : l'un technique : la maîtrise des capteurs ; l'autre scientifique : l'identification des sources et des obstacles, relevant de la thématique "problèmes inverses" et avec tout l'aspect traitement numérique des signaux. L'apport de l'informatique dans ce domaine est essentiel.

- Les contrôles par courants de Foucault (et plus généralement par des méthodes électriques). Cette méthode, qui concerne plus spécifiquement la métallurgie, doit voir des progrès dans deux domaines : la miniaturisation des capteurs et l'étude détaillée des effets de la fréquence.

- Les contrôles par rayonnements ionisants (rayons X, gamma, ...). Ce type de contrôle, qui s'applique dans tous les domaines, pose en outre des problèmes de sécurité. Comme développements importants, rendus possibles tant par l'amélioration des sources de rayonnement (puissance, stabilité, finesse), que par la technique de traitement numérique du signal, on peut s'attendre à voir s'amplifier les aspects tomographiques avec, donc, comme pour le contrôle par ultrasons, un aspect tridimensionnel de plus en plus marqué.

- La diffraction des rayons X (ou des neutrons). En plus de l'aspect identification des phases, un domaine essentiel pour la mécanique relève de cette technique : la détermination des contraintes résiduelles résultant d'un traitement thermomécanique quelconque. Si, dans le cas des matériaux homogènes, les résultats sont assez facilement interprétables, de nombreux problèmes demeurent dans le cas des matériaux hétérogènes ou des multimatériaux. La modélisation nécessite une connaissance des paramètres mécaniques et thermophysiques des différentes phases en présence, connaissance très incomplète actuellement. Un effort tant expérimental que de modélisation est donc requis pour maîtriser la qualité des matériaux et des structures.

- Les techniques optiques (microscopie à effet de champ, à effet tunnel, ...).

À la limite du contrôle non destructif, ces méthodes sont destinées plus aux matériaux eux-mêmes qu'aux structures et à une analyse fine des microstructures.

Des progrès sont à faire dans le secteur de la résolution, du traitement d'images et concernent plus spécialement les matériaux céramiques, polymères et composites. Ce type d'étude est indispensable notamment pour toutes les approches tribologiques.

2. 2 LES THÈMES À DÉVELOPPER

Schématiquement, nous pouvons distinguer quatre domaines différents nécessitant des efforts importants.

- La miniaturisation des capteurs ; ceci requiert un gros effort d'instrumentation (mécanique, électronique, informatique, ...) et rejoint la thématique microcapteurs, avec par exemple l'élaboration de microcapteurs de pression (préhension tactile) et doit permettre une extension plus facile vers le contrôle non destructif sur site, en conditions réelles. (exemple : appareillage de détermination des contraintes résiduelles). L'aspect développement de matériaux pour capteurs est d'actualité : matériaux piézoélectriques, ferroélectriques, avec une extension vers les matériaux ou les systèmes intelligents.

- Une analyse physique des phénomènes responsables des signaux ; une analyse physique des effets produits par une source donnée reste à faire ; en plus de cette analyse directe, il reste un gros problème d'identification des sources et des obstacles qui nécessite aussi bien une modélisation analytique qu'une simulation numérique, souvent lourde (3D).

- Le traitement de l'information devant conduire à l'élaboration de bases de données et de systèmes experts destinés, par exemple, aux bureaux d'étude.

- La détermination de la nocivité d'un défaut donné pour une application donnée doit être effec-

tuée ; quels sont les paramètres pertinents : étendue spatiale, concentration, répartition, ... ? Quelle en est l'influence sur le comportement de la pièce ?...

Deux aspects peuvent servir de conclusion. La présence française, si elle est bonne dans le domaine scientifique, est en revanche faible dans le domaine de l'instrumentation. L'approche scientifique est très pluridisciplinaire ; le Département SPI du CNRS est donc particulièrement bien adapté pour créer une synergie entre disciplines diverses telles que physique, mécanique, électronique, acoustique, matériaux, ...

3 - IMPACT DU PROGRÈS DU CALCUL NUMÉRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE INDUSTRIELLE SUR LA MÉCANIQUE - CALCUL DES STRUCTURES, DES PROCÉDÉS

La pertinence de ce thème de réflexions tient à l'émergence, dans les vingt dernières années, de deux phénomènes scientifiques et technologiques concomitants : la **généralisation des approches numériques** pour la résolution de problèmes de mécanique et plus généralement de la physique, **l'évolution extrêmement rapide des moyens informatiques**.

Dans une large mesure, cette deuxième donnée fut déterminante pour le développement du calcul numérique. L'informatique a vu le jour pendant la seconde guerre mondiale, mais ce n'est qu'au cours des années cinquante qu'elle a quitté le domaine strictement militaire. L'accès à l'informatique, qui a divisé la communauté scientifique dans cette période de "guerre froide", permet, en comparant les travaux publiés à l'Est et à l'Ouest pendant les trente dernières années, d'évaluer

l'influence de l'informatique sur la recherche dans tous les domaines.

L'informatique a d'abord eu un impact sur l'**ingénierie mécanique**, qui a trouvé dans les moyens de calcul qu'elle permettait la possibilité de limiter le recours à la réalisation longue et coûteuse de prototypes. Le **calcul des structures** a vu le jour dans les années soixante, en même temps que la méthode des éléments finis dont elle est pratiquement indissociable. Mettant à profit la simplicité imposée par la programmation, cette composante de la mécanique des solides a connu un essor considérable, et a suscité l'émergence de méthodes numériques adaptées aux potentialités en permanente évolution des calculateurs. Ainsi, les méthodes de type gradient conjugué doivent beaucoup aux calculateurs vectoriels. Cette évolution se poursuit aujourd'hui avec les possibilités offertes par les *calculateurs parallèles*. Les méthodes de *décomposition de domaines* sans recouvrement semblent émerger dans le cadre d'un parallélisme "à gros grains" (une centaine de processeurs). On peut alors envisager la résolution de problèmes comportant 10^6 degrés de liberté. Mais l'exploitation optimale du parallélisme nécessitera sans doute de revoir la structure des codes et même l'écriture des modèles.

Le développement du calcul scientifique finit même par influencer la **science mécanique** en ce sens qu'il peut modifier les démarches scientifiques traditionnelles. Le calcul ne se contente plus de se substituer aux expériences dans le prédimensionnement des structures par exemple. Le schéma classique expériences (détermination de paramètres) suivies de calculs (après introduction des paramètres dans le modèle) peut s'en trouver inversé. Des calculs sont le plus souvent effectués préalablement aux expériences ; ils offrent une première analyse comparative d'une grande variété de situations et permettent ensuite de préciser les essais rigoureusement indispensables à l'établissement d'un modèle. En conséquence, la formation par la recherche des mécaniciens même non numériques doit aujourd'hui contenir une **formation aux techniques numériques**. Ceci est indispensable afin que puisse commencer le véritable travail du mécanicien : l'interprétation des résultats issus du calcul, tâche qui tend de plus en plus à se substi-

tuer au dépouillement d'une série d'essais. Cette étape prend d'autant plus d'importance pour la rigueur des conclusions scientifiques aujourd'hui que les problèmes abordés sont plus complexes et la signification des résultats plus difficiles à déterminer. Une autre justification de la formation aux techniques numériques tient à l'importance de l'**instrumentation informatique** sur les montages expérimentaux allant du pilotage au traitement des résultats qui finit par constituer de plus en plus un filtre entre les résultats bruts et leur interprétation.

En ce qui concerne la section 09, l'impact de l'informatique ne se limite pas à la mécanique dite parfois "computationnelle", mais s'étend depuis quelques années à la **science des matériaux**. Ainsi les simulations à l'échelle de la microstructure en métallurgie, ou simulations mésoscopiques, permettent aujourd'hui de réaliser un lien effectif entre les mécanismes élémentaires de mobilité et d'interaction des défauts (dislocations, systèmes de glissement, joints de grains), qui sont relativement bien connus, et les morphologies et distributions globales qui en résultent. Les différents domaines de la métallurgie physique (précipitation, recristallisation, plasticité, propagation et interactions des fissures) sont à revisiter. Ces simulations devraient bénéficier du développement des *calculateurs massivement parallèles* (parallélisme à "petits grains") auxquelles elles sont particulièrement bien adaptées.

Les moyens informatiques mis à disposition croissant, des problèmes de plus en plus complexes sont abordés numériquement. Ces problèmes sont **non linéaires** (grandes déformations, problèmes couplés), **non réguliers** (fissuration, localisation, contact, frottement), **mal posés** (contrôle, identification de paramètres), **posés en domaine non borné** (acoustique, vibroacoustique, géophysique).

Si la simulation numérique est susceptible de fournir des résultats dans des situations complexes, il ne faut pas oublier que ces problèmes sont en général très **sensibles aux perturbations** issues soit des données, soit de la discrétisation. Il faut donc accompagner l'approche numérique d'une analyse théorique (mathématique et mécanique) du problème pour dégager les pièges à éviter. Un tel effort est d'ailleurs incontournable dans certains domaines où une discrétisation standard n'est pas

envisageable (en acoustique, par exemple, lorsque le rapport entre un paramètre physique et la longueur d'onde est très petit ou très grand). De ce point de vue, la recherche française a su, de tous temps, conjuguer études théoriques et appliquées, outils mathématiques et numériques. Un bel exemple de ce compromis est fourni par l'homogénéisation périodique ou les méthodes asymptotiques-numériques. Par contre, nous utilisons peu les codes de calcul formel dans lesquels, par contre, les chercheurs russes ont vu un moyen de prolonger et d'étendre leurs travaux.

Les mécaniciens du solide doivent garder une attention particulière envers le **calcul des variations**, domaine des mathématiques largement inspiré par la mécanique. Or des progrès substantiels ont été réalisés ces quinze dernières années : notions dépassant la convexité (quasi-, poly-, rang1-) pour les densités d'énergie de déformation en élasticité non linéaire, écriture d'équations macroscopiques à partir des liens entre convergence faible et grandeurs macroscopiques (homogénéisation), mesures de Young et compacité par compensation pour l'étude des transitions de phases dans les solides cristallins dont les densités présentent naturellement des puits de potentiel, espaces de champs dont le gradient est une mesure bornée adaptés à l'étude de grandes déformations "élastiques" où apparaissent cavitation, fissuration, endommagement... On peut remarquer, en ce domaine, le faible développement de méthodes numériques originales s'y référant.

Les problèmes d'origine industrielle sont de **grande taille** (nombre de degrés de liberté) et **fortement couplés** (mécanique, thermique, fluide-structure, acoustique, matériaux).

Si la simulation numérique a permis de traiter certains procédés de fabrication, elle est encore en échec quand il s'agit de **processus complexes** (embouti profond ou extrusion en filière par exemple) ou de **systèmes de production** intégrés. Si le parallélisme des calculateurs de nouvelle génération peut apporter une réponse, il nécessitera d'avancer simultanément sur les matériaux pour enrichir les lois de comportement afin d'adapter les modèles théoriques.

La demande industrielle à venir devrait s'accroître en terme d'ingénierie simultanée et d'intégration dans les systèmes de production de l'entreprise. Ce qui va exiger un transfert de savoir-faire multi-forme où l'on devra être capable de faire coopérer différents experts et d'utiliser au maximum les outils (théoriques, mathématiques, logiciels) disponibles dans la communauté scientifique. Les réseaux de laboratoires, d'équipes, les ateliers de génie logiciel devraient se développer dans ce cadre et assurer un **effort de normalisation**. Le recours aux systèmes experts, et plus généralement à l'**intelligence artificielle**, constitue une autre réponse à développer.

Un dernier point de conjoncture internationale concerne l'hégémonie des constructeurs informatiques dont les stratégies industrielles peuvent conditionner les recherches menées dans le calcul en mécanique. Nous ne sommes pas maîtres de ces stratégies qui peuvent condamner certaines recherches menées sur un matériel spécifique. Or il est souvent difficile de distinguer, parmi les technologies naissantes, celles qui perdureront. Cette interrogation ne peut être écartée au moment où une forte attente se manifeste vis-à-vis du calcul parallèle.

4 - LES PROCÉDÉS MÉCANIQUES ET LEUR ENVIRONNEMENT

Les trois facteurs principaux qui pilotent les évolutions scientifiques et techniques du domaine sont : une augmentation rapide de la diversité des matériaux et des procédés de transformation et de mise en œuvre utilisés avec une part de plus en plus grande des matériaux de synthèse : plastiques et composites à matrice organique ; la généralisation des processus de conception intégrée ; la généralisation de l'utilisation des techniques de CFAO et le rôle croissant de la modélisation-simulation des procédés et systèmes.

Dans le cas des matériaux métalliques, on peut noter :

- Des progrès importants dans le domaine de la modélisation des procédés de fonderie au travers de la prise en compte des couplages : écoulement-thermique – transformation de phase – mécanique, ce qui permet de réaliser des pièces avec des parois de plus en plus minces et l'émergence de nouveaux procédés de mise en forme à l'état semi-solide.

- Une évolution marquée vers le "near net shape" en premier lieu au travers du forgeage de précision, mais aussi des progrès de la métallurgie des poudres.

- L'utilisation des composites à matrice métallique progresse peu dans la mécanique, de nombreux problèmes restant à résoudre : usinabilité, résistance à la corrosion, intégration à la coulée...

- L'émergence de l'usinage à grande vitesse est un fait, en premier lieu en raison de la maîtrise du fonctionnement des moteurs, mais aussi des progrès des matériaux d'outillage et d'une meilleure connaissance de la formation des copeaux. Il n'en reste pas moins que l'usinage est un domaine où il y a encore beaucoup de connaissances à obtenir sur l'endommagement associé, les phénomènes d'usure des outils et les conditions thermomécaniques du contact outil-pièce afin d'arriver à une modélisation fiable. Certaines technologies d'usinage telles que la rectification sont insuffisamment étudiées.

Les techniques d'usinage assistées par laser sont prometteuses.

- La maîtrise des traitements thermiques et/ou de surface, vaste champ scientifique et technologique, doit progresser en vue d'accélérer les traitements dans la masse (basses pressions, plasmas...), et de généraliser les traitements en ligne de production.

La situation des matériaux plastiques et surtout des composites à matrice organique est plus préoccupante :

- Ces matériaux n'ont pas – pour l'essentiel – fait l'objet d'actions scientifiques concertées

(GRECO-GIS). La maîtrise de leur utilisation et de leur mise en forme va nécessiter de gros efforts de R & D qui devront s'opérer par un rééquilibrage des recherches entre matériaux métalliques et matériaux organiques.

- Aujourd'hui, pour les matériaux composites, on ne dispose pas de modélisation fiable pour la plupart des procédés de mise en forme. L'optimisation mise en forme - propriétés de la pièce finie est essentiellement empirique.

- Les problèmes couplés avec les différentes formes de vieillissement restent à étudier pour les matériaux de grande diffusion.

- Les procédés d'assemblage de "multimatériaux" et, en premier lieu, le collage ne sont pas maîtrisés industriellement.

Suite au GRECO "grandes déformations" et aux GIS associés, la communauté française de recherche est bien structurée (Mecatmat). Dans le cas des matériaux organiques des liens plus forts restent à créer avec d'autres spécialistes (chimie, physique des rayonnements).

Les liens avec l'industrie sont forts et dans l'ensemble satisfaisants, en particulier avec les grandes entreprises du secteur.

Une nouvelle impulsion type GIS-GRECO serait à donner pour avancer vite sur les matériaux composites à matrice organique de grande diffusion qui présentent un enjeu majeur compte tenu des nécessités d'allègement et de réduction des coûts dans tous les domaines industriels.

5 - LES MATÉRIAUX ET STRUCTURES MULTIFONCTIONNELS

5. 1 VIBROACOUSTIQUE

La vibroacoustique s'intéresse aux interactions acoustique aérienne - vibrations de structure, l'une pouvant être la cause et l'autre l'effet, dans le but principal de réduire les nuisances sonores

Si le bruit aérien, supposé imposé, est la source, le problème typique est celui de la source et d'un récepteur séparés par une paroi excitée en vibration par la source elle-même devenant source solidienne de bruit pour le récepteur. On cherche à agir sur la paroi pour réduire le bruit transmis vers le récepteur, soit par un choix adéquat de matériau (approche passive), soit par contrôle actif de la structure vibrante. Si la vibration de structure est la source (bruit de contacts mécaniques dans les machines), on a affaire à une source solidienne que l'on cherche à réduire par la maîtrise des conditions de fonctionnement.

Les enjeux économiques et sociaux sont très importants dans les sociétés occidentales : d'une part les normes de protection des individus en matière de bruit sont de plus en plus exigeantes, et, d'autre part, toute amélioration de confort acoustique est un argument de vente pour un constructeur. D'autres facteurs, telle la discrétion acoustique, peuvent, dans le domaine militaire, être primordiaux. Il n'est pas étonnant de trouver, dans le GDR Vibroacoustique, les industriels du transport automobile, ferroviaire et aérien, le ministère de l'environnement, les militaires.

Les enjeux scientifiques sont à la hauteur des enjeux précédents. Il s'agit de développer des matériaux absorbants sur une large bande de fréquence, matériaux sandwichs, matériaux poreux... L'étude de leur caractéristique vis-à-vis de la propagation acoustique nécessite des modèles complexes de propagation en milieu hétérogène, à

géométrie complexe... et les expérimentations appropriées. Le contrôle actif, mettant en œuvre capteurs et actionneurs piézo-électriques sur la structure, prend un essor important grâce aux possibilités de l'informatique temps réel qui permet de contrôler des modes de vibrations sur une large bande (2000 Hz) par exploitation directe de signaux temporels en contre réaction. On rejoint ici les structures intelligentes en ce sens que l'atténuation est rendue, par le contrôle actif, indépendante de la source.

5. 2 MATÉRIAUX ET STRUCTURES ACTIFS, "INTELLIGENTS"

Il est d'usage de classer les matériaux suivant leurs propriétés et surtout leur utilisation, en structurels ou fonctionnels, suivant que l'on utilise leurs propriétés mécaniques ou leurs propriétés plus physiques, luminescence conductivité électrique... Il apparaît souhaitable de pouvoir modifier les propriétés en fonction de variations de paramètres extérieurs d'un environnement changeant. On va donc demander au matériau des propriétés structurales ou fonctionnelles présentant une adaptabilité à un environnement changeant : c'est ce que l'on peut dénommer "intelligence" dès lors que les propriétés changent dans le bon sens pour que l'utilisation attendue du matériau soit maintenue, voire améliorée. Le matériau intelligent est alors à rapprocher d'un système automatique asservi. Il doit comporter un capteur mesurant l'état du matériau pertinent vis-à-vis de la propriété mise en jeu, un capteur d'évaluation de l'environnement, un actionneur capable d'agir sur la propriété, enfin, un système de contrôle commande traitant les informations des capteurs et pilotant l'actionneur. On peut imaginer un niveau intermédiaire de matériau dit "sensible" qui posséderait uniquement des capteurs, ce qui présente déjà un intérêt certain.

Le niveau d'intégration des éléments d'intelligence peut être très variable, leur nature aussi ; enfin, il ne faut pas perdre de vue qu'un matériau ou une structure n'est intelligent que vis-à-vis d'une fonction bien définie à remplir. Citons quelques exemples.

Un matériau sensible, tel un composite à matrice organique renforcée par des fibres de verre biréfringentes peut permettre (au moins dans le principe) de contrôler à cœur les stades de la vie du matériau : élaboration, test de qualification, comportement en service. L'intelligence peut être obtenue par l'électronique, c'est le cas du contrôle actif des vibrations de structure et celui du contrôle de forme géométrique des miroirs de télescope pour compenser les turbulences atmosphériques. L'intelligence peut être intrinsèque. Il s'agirait de définir des matériaux ou multimatériaux qui, sans passer par l'électronique, comprennent leurs propres capteurs, leurs propres moyens d'analyse, leurs propres actionneurs. L'intelligence est programmée dans le matériau par la composition, la microstructure, la mise en forme, le conditionnement, etc. Un exemple est donné par le verre polychrome qui est intelligent par rapport à la fonction de protection contre le rayonnement solaire. On imagine que des structures intégrant des fibres AMF pourraient sans doute remplir des fonctions mécaniques avec une adaptabilité favorable aux effets de température. Les matériaux biologiques naturels constituent des exemples idéaux de matériaux intelligents. S'en inspirer constitue sans doute une piste intéressante pour nombre d'applications à venir.

5. 3 MICROTECHNIQUES

Les microtechniques sont des moyens de miniaturisation d'équipements fonctionnels non électroniques permettant d'arriver à un degré d'intégration élevé. Elles se sont développées avec l'horlogerie où prédominait la mécanique en matière de miniaturisation. Il y a une trentaine d'années est apparue la micro-électronique développée afin de réduire les distances de parcours électrique pour augmenter les fréquences et d'accroître la densité des composants dans les circuits intégrés. Longtemps restées centrées sur elles-mêmes, les technologies de la micro-électronique diffusent maintenant dans d'autres disciplines et vers d'autres applications telles que l'opto-électronique (modulation, amplification, multiplexage, commutation...), l'optique intégrée (microcomposants optiques, microinterféromètres, microréseaux...), l'électromécanique (micro-moteur...), la mécanique (micro-pompe, capteur à

résonateur, microrobotique...), la chimie (micro-capteurs, manipulation de molécules...).

Pour développer un produit microtechnique, les étapes vont du matériau à la réalisation de composants, enfin à leur assemblage pour obtenir un microsystème. Un microsystème peut être défini comme un système de type "état solide" qui assure au moins deux des fonctions suivantes : perception de l'environnement, mise en forme et traitement des données recueillies, prise de décision, transmissions de données, action sur l'environnement. Il doit disposer d'une source d'énergie autonome.

Les technologies de la micro-électronique conduisent à réaliser des matériaux en couches minces (ex. silicium) par usinage chimique ou ionique ou en masse en superposant plusieurs couches par microstéréolithographie. Pour les sources d'énergie, il s'agit de développer des micropiles électriques ou autres micromachines thermodynamiques...

Les enjeux économiques sont facilement identifiables aujourd'hui dans le domaine de l'optoélectronique et l'optique intégrée puisqu'ils concernent les télécommunications où l'on sait que la concurrence internationale est vive. Pour d'autres secteurs d'activité, transports, santé..., les besoins sont plus diffus et les innovations d'autant plus nécessaires que de telles technologies garantissent un faible coût de production permettant d'assurer une diffusion à grande échelle.

Les enjeux scientifiques concernent la mécanique des couches minces, les effets d'échelle, la thermomécanique des assemblages hétérogènes, la microtribologie, les matériaux d'action (AMF, piézos)... Un rapprochement entre mécaniciens et détenteur de la technologie micro-électronique est nécessaire. Il est amorcé entre autres dans le GDR Microsystèmes et au laboratoire SPI du CNRS au Japon (Laboratory for Integrated Micro-Mechatronic Systems). De la synergie entre les communautés peuvent naître d'une part une meilleure maîtrise du comportement des microsystèmes par les modélisations que peuvent apporter les mécaniciens, et d'autre part des applications encore insoupçonnées.

6 - RELATION PROPRIÉTÉS - MICROSTRUCTURES - ÉLABORATION DES MATÉRIAUX DE STRUCTURES

Dans le domaine des matériaux, il est très important d'une part d'établir des relations entre les procédés d'élaboration ou de mise en œuvre, la microstructure et les propriétés, d'autre part de lier les propriétés aux performances.

Cette démarche permet de développer des méthodes permettant le choix optimal des matériaux et de leurs conditions de mise en œuvre, d'obtenir les meilleures performances aux meilleurs coûts, d'accroître la fiabilité des matériaux et la maîtrise des procédés d'assemblage.

Cette optimisation du choix des matériaux nécessite de développer des méthodes d'évaluation et de modélisation des propriétés des matériaux en relation avec les procédés de mise en œuvre, des méthodes d'évaluation des performances des matériaux et des méthodes de sélection des matériaux. Les compétences nécessaires au développement des outils intellectuels indispensables à cette optimisation nécessitent une approche pluridisciplinaire reposant sur la mécanique des structures, la science et le génie des matériaux et l'informatique ou la productique.

Alors que, dans la décennie précédente, l'accent a été mis essentiellement sur les matériaux nouveaux, il est important pour l'avenir de considérer l'ensemble des matériaux de structure : les matériaux traditionnels qui ont plutôt été délaissés ces dernières années (par exemple bois, réfractaires, plâtres, ciments...) et dont le comportement est mal compris ; les matériaux avancés déjà développés ou en émergence (intermétalliques, composites céramique/céramique, les polymères renforcés, les mousses, les alliages de magnésium, matériaux intelligents...).

Il sera important, dans tous les cas, de choisir des matériaux modèles permettant de mettre claire-

ment en évidence les mécanismes fondamentaux responsables du comportement et ainsi d'obtenir une modélisation prédictive.

Les enjeux scientifiques concernent les problèmes d'élaboration des matériaux, de leurs propriétés en relation avec la microstructure, l'optimisation et le choix des matériaux et procédés.

Les méthodes à mettre en œuvre concernent les techniques expérimentales et la modélisation et la simulation numériques.

Dans le domaine de l'élaboration, il est primordial de mieux appréhender les procédés d'élaboration ou de mise en forme et leurs conséquences sur les défauts d'élaboration. Un effort de modélisation concernant les procédés doit être réalisé, notamment dans le domaine de la solidification, du laminage, des traitements thermomécaniques, des techniques des poudres, du moulage, des traitements de surfaces (protection contre la corrosion ou l'usure), procédés d'assemblage.

Il sera fondamental de faire le lien entre les conditions d'élaboration et les microstructures développées, en incluant l'aspect primordial des défauts de cette microstructure, conditionnant les propriétés. Cette approche est particulièrement critique dans le cas de céramiques.

En ce qui concerne les propriétés, certains domaines comme la rupture, l'endommagement, les intermétalliques... restent à développer, notre activité étant nettement plus faible que celle de la communauté internationale. Ceci nécessite d'aboutir à une meilleure connaissance des mécanismes d'endommagement et rupture à froid et à chaud en relation avec la microstructure, de l'effet de l'environnement (corrosion, oxydation) sur les modes d'endommagement. Une attention particulière devra être portée au problème de la propagation sous-critique des fissures dans les céramiques et composites et aux problèmes de matériaux utilisables dans des conditions extrêmes. L'évolution des microstructures au cours des traitements thermomécaniques (notamment durant la précipitation et la recristallisation), lors du vieillissement ou lors de l'endommagement, devra être examinée avec soin. L'interaction entre propagation de fissures et

microstructure sera étudiée de plus près. Le rôle des surfaces et des interfaces sur le comportement thermomécanique des matériaux, et notamment sur les mécanismes d'endommagement, devra être précisé. Les joints de grains, les traitements de surface, le rôle des interfaces sur le transfert de charge dans les matériaux composites, le cas des matériaux à gradient de fonction ou des matériaux hybrides sont des thèmes à approfondir. Dans le cas des polymères hétérogènes, le problème de la mobilité moléculaire au voisinage des interfaces doit être abordé.

L'optimisation et le choix des matériaux et des procédés est un domaine en émergence, qui nécessite un effort particulier ainsi que le développement des outils d'aide à la conception des structures, en collaboration avec les informaticiens et avec l'utilisation des banques de données et l'aide d'experts. Il nécessite également de prendre en compte l'aspect économique, technique et scientifique du recyclage des matériaux.

Afin d'obtenir une caractérisation quantitative nécessaire à la prédiction, il est essentiel de disposer de techniques expérimentales performantes. Les techniques qui méritent d'être développées sont des outils de caractérisation très spécifiques et performants (notamment concernant les essais mécaniques instrumentés à très hautes températures, ou l'utilisation de l'émission acoustique), les techniques d'investigation à l'échelle nanométrique (nanoindentation, microscopie à champ proche, microscopie électronique analytique très haute résolution), les techniques expérimentales *in situ* et l'utilisation des grains instruments (rayonnement, synchrotron, diffraction des neutrons).

Le développement des méthodes de simulation numérique et de logiciels de sélection des matériaux doit être encouragé dans l'avenir.

Dans le domaine de la modélisation, il est nécessaire de s'intéresser aux mécanismes fondamentaux, aux modèles de changement d'échelle (notamment pour les matériaux hétérogènes, les techniques d'homogénéisation permettant d'obtenir des lois de comportement macroscopique prenant en compte les aspects microstructuraux de chaque échelle).

En conclusion, le domaine des matériaux de structure est un domaine qui connaît un fort développement, tant du point de vue technologique que du point de vue scientifique (cf. les grands choix technologiques matériaux).

Le CNRS a une position reconnue au niveau international, mais son effort concernant les matériaux de structure doit être amplifié. La science et le génie des matériaux s'appuient sur une approche pluridisciplinaire reposant sur les sciences de base chimie, physique, mécanique et sur les sciences pour l'ingénieur. Cette approche nécessite donc une organisation de la communauté scientifique. La Dimat peut et doit jouer ce rôle, ce qui permettra d'assurer une continuité de la politique matériaux ainsi que sa cohérence.

7 - BIOMÉCANIQUE

L'intérêt pour le fonctionnement mécanique des organes du corps humain est probablement ancien. Il est difficile de situer à quand il remonte. On pourrait faire remonter l'étude de la cinématique aux travaux de Marey (1830-1904). En tout cas, dans les années soixante, on trouve de nombreuses publications sur la cinématique et les oscillateurs biologiques, relevant de la mécanique non linéaire et de la théorie des servo-mécanismes. Ce sont les moyens informatiques et les méthodes d'éléments finis, d'apparition récente à l'échelle d'un siècle, qui ont permis d'aborder la question de la résistance des matériaux biologiques. Actuellement, la biomécanique est considérée comme une discipline à part entière, reconnue et soutenue par diverses associations aux États-Unis, en émergence dans les pays européens. La France se signale par la qualité de ses travaux.

On peut dire que toutes les disciplines traditionnelles de la mécanique, et d'autres sciences évidemment, sont sollicitées en biomécanique. En ce qui concerne le *diagnostic*, à côté de la radiographie et de la résonance magnéto-nucléaire, l'acoustique et les méthodes ultra-sonores tiennent une place importante. L'analyse des bruits émis par

les organes, cœur, poumons etc, est pratiquée (l'auscultation est une forme primitive d'analyse acoustique). La vélocimétrie du flot de sang dans les artères par les méthodes ultrasonores a fait l'objet de divers travaux. L'échographie est une technique éprouvée. Le scanner ultra-sonore fait son apparition.

L'étude des *flots sanguins* est un thème très florissant pour les mécaniciens des fluides, particulièrement ceux de l'école française. Le sang est un fluide non newtonien, circulant dans des conduites souples (les vaisseaux sanguins). La circulation est étudiée dans les vaisseaux, mais aussi dans les branchements, autour des prothèses. Des expériences sont menées pour identifier des lois de comportement. Des modèles numériques et des logiciels spécifiques ont été élaborés pour l'étude de la circulation. Des calculs numériques en dimension 2 sont couramment pratiqués, et les calculs en dimension 3 sont maintenant abordables. Le problème de la circulation dans les microvaisseaux est un enjeu pour les prochaines années, le sang charriant des globules qui ont une taille du même ordre de grandeur que le diamètre des microvaisseaux. La modélisation du système respiratoire, avec les échanges gazeux qui se produisent dans un réseau très ramifié, est aussi un thème de recherche très actif.

Pour ce qui relève de la mécanique des solides, l'analyse des mouvements est en développement constant. Relèvent aussi de la mécanique des solides les parties "non fluides" du corps humain, os, muscles, ligaments, tissus divers, poumons, foie, vus à l'échelle macroscopique. L'accidentologie apporte une forte motivation dans l'étude du comportement quasi-statique ou dynamique de ces constituants. C'est un thème de recherche privilégié de l'INRETS. Les grands groupes automobiles PSA et Renault financent un certain nombre de ces opérations de recherche. Les expériences sur le comportement mécanique de ces parties vivantes sont pratiquement impossibles, et les études sur des prélèvements sont peu reproductibles et demandent des appareillages spécifiques et des protocoles assez lourds. Une première difficulté consiste donc à recueillir des données expérimentales. En vue des études sur mannequins, des matériaux dits bio-fidèles, c'est-à-dire ayant un comportement analogue à ceux des organes, sont

recherchés. Ils sont souvent constitués de mousses ou de polymères divers. Les modèles de *comportement de ces matériaux vivants ou modèles*, quelquefois ni solides ni fluides, sont difficiles à concevoir. Une grande variété existe, assez souvent très empirique, et pas toujours adaptée à l'étude mathématique ou au calcul numérique. Des calculs quasi statiques de contraintes, dans les systèmes osseux et les articulations principalement, sont maintenant couramment pratiqués avec des logiciels de calcul du commerce. Un certain nombre de calculs de résistance et de déformations de diverses *prothèses*, articulations, endo-prothèses etc., pièces assez complexes mais constituées de matériaux bien définis, sont accessibles dans l'hypothèse quasi statique. Les problèmes ouverts sont donc ceux de la modélisation et du calcul des corps vivants et matériaux bio-fidèles, particulièrement les processus d'endommagement sous sollicitations dynamiques.

Deux DEA nationaux permettent la formation à la recherche en bio-mécanique, avec un fort poids de mécanique des fluides. Il s'avère que de nombreux chercheurs s'intéressent à la bio-mécanique relèvent de la section 22, *Thérapeutique et médicaments, concepts et moyens*. On aura donc une vision complémentaire en consultant le rapport de conjoncture de cette section.

8 - L'ACOUSTIQUE (ENVIRONNEMENT, CONTRÔLE, ACOUSTIQUE MUSICALE)

L'acoustique est la science des sons, qu'ils soient audibles ou non, et des vibrations. Elle s'intéresse à leur production, leur transmission, leur réception, et participe à tout ce qui concerne la connaissance des trois mécanismes, leur maîtrise et leur utilisation aux fins les plus diverses.

Si la lutte contre le bruit et les problèmes d'environnement, avec leur caractère évident et consensuel, sont une des priorités de cette fin de

siècle pour les pays développés, ils sont loin d'être les seuls domaines où l'acoustique est impliquée. Elle l'est également dans diverses techniques, comme par exemple l'échographie dans le domaine de l'imagerie médicale. On est alors dans la partie la moins visible de la discipline, celle où l'on utilise des sons et des vibrations inaudibles pour ausculter la matière – depuis le sous-sol (sondage géophysique), la mer (sonar militaire ou de pêche), la basse atmosphère (sodar), jusqu'aux circuits intégrés (microscopie acoustique), en passant par les matériaux et structures industriels (inspection ultrasonore) –, pour renseigner sur les mouvements de fluides (examen Doppler sanguin) ou d'objets (sonar Doppler, gyromètre acoustique), pour propager des messages (communication sous-marine), pour transférer de l'énergie (réfrigération acoustique).

Si, dans toutes ces techniques, seul l'aspect objectif des phénomènes nécessite d'être pris en compte, il n'en va plus de même lorsqu'on a affaire à des problèmes mettant en jeu l'audition, depuis son aspect le plus fruste (lutte contre le bruit) jusqu'à son aspect le plus subtil (acoustique et informatique musicale), en passant par les divers degrés de l'intégration corticale (acoustique des salles et des environnements sonores, audition-phonation, parole). On dépasse alors largement la physique pour atteindre la psychophysiologie, l'esthétique et le culturel.

Le socle de la discipline est donc extrêmement large et par essence multidisciplinaire. Cette pluridisciplinarité est la première originalité de l'acoustique actuelle, science d'intégration par excellence. Elle seule permet d'aborder les problèmes concrets dans toute leur complexité. On touche alors au second caractère important de l'acoustique, son caractère complet, mêlant inextricablement le théorique et l'expérimental, le fondamental et l'appliqué

8. 1 ENJEUX

Les enjeux sont tout autant (sinon plus) d'ordre politique (stratégique, économique, social, humain) que scientifique.

Enjeux scientifiques

Il s'agit de comprendre de manière intime les mécanismes de génération (problèmes de couplage divers) et de propagation (milieux complexes, multi-échelles) des sons et vibrations (audibles ou non : signaux de sondage), ainsi que les mécanismes de perception jusqu'à l'acceptation esthétique du terme. Cette compréhension doit être détaillée pour pouvoir, d'une part, rendre compte quantitativement des phénomènes observés en situation réelle (problème direct : simulations numériques) et, d'autre part, permettre d'induire des modélisations simplifiées (compromis réalisme-économie) parfaitement maîtrisées, lorsqu'il faut – et c'est la plupart du temps le cas –, non seulement comprendre, mais également agir (problème inverse : optimisation d'instrument, identification et/ou contrôle de sources et/ou de milieux).

Enjeux politiques

Il s'agit essentiellement de :

- la maîtrise de l'environnement sonore et vibratoire : lutte contre le bruit et les vibrations ; création d'objets, procédés et filières industrielles respectant l'environnement ; création d'objets et procédés servant la santé (prothèses, prévention de surdités) ;

- la maîtrise des sons créés par l'homme : création d'équipements culturels et/ou de loisirs (salles de concerts, équipements et instruments de musique) ;

- la création d'appareils et de systèmes divers basés sur les ondes acoustiques ou élastiques : capteurs physiques, dispositifs de transfert de chaleur, systèmes de détection, d'investigation et de contrôle

de matériaux (matériaux industriels, corps humain, sous-sol...) et de processus (contraintes, écoulements...).

8. 2 ÉVOLUTION ET TENDANCES

Une des grandes thématiques actuelles est celle des problèmes inverses : modélisation et analyse-synthèse de sons (parole, musique), modélisation et contrôle des sources de bruit (contrôle actif des bruits et vibrations), analyse de signature acoustique et diagnostic de milieux de propagation (imagerie médicale, sondage du sous-sol et des fonds marins, contrôle non destructif des matériaux).

Les thèmes en émergence s'inscrivent en général dans cette stratégie de modélisation-inversion, qu'on s'intéresse à l'investigation des matériaux ou à l'optimisation de systèmes ; mais ils peuvent être de nature purement cognitive (connaître pour agir), technique (incluant les méthodes numériques et le traitement du signal), voire technologique ; les trois domaines étant en général intimement liés. On peut citer :

- la propagation en milieux complexes (inhomogènes, multi-échelles, désordonnés, turbulents, ...) et les sons intenses (acoustique non linéaire) ; les interactions fluide-structure (rayonnement, excitation fluide-solide et inversement) et acoustique-turbulence ; l'audition (analyse de scènes, ...) ;

- les nouvelles représentations de champs (familles complètes de fonctions, ...) et les approches asymptotiques et perturbatives associées, les méthodes numériques (optimisation stochastique, ...), le traitement du signal, l'intelligence artificielle pour les problèmes directs et inverses (identification de sources, contrôle de bruits et vibrations, matériaux et structures adaptatifs, reconnaissance de la parole, analyse-synthèse sonore, maîtrise intime des sons, ...) ;

- les nouveaux capteurs physiques (gyromètres, ...), dispositifs de transfert d'énergie (réfrigérateurs, ...), systèmes d'auscultation et d'imagerie

(tomographie ultrasonore, ...) ; les nouveaux transducteurs pour l'audible (capteurs numériques intégrés, microphones subminiatures, transducteurs à plasma, ...) et pour l'investigation des matériaux (méthodes sans contact : photoacoustiques, par couplage aérien).

Dans tous ces domaines, l'informatique sous toutes ses formes joue un rôle central, depuis les architectures dédiées au calcul intensif jusqu'aux processeurs intégrés au niveau des capteurs en passant par la microinformatique et les systèmes dédiés au temps-réel.

9 - TRIBOLOGIE ET SURFACES

La tribologie correspond à la science des matériaux en contact, du frottement, de l'usure, de la lubrification et de l'adhésion. C'est une science relativement récente dont le développement, ces dernières décennies, a été en partie lié au développement des outils. L'impact industriel des recherches est souvent important, car les résultats déterminent souvent les performances de nouveaux procédés de fabrication ainsi que la durée de vie de systèmes. De plus en plus, la tribologie devient un enjeu pour le développement de hautes technologies : télévision haute définition, disques durs par exemple. Ceci conduit à renforcer l'importance d'un partenariat réel entre laboratoire de recherche et industrie.

C'est un domaine de recherche qui se caractérise par une pluridisciplinarité très forte : mécanique, physique, chimie, science des matériaux, physico-chimie, ... C'est dans ce constat que se trouve à la fois la richesse mais aussi les difficultés de la tribologie. Elle met en jeu des échelles très diverses, et les problèmes doivent être considérés au niveau du mètre aussi bien que du nanomètre, et ceci concerne à la fois les problématiques industrielles et scientifiques. La tribologie repose souvent sur de l'expérimentation lourde, performante et de haut niveau.

9. 1 POSITION DE LA RECHERCHE FRANÇAISE

Les États-Unis et le Japon sont des acteurs influents en tribologie. En particulier, les recherches en micro- et nano-tribologie sont supportées par des industriels de la microinformatique pour l'application disque dur (et la télévision haute définition pour le Japon). C'est un exemple pour lequel l'industrie est un moteur puissant (supports financiers importants pour la recherche fondamentale).

La recherche en tribologie française se situe relativement bien au niveau de l'Europe et dans le monde. La Société Tribologique de France, STF, anime la communauté tribologique française en organisant chaque année des manifestations où industriels et universitaires se rencontrent. Les recherches se sont en particulier structurées dans la région Rhône-Alpes avec l'Institut Européen de Tribologie (INSA de Lyon, ECL), en association avec l'Imperial College de Londres et l'Université de Leeds. Une action COST "Tribology" à l'union européenne a permis de mettre en avant des domaines de recherche clés pour le futur : couches minces, graisses, lubrifiants non polluants.

9. 2 AVANCÉES RÉCENTES

On assiste en tribologie à des avancées continues qui sont liées à des recherches de longue haleine menées par des équipes performantes disposant de moyens de plus en plus sophistiqués. Des approches tant théoriques qu'expérimentales ont conduit à des progrès sur les connaissances de base, comme la compréhension des phénomènes tribologiques en frottement sec et lubrifié, avec la prise en compte de l'effet d'un troisième corps dans un interface frottant. Les phénomènes de fatigue sont aussi étudiés en considérant aussi les phénomènes de fatigue (cas du fretting, des engrenages, du contact roue/rail). L'étude de l'origine de la force de frottement permet de mettre en œuvre des solutions technologiques pour obtenir des valeurs de coefficient de frottement "ultra faibles" (inférieurs à 0,001 en frottement sec). La modélisation numérique du contact et du frottement est devenue

opérationnelle pour les lois classiques (modules adéquats dans les grands codes de calcul pour les lois de Tresca, de Coulomb ou de compliance de contact).

Les travaux actuels ont bien mis en évidence l'importance des approches "modélisation" des problèmes de mécanique des contacts, de l'endommagement, des transformations physico-chimiques des surfaces frottantes. Ainsi, de nombreuses situations mettent en jeu des couplages forts entre phénomène tribologique et comportement dynamique, rhéologique en présence de non linéarités (grandes déformations par exemple).

Dans le secteur industriel, la tribologie a permis des progrès notables en conduisant à une augmentation de la fiabilité et de la durée de vie des systèmes mécaniques et à une optimisation de l'emploi des matériaux massifs, en couches minces et composites. Le développement de solutions technologiques pour lubrifier dans des conditions extrêmes a aussi été possible (haute ou basse température, vide spatial, haute vitesse, ...). Le GDR "Comportement de roulements en ambiance cryotechnique" a ainsi été très important dans le domaine de la tribologie à basse température.

9. 3 TENDANCES

Le monde de la recherche en tribologie s'est orienté de façon nette vers les modélisations numériques du contact. Cette approche permet ainsi de déterminer l'importance des grandeurs thermomécaniques globales ou locales des matériaux, et montre l'importance de la maîtrise des moyens de mesures. Le développement continu de l'étude du passage local/global, ou nano/micro/macro rend nécessaire l'approche des phénomènes à l'échelle atomique : expérimentation et modélisation.

En frottement lubrifié, il apparaît toujours extrêmement important de connaître les aspects tribochimiques comme dans le cas du contact outil/métal en formage (interactions lubrifiant/surface en cours de frottement).

L'étude des couplages tribologie et systèmes, tribologie/structure, tribologie/mécanique des solides (dynamique) permet aussi d'étudier les instabilités en frottement sec et les phénomènes de crissement.

Pour des aspects plus matériaux, des thématiques sur l'étude des processus d'endommagement en présence de phénomènes de fatigue (fretting) voient le jour.

De même, se développent des travaux sur la lubrification élastohydrodynamique non classique (sous alimentation, rugosité 3D, aspects transitoires, effets non newtoniens, calcul du frottement local) ainsi que dans le domaine de la lubrification hydrodynamique : étude de paliers, de butées et de joints avec prise en compte des effets thermiques, de changement de phase du fluide, des couplages fluide/structure, des phénomènes de transition HD/mixte, des interactions fluide/fissures, effets et réponses à des chocs.

Le domaine de la biotribologie fait l'objet de travaux avec la recherche de matériaux performants pour des prothèses, l'étude de la nocivité des débris d'usure, l'étude de l'interface os/prothèse avec des matériaux ostéoconducteurs.

Enfin, les expérimentations en tribologie deviennent de plus en plus performantes grâce à des études de la méthodologie de caractérisation tribologique de matériaux dans un contexte donné.

Parallèlement, de nombreux secteurs industriels sont demandeurs de progrès dans le domaine de la tribologie. On peut citer aussi bien des industriels concernés par des aspects matériaux, lubrifiants, graisses, couches minces protectrices contre l'usure, la corrosion, que les industriels intéressés par des mécanismes, paliers hydrodynamiques, engrenages de puissance silencieux ou des utilisateurs concernés par la tenue en fretting d'assemblages, la maîtrise du formage, l'étude du contact pneu/route, l'étude de solutions technologiques permettant de supprimer les lubrifiants et les sollicitations en conditions extrêmes pour le spatial ou l'aéronautique.

On remarque avec intérêt que dans certaines grosses sociétés, la tribologie et ses avancées sont de mieux en mieux intégrées, aboutissant à des relations différentes avec la recherche fondamentale universitaire. La tribologie devient alors un outil réel d'aide à la conception et à l'optimisation, ce qui conduit alors souvent les laboratoires de recherche à jouer un rôle plus aval. Néanmoins, ce dernier aspect reste encore à développer. Dans le cas des PME PMI, la situation est différente, car ces petites structures n'ont pas les moyens d'une évolution analogue à celle des grosses sociétés. On observe alors une augmentation des besoins en résultats concrets sans pour autant noter de moyens financiers supplémentaires.

9. 4 CONCLUSIONS

La recherche en tribologie doit encore se développer en s'appuyant sur ses spécificités, en collaboration avec l'industrie, et en portant des efforts particuliers sur les aspects modélisations des situations expérimentales, les expérimentations de haut niveau, la méthodologie d'analyse de situations tribologiques.

Des efforts doivent aussi porter sur l'étude des couplages phénomènes tribologiques/mécanique, physique, chimie, physico-chimie, phénomènes non linéaires, en considérant les approches à l'échelle atomique aussi bien que les passages entre les diverses échelles micro/méso/nano.

L'aspect pluridisciplinaire indispensable à la tribologie doit être favorisé, ainsi que la mise en place d'actions structurantes dont les objectifs sont de mettre en synergie des compétences complémentaires.

10 - LE GÉNIE CIVIL

Le génie civil n'est pas une discipline scientifique, mais un secteur technologique demandeur de travaux scientifiques. Bien qu'il soit largement

investi par la mécanique, ses progrès récents comme ses perspectives d'avenir relèvent souvent d'une approche pluridisciplinaire.

10. 1 AVANCÉES RÉCENTES

Ces dernières années ont vu une notable amélioration dans la connaissance des relations entre composition du béton, granulométrie de ses constituants et propriétés macroscopiques.

De même, la physico-chimie des bétons et l'étude des réactions entre pâte de ciment et granulats ont fait de grands progrès. Les derniers développements des bétons à hautes performances ont vu la mise au point des bétons de poudre réactive, dont la résistance à la compression est plus de vingt fois supérieure à celle d'un béton ordinaire.

Les techniques de renforcement et de traitement des sols se sont développées en même temps qu'étaient élaborées les méthodes de calcul correspondantes. La confrontation entre celles-ci et des résultats de mesure sur ouvrages réels a été faite et se poursuit.

Particulièrement en France, on a développé la modélisation du comportement mécanique, ou mécanique couplée à des facteurs physiques, des matériaux typiques du génie civil : bétons, sols, roches. On a développé des modèles de plasticité ou d'endommagement adaptés à ces matériaux et des modèles poro-élastoplastiques prenant en compte le couplage entre teneur en eau et comportement mécanique. Ces modèles sont intégrés dans des logiciels de calcul.

10. 2 THÈMES DE RECHERCHE

Les thèmes de recherche en émergence ou à développer peuvent être regroupés en trois grands domaines : les ouvrages existants, les ouvrages et leur environnement, le développement de techniques et procédés de construction.

Pour pouvoir prédire l'évolution des constructions existantes, il faut étudier le **vieillessement des matériaux** (vieillessement physico-chimique et endommagement) qui les constituent, et les conséquences sur leur comportement mécanique, et développer des **modèles de structures ou d'éléments de structure sur site**, tenant compte en particulier des modifications mécaniques qu'ils ont pu subir (fissuration, dégradation des liaisons, évolution des matériaux, ...).

La réparation et le renforcement des ouvrages peuvent faire l'objet d'actions de recherche plus ponctuelles, liées à la technique étudiée : il peut s'agir de l'étude d'un matériau particulier utilisé en réparation, ou de celle d'un assemblage particulier.

En ce qui concerne les actions ordinaires sur les ouvrages, **l'interaction fluide-structure** doit faire l'objet d'une recherche permanente. Le risque géotechnique est encore très important dans le cas des ouvrages souterrains ou des grands chantiers linéaires (ligne de train, autoroute). Il est donc nécessaire de développer **les méthodes d'auscultation géophysique** donnant accès à des informations là où il n'est pas possible de faire des prélèvements, mais aussi de mieux caler le **comportement des sols en place** par rapport à celui en laboratoire, et de trouver les méthodes permettant de prendre en compte la dispersion des propriétés des sols en place. Les modèles de comportement des sols doivent faire l'objet de recherches permanentes.

La tenue des constructions vis-à-vis d'actions exceptionnelles (séismes, inondations, cyclones, ...) demande des recherches sur **la détermination de ces actions et sur le comportement dynamique des ouvrages et des sols**.

Le domaine de l'environnement lui-même et le concept de développement durable prennent de plus en plus d'importance en génie civil. Les recherches concernent les nuisances liées aux ouvrages pendant tout leur cycle de vie, le recyclage des matériaux de construction, l'emploi des déchets issus d'autres secteurs (mâchefers d'ordures ménagères, déchets plastiques, ...) dans les constructions, et les problèmes géotechniques liés au stockage des déchets, en particulier la diffusion

des polluants dans les sols. La diminution ou le contrôle de certaines ressources implique de rechercher les possibilités d'emploi de granulats locaux actuellement considérés comme subnormaux.

Est actuellement en émergence l'emploi de toutes les **techniques de communication nouvelles** sur les chantiers de génie civil : échanges de données informatisées, localisation et guidage des engins par GPS ou autre, robotisation de ces engins. Des recherches sont souvent nécessaires pour adapter des systèmes connus par ailleurs aux conditions de chantiers et à la précision qui y est demandée.

La construction en zone urbaine pose d'autant plus de problèmes qu'elle doit être souterraine. L'effet du creusement des ouvrages souterrains sur les constructions existantes demande le développement **des techniques d'auscultation** évoquées plus haut et une meilleure **connaissance des sols urbains**. Ces derniers sont un mélange de structures naturelles, de restes archéologiques, de sols issus des constructions et destructions successives. Les techniques de construction elles-mêmes peuvent poser des problèmes particuliers : c'est le cas par exemple du collage des argiles sur les outils portés par les tunneliers, ou la prévention des tassements en surface dus aux travaux souterrains.

On a évoqué, dans les avancées récentes du domaine, des résultats obtenus sur les matériaux traditionnels ou se situant dans le prolongement des matériaux connus.

L'emploi des matériaux composites commence à apparaître en génie civil. Des recherches sont nécessaires pour connaître leur comportement dans l'environnement des constructions et développer les techniques d'assemblage spécifiques.

Le collage est peu utilisé en génie civil par rapport à la construction aéronautique ; on pourrait penser à son développement, en particulier en construction métallique. C'est probablement une voie de recherche pour le moyen terme.

10. 3 ORGANISATION DE LA COMMUNAUTÉ

Notons d'abord l'existence de nombreuses sociétés savantes nationales et internationales dans les différents domaines du génie civil. En France même, une grande partie d'entre elles vient de constituer un groupement de concertation. Toutes ces associations organisent régulièrement des congrès.

Les grands organismes européens de recherche ont constitué le Forum des Laboratoires Européens de Recherche Routière (FLERR)

Il faut noter une présence encore faible, mais en croissance, de projets de recherche sur le génie civil dans les programmes européens. Des projets COST existent cependant depuis plusieurs années, et un Comité COST Génie civil urbain fonctionne. Un réseau de recherche européen, qui lui survit, a été créé par le GDR Géomatériaux qui a pris fin en 1993.

Au moins aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en France existent des structures incitatives de recherche destinées à faire travailler ensemble laboratoires et entreprises.

En France, la recherche de base s'est dotée de deux structures : le réseau GEO (Géomatériaux, Environnement, Ouvrages) et le GDR Sols Urbains.