

09

MÉCANIQUE – GÉNIE DES MATÉRIAUX – ACOUSTIQUE

Pierre ALART

Président

Stéphane Andrieux

Yves Auregan

Charles Besnainou

Stéphane Bonelli

Andrei Constantinescu

Jacques-Jean-Marie Desrues

Jean Duplessis-Kergomard

Jean Frene

Jean-Louis Gardissat

Daniel Guyomar

Aziz Hamdouni

Philippe Kapsa

Françoise Lene

Gérard Maugin

Péricles Meneses

Pierre Montmitonnet

Roger Ohayon

Jean Petit

Pascale Royer

Louis Trepied

Le champ disciplinaire de la section 09 couvre *la Mécanique des Solides, déformables ou indéformables, et ses applications*. On y travaille sur deux classes d'objets : les matériaux et les structures, les secondes se définissant par l'assemblage d'objets (eux-mêmes faits de matériaux), ce qui introduit les contacts et les interfaces. S'y ajoute l'*Acoustique* : même si celle-ci s'intéresse aussi à la propagation en milieu fluide, ses applications à la caractérisation et au contrôle des matériaux et des structures pourraient à elles seules justifier sa présence. Les mots clés suivants de la section structurent le présent rapport :

milieux continus, hétérogénéité, couplages multi-physiques, systèmes discrets ;

propriétés mécaniques et structurales des matériaux naturels, vivants ou artificiels ;

ondes, vibrations, perception, évaluation non destructive ;

structures, dynamique et contrôle, géomécanique, génie civil ;

tribologie, surfaces, interfaces ;

systèmes mécaniques, micro-systèmes, robotique, fabrication, systèmes de production ;

biomécanique, génie tissulaire, accidentologie, mécanique du mouvement humain.

Le premier chapitre place l'hétérogénéité des milieux complexes au centre des évolutions de la discipline. Les § 2 et 3, où l'hétérogénéité est omniprésente, complètent la couverture de l'intitulé de la section 09. Les notions générales présentées dans ces trois premiers chapitres nourrissent les réflexions sur les grands domaines d'application, § 4 à 7. Cet ensemble possède quelques traits communs forts et très « SPI », bien que non absolument spécifiques :

– un intérêt de plus en plus central pour les propriétés des milieux complexes, requerrant aussi bien des méthodes inverses d'identification des propriétés à partir de l'expérience, que des modèles micro-macro à vocation prédictive ;

– un usage presque universel de la simulation numérique, allant jusqu'au calcul intensif, le plus souvent non linéaire, fréquemment multi-échelle, multi-physique, parfois dans des domaines non bornés ; notre domaine évolue donc en fonction des progrès du matériel informatique, il participe aussi du et au progrès des formulations et méthodes numériques (parallélisme, résolution de grands systèmes, etc.) ;

– un fort tropisme vers les applications, avec des liens contractuels tant avec le milieu industriel (mécanique des structures, génie des matériaux, mise en forme, tribologie), qu'avec des partenaires publics sur des problèmes de société importants (acoustique et combat contre le bruit, applications médicales ; géomécanique et sécurité des grands ouvrages, stockage des déchets, migration de polluants) ;

– cette forte interaction avec le milieu industriel a conduit les laboratoires de la section à être très présents dans les contrats européens et les réseaux des PCRD précédents. C'est de bon augure pour la phase suivante, la construction de l'Espace Européen de la Recherche, même si nous n'atteignons pas au degré d'intégration internationale auquel le partage de grands équipements pousse naturellement d'autres disciplines.

1 – MILIEUX CONTINUS, HÉTÉROGÉNÉITÉ, COUPLAGES MULTI- PHYSIQUES, SYSTÈMES DISCRETS, MILIEUX GRANULAIRES ET POREUX

Le titre de cette section amène immanquablement à réfléchir sur l'évolution de la mécanique des milieux continus au cours du dernier demi-siècle, et au-delà. Pierre Duhem avait opportunément réfléchi à une telle évolution pour le XIX^e siècle ; il en avait tiré la conclusion que quatre branches de la mécanique (s'entend celle des milieux continus ou considérés comme tels à l'échelle humaine) restaient à rationaliser car elles étaient encore « aberrantes ». Il s'agissait des branches concernées par :

– (i) les phénomènes de friction (on dirait aujourd'hui des phénomènes de caractère plastique) ;

– (ii) l'hystérésis ;

– (iii) les couplages électromagnétiques ;

– (iv) les faux équilibres.

Rappelons que Duhem était partisan d'un cadre énergétique général qui lui semblait le plus approprié en phénoménologie. Alors que le programme de Hilbert n'est pas encore complètement satisfait en mathématiques pures, on peut dire maintenant que le programme de Duhem est presque rempli grâce à une conjonction propice d'une bonne formulation thermodynamique, de progrès bienvenus en mathématiques appliquées (par exemple analyse convexe, analyse variationnelle, analyse non-régulière) et d'un formidable développement – encadré par les mathématiques appliquées – des techniques numériques (éléments finis, différences finies, automates cellulaires, transformées de Fourier rapides, systèmes d'évolution, etc.), elles-mêmes nourries et exigées par les développements en mécanique. Les couplages

électromagnétiques et mécaniques ont reçu les formulations thermodynamiquement admissibles les plus générales. Faux équilibres, plasticité, et hystérésis admettent des représentations prédictives en termes de variables internes d'état thermodynamique identifiables grâce à l'amélioration des techniques expérimentales. La difficulté rencontrée par Duhem consistait essentiellement en la prise en compte de non linéarités essentielles (par exemple existence de seuils, y compris mobiles) et de dissipation. En effet, la science physique et plus particulièrement mécanique du XIX^e siècle est une science des phénomènes linéaires, à faible niveau d'énergie, le plus souvent isotropes, et presque jamais hétérogènes. Avec Lévy et Tresca apparaissent certes les notions de plasticité et de seuil, mais le cadre énergétique, mathématique, et numérique performant fait défaut, et pour longtemps encore. Avec l'aube du XX^e siècle et, pour faire simple, avec Liapounov et Poincaré, apparaissent au grand jour les notions de non linéarité et de stabilité, pour lesquelles on introduira plus tard la notion de « brisure de symétrie ». Mais la plupart des phénomènes étudiés restent au plus faiblement non linéaires (en dehors des ondes de choc et des phénomènes explosifs), mais déjà éventuellement anisotropes (avec Voigt et la découverte de la piézoélectricité par les frères Curie). La recherche française en mécanique des milieux continus des années 1960-1985 a fortement contribué à donner un cadre thermodynamique et mathématique rigoureux à nombre de ces effets, qu'on pense en particulier à l'élasto-plasticité, et l'hystérésis. On peut même dire que l'École française, fortement représentée dans les laboratoires actuels du SPI-CNRS, a su imposer une vision, parfois trop réductrice, pratiquement dans le monde entier. Certains aspects lui ont échappé comme ceux des structures fines, les mathématiques correspondantes étant plus « anglo-saxonnes ». En effet, si la thermomécanique duhémienne a permis une vision enrichissante et numériquement applicable de l'un des plus difficiles problèmes des matériaux déformables, celui des transitions de phase (alliages à mémoire de forme, etc.)

dans des milieux non linéaires anisotropes, la structure fine devait être résolue par d'autres (USA, Allemagne).

Par contre, succédant au XIX^e et XX^e siècles linéaires isotropes, puis non linéaires et anisotropes, les chercheurs français sont certainement à la base de développements, à partir des années 1980, mais avec un horizon très ouvert, de la plus difficile à saisir des « non » propriétés, l'hétérogénéité, dernier point que Duhem et ses contemporains ne pouvaient résoudre. *Le XXI^e siècle devrait donc être celui de l'hétérogénéité.* La notion est facile à saisir au niveau numérique dans la discrétisation mais elle est d'une formidable difficulté aux niveaux continus et mathématiques car elle est souvent très brutale et favorise la manifestation de comportements complexes. Les matériaux les plus courants, naturels ou artificiels, sont le plus souvent hétérogènes. C'est aussi le cas de structures (échelles plus grandes ou plus petites), les composites et les polycristaux étant par essence les exemples mêmes de cette situation. On a d'abord pensé qu'une telle complexité pouvait, en première approximation, être représentée par des valeurs « homogénéisées » (homogénéisation simple par moyennes de volume, ou périodique) dans un cadre souvent linéaire. Mais comment homogénéiser un matériau constitué de grains orientés dans de multiples directions et déjà essentiellement plastiques ? Comment représenter pour l'ingénieur qui en a besoin dans des calculs prédictifs le comportement de mousses métalliques, de milieux poreux saturés ou non, du matériau bois, ou bien de l'os animal ou du tissu musculaire cardiaque, exemples parfaits de structures hiérarchisées à multiples échelles où de forts couplages entre propriétés mécaniques et autres se manifestent. Cette structure multi-échelles, négligée auparavant car souvent inaccessible à l'expérience avec les moyens usuels d'observation, mais dont on sent bien qu'elle détermine fortement le comportement macroscopique, constitue le grand défi actuel et futur proche de la mécanique des milieux continus moderne, et ce d'autant plus que la miniaturisation et la nécessaire conception de matériaux et structures adaptatifs (ou de

remplacement, en biomécanique), forcent à une approche plus fine avec un passage requis entre plusieurs échelles. On y voit apparaître ou se justifier la considération de milieux continus généralisés, de milieux non-locaux, et donc d'intéressants comportements statiques (qu'advient-il des singularités ?) ou dynamiques (problèmes de la dispersion des ondes liée à la présence de longueurs caractéristiques). Sur ce dernier point, on doit noter l'équivalence entre non localité et caractère discret à laquelle nous a habitué dans un sens la discrétisation numérique ; mais la réciproque (d'où équivalence) est vraie, de sorte que le spécialiste du continu doit nécessairement se pencher vers l'aspect discret de la matière. Ceci est illustré par le cas des milieux granulaires de grand intérêt dans de nombreuses applications industrielles, qui vont du tas de sable et du stockage des graminées à la production pharmaceutique. Tous ces cas amènent à revoir la définition même du cadre de la mécanique des milieux continus, et sa mise en pratique numérique et prédictive.

En résumé, les défis à surmonter dans les prochaines années sont :

- une formulation performante de l'homogénéisation non linéaire, assise sur une analyse variationnelle renouvelée ;

- la compréhension et la formulation appropriée d'effets multi-échelles et multi-physiques ;

- la mise en application de la grande palette de couplages électro-magnéto-mécaniques non linéaires (pour l'instant souvent réduits à la piézoélectricité linéaire, quelquefois induite, et la magnétostriction géante) ;

- l'application des techniques d'homogénéisation à la conception de composites actifs à usage prédéterminé ;

- au point de vue théorique, la bonne géométrisation unificatrice de la théorie des défauts dans les milieux continus.

Nombre des effets à élucider ou mettre en œuvre et des études à poursuivre révèlent un aspect pluridisciplinaire qui va en s'accroissant, les relations avec le champ scientifique d'autres

sections du CNRS (Physique, Métallurgie, Bio-ingénierie) étant évidentes. Les relations intimes avec les mathématiques appliquées concernent toujours les équations aux dérivées partielles et les techniques numériques. Elles devraient s'accroître au niveau des systèmes dynamiques discrets et des processus stochastiques.

2 – PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES, STRUCTURALES ET RHÉOLOGIQUES DES MATÉRIAUX NATURELS, VIVANTS OU ARTIFICIELS

Aujourd'hui et plus encore demain, les matériaux constituent un enjeu économique et social considérable, leur avenir et leur maîtrise étant la base de l'ensemble de l'effort technologique. D'un intérêt stratégique pour les grands programmes technologiques (aérospatial, nucléaire, SRIC, océanographie etc.), ils sont également des clés pour divers secteurs essentiels tels que transports, habitat, emballage, biomédical, sports et loisirs etc.

La Science des matériaux, par essence pluridisciplinaire, implique une forte synergie, avec de multiples va-et-vient entre les matériaux modèles des physiciens, chimistes et mécaniciens, et le matériau réel de l'ingénieur intégré dans une structure. Cette science tend à l'élaboration de lois de comportement qui peuvent être mécaniques pour la déformation sous sollicitations complexes, chimiques pour la résistance à la corrosion, physiques pour le comportement sous champs (magnétique, irradiant, etc.). Ces lois sont établies sur des relations précises entre structures et propriétés pour donner la réponse du matériau face à un jeu de sollicitations. Elles doivent être simplificatrices mais non réductrices. De plus en plus sera donc prise en compte l'hétérogénéité, i.e.

l'existence des échelles granulaire et sub-granulaire, la présence d'inclusions, de précipités, de pores, de fissures, et leur rôle fondamental dans le comportement macroscopique. Les sollicitations et environnements extrêmes (en température, vitesses, déformations, pression, gradients, dynamique) sont et seront au cœur de nos préoccupations.

Le génie des matériaux, tout aussi pluridisciplinaire, recouvre l'utilisation des matériaux à des fins précises et vise d'une part les relations entre la structure (au sens mécanique) observée à une échelle pertinente et l'aptitude à la mise en œuvre du matériau, d'autre part la tenue en service des composants de la structure.

Dans ce contexte, la préoccupation centrale de la section 09 est celle d'une approche Matériaux pour les propriétés mécaniques, qui se doit d'être faite dans le contexte d'un cycle ou d'une chaîne allant de l'élaboration à l'objet (ou structure) final. La performance, vue sous l'angle d'une optimisation en forme de compromis entre différentes propriétés (résistance et ductilité par exemple), sera recherchée aux stades de l'élaboration, de la mise en forme, de la durée de vie et de la recyclabilité.

L'activité expérimentale est fondamentale en Science des Matériaux. Les progrès récents ne portent pas tant sur l'apparition de nouvelles techniques d'observation et de mesure, que sur l'amélioration de leur résolution, et surtout sur leur accessibilité croissante et leur généralisation dans les laboratoires (observation in-situ des déformations, des transformations de phase, EBSD, (micro-) tomographie X, AFM, etc.), ou sur leur couplage raisonné. D'autre part, la réflexion sur les mesures de champs (voire multichamps) se structure ; des mesures fines de déformation (dépôt de grilles, corrélation d'images) sont souvent des points de passage obligés pour la compréhension des mécanismes microstructuraux de la déformation et surtout de l'endommagement et de la rupture.

Sur le plan de la modélisation des comportements, on dispose d'une palette de techniques à diverses échelles et de techniques de changement d'échelle (à développer pour les problèmes non-linéaires, voir plus

haut). Prenons l'exemple en plasticité : lois de comportement macroscopiques avec variables internes, de microstructure ou d'endommagement ; modèles polycristallins ; dynamique des dislocations ; techniques moléculaires pour certains problèmes. En rhéologie des polymères fondus, le passage se fait directement de la structure moléculaire au continu (comme dans le modèle « Pom-Pom »), puisqu'il n'y a pas de structure intermédiaire identifiable.

Des progrès significatifs ont ainsi été observés au cours des dernières années pour les matériaux de structure, mais les efforts de recherche doivent être maintenus entre autres sur les points suivants.

2.1 RELATIONS MICRO-MACRO, MICROSTRUCTURES/PROPRIÉTÉS/ DURABILITÉ

Pour certains matériaux « simples » et très étudiés car de grande diffusion, on considère comme bien avancées les études de la microstructure à un stade donné de l'élaboration ou de la mise en forme et de son impact sur les propriétés. S'il reste toujours des progrès à faire (prise en compte de la microstructure dans les courbes limites de formage, etc.), la demande émergente et insistante porte sur la mise en continuité de la modélisation prédictive des microstructure et des propriétés (en particulier mécaniques) tout au long du cycle de fabrication.

Pour d'autres, on est moins avancé. La modélisation du comportement des polymères semi-cristallins solides, avec les rôles de la phase amorphe et de l'interface amorphe – cristal, reste à faire. Cette problématique de l'interface se retrouve bien sûr dans les composites (MMC, CMC autant que OMC). L'effort doit s'amplifier sur les matériaux cellulaires, en particulier les mousses métalliques, relativement récentes, autour de leurs propriétés d'absorption des chocs et d'amortissement des vibrations.

L'effort de recherche sur la prévision et l'optimisation du comportement à long terme (durabilité, fiabilité) doit être accentué pour étudier des sollicitations de plus en plus sévères. Pour les contraintes : du cyclique à l'acyclique ; comportement aux très faibles ou très forts niveaux de contrainte. Pour la température : fatigue – fluage, fatigue thermomécanique. Les effets encore mal compris d'environnement et de vieillissement sont capitaux pour bien des matériaux, en particulier organiques. La modélisation prédictive des effets d'interactions (couplage) entre ces facteurs est à développer. Le passage de l'amorçage à la propagation des fissures reste critique.

2.2 DES MATÉRIAUX À FORTE SPÉCIFICITÉ

Du comportement de la glace dépend l'écoulement des calottes glaciaires et ses effets sur le climat. L'anisotropie extrême, les tailles de grains hors norme font de la glace un champ d'expérience rêvé pour pousser les modèles de comportement mécanique à leurs limites. La culture « Science des Matériaux » a bien perfusé dans cette communauté, mais l'application des modèles de Mécanique des Matériaux doit se poursuivre en vue d'une véritable prédictivité.

L'état semi-solide (ou « pâteux ») des alliages métalliques fait intervenir une mécanique des milieux diphasés, solide – liquide ; d'une grande importance dans les procédés d'élaboration, cette mécanique et son inclusion dans les modèles macroscopiques doit être étudiée.

N'oublions pas les biomatériaux, à la fois fonctionnels et structurels, à la fois objets d'études et sources d'inspiration pour créer de nouveaux matériaux. Un chapitre spécifique y revient.

Le domaine des micro- et nanomatériaux et technologies pose, sur le plan mécanique, le problème des effets d'échelle, pour lesquels

la réflexion sur les modèles adéquats va bon train au plan international ; la France n'en est pas absente, mais le passage de ces notions dans le calcul des structures et le calcul des procédés reste à initier.

En résumé, face à une évolution qui verra de plus en plus d'objets demander des matériaux à la fois fonctionnels et structurels, nous espérons une coopération pluridisciplinaire renforcée pour l'amélioration des matériaux existants et la conception et le développement de nouveaux matériaux (composites, cellulaires, à mémoire de forme, etc.) portant sur l'ensemble de leur cycle de vie. Dans le même ordre d'idées, nous demandons le maintien de compétences utiles aux diverses branches de la science des matériaux (comme le savoir-faire en matière d'élaboration de mono- et bicristaux) et un soutien au développement d'outils de sélection des matériaux et des procédés, art par essence pluridisciplinaire.

Enfin, compte tenu de l'évolution actuelle observée dans les Universités et les Grandes Écoles, il devient d'une nécessité vitale de renforcer l'effort de formation, notamment pour la recherche, pour maintenir les compétences et l'expertise stratégiquement indispensables en science et génie des matériaux.

3 – ONDES, VIBRATIONS, PERCEPTION, ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE

L'étude des ondes acoustiques et élastiques se distingue d'abord par le milieu de propagation, fluide ou solide, respectivement. Les sources peuvent être de nature très variée : vibrations de solides, aéro-, électro-, thermoacoustique notamment. La réception se fait par des capteurs divers ; dans l'air l'oreille humaine joue un rôle essentiel. Enfin le traitement des signaux se fait soit numériquement, soit, en ce qui concerne l'être humain, par l'oreille et le

cerveau. L'ensemble de ces problématiques est souvent mis sous l'appellation générale « acoustique », même si les vibrations ou les ondes sismiques, par exemple, ont leur existence propre. Les gammes de fréquences considérées sont également un critère de distinction.

Dans les milieux denses, l'évaluation *non destructive* (END) vise à la détermination *quantitative* des propriétés des matériaux (éventuellement inhomogènes, aléatoires, anisotropes, multiphasiques), qu'ils soient industriels, biologiques, ou géophysiques. Le *contrôle non destructif* (CND) a pour mission de détecter les éventuels défauts et d'en déterminer la géométrie et la nocivité grâce à leur interaction avec les ondes, impliquant des modifications d'amplitude et des conversions de modes. Il s'agit donc de deux problèmes inverses fortement couplés, pour lesquels la compréhension fine des problèmes directs reste à l'ordre du jour. Les diverses techniques d'excitation (prenant en compte les contraintes industrielles telles que l'absence de contact, l'accès unilatéral ou l'intégration dans les structures), l'usage du retournement temporel ou de la propagation non linéaire, sont des sujets importants pour l'avenir. De nombreuses questions, telles la diffusion multiple ou les techniques d'imagerie, sont communes aux autres types d'ondes. L'acoustique pico-seconde permet d'aborder l'évaluation des fibres et des interfaces dans les matériaux composites, ou encore les couches minces (composants de la micro-électronique, etc.).

Les vibrations, linéaires ou non linéaires, se heurtent encore à de nombreuses difficultés, telles que la connaissance de l'amortissement des matériaux, des conditions aux limites, du comportement à moyenne fréquence ou en grande déformation. Les difficultés de la vibro-acoustique s'en déduisent, particulièrement en fluide lourd, où le couplage est fort.

L'aéro-acoustique (génération par les écoulements, ou propagation avec écoulement) prend un nouvel essor avec le développement de la simulation numérique directe, défi des années à venir, et des méthodes expérimentales de mesures de champ de vitesse : *l'acoustique*

aérienne redevient ainsi inséparable de la mécanique des fluides, ce qui permet un approfondissement de l'une et l'autre. La propagation en milieu turbulent, limité ou non, la propagation non linéaire, appliquée notamment au bang sonique ou à la réfrigération acoustique des composants électroniques, ou encore le couplage entre acoustique et combustion, restent des questions largement à explorer.

En simulation numérique, il reste aujourd'hui nécessaire de développer des méthodes approchées, rapides et précises, nécessitant peu de place mémoire, exploitant en particulier les atouts du calcul parallèle (méthodes de décomposition de domaines). Grâce aux schémas d'ordre élevé, dont la dispersion est faible, et grâce aux couches absorbantes à impédance parfaitement adaptée (PML), qui évitent les réflexions aux bords du domaine de calcul, on peut désormais réaliser des simulations longues. Des fréquences de plus en plus élevées sont accessibles, grâce aux méthodes multipôles et aux méthodes de rayons, en progrès constants. Des difficultés demeurent pour prendre en compte les non-linéarités et résoudre des problèmes inverses.

L'acoustique « humaine » est liée au bruit, la communication, la parole ou la musique. Le contrôle du bruit, passif (matériaux absorbants et amortissants, notamment) ou actif, présente toujours des applications importantes. L'étude de la qualité sonore, de la gêne, du confort sont devenues essentielles, en particulier dans les transports, avec les aspects multi-sensoriels. La psycho-acoustique, qui vise à comprendre l'audition, interagit de plus en plus avec les sciences cognitives. Elle est aussi en relation avec les aspects architecturaux, urbanistiques et socio-économiques des sons et du bruit.

Les applications dites « audio » impliquent des études sur le traitement, la perception et le codage des signaux, l'électro-acoustique et la restitution de champs sonores, et sont directement liées à la communication humaine (multimédia) et à la réalité virtuelle : elles deviennent une discipline en soi, mais peu de laboratoires l'abordent globalement. La production du son par les instruments de musique et

celle de la parole, reposant largement sur des mécanismes non linéaires, sont de mieux en mieux comprises et synthétisées : le contrôle de la synthèse, le geste et l'interprétation sont des problèmes fondamentaux de la communication humaine.

Ainsi l'acoustique, largement incluse dans la mécanique, rejoint des disciplines très variées : physique des ondes, sciences de l'univers (acoustique sous-marine et océanographie ; ondes élastiques et géophysique), sciences de la vie (imagerie médicale et audition), sciences humaines et sociales et sciences de l'information et de la communication (bruit, parole, traitement du signal, qualité sonore). Cette donnée est aujourd'hui renforcée par les avancées des outils numériques.

En France, l'ensemble des thèmes ci-dessus est en général bien traité. Les mots clés non linéaire, milieux complexes, aéroacoustique, humain, audio, environnement semblent particulièrement cruciaux dans les développements scientifiques à venir, comme tout ce qui concerne les interactions avec d'autres groupes de disciplines. On note que le CNRS joue un rôle très important puisque environ 60 chercheurs CNRS se consacrent aux thèmes ci-dessus, pour environ 140 enseignants – chercheurs (respectivement 45 et 75 pour la section 09 proprement dite) ; cette forte proportion de personnel CNRS s'explique pas le fait que l'acoustique n'est pas une science de base demandant de très nombreux enseignants, mais justement intègre plusieurs sciences de base. Environ 25 laboratoires s'occupent d'acoustique et vibrations, dont près de 20 au département SPI. 8 laboratoires regroupent plus de 10 chercheurs et enseignants – chercheurs spécialisés dans ces domaines. En ce qui concerne les DEA (et DESS), ils semblent globalement maintenir leur flux d'étudiants. Dans l'industrie, la recherche en acoustique tant physique que perceptive est en France particulièrement développée dans tous les types de transports, et dans l'industrie de l'énergie (Contrôle Non Destructif en particulier). Les applications militaires de l'acoustique sous-marine ont fortement décliné, mais restent importantes.

Enfin de nombreux Centres Techniques et Établissements Publics traitent des aspects liés à l'océanographie (IFREMER), l'acoustique sous-marine (SHOM, GESMA, École Navale), le bâtiment, la ville et les routes (CSTB, INRETS, LCPC), les industries mécaniques (CETIM), aérauliques et thermiques (CETIAT), l'aéronautique (ONERA), ce qui représente plus de 100 chercheurs et ingénieurs travaillant en acoustique.

4 – STRUCTURES, DYNAMIQUE ET CONTRÔLE, GÉOMÉCANIQUE, GÉNIE CIVIL

La mécanique des solides, en association de plus en plus avec d'autres disciplines à travers les couplages multi-physiques, se place au cœur de l'analyse et de la conception, dans des secteurs aussi lourds d'implications sociales et économiques que la construction mécanique, le génie civil et la géomécanique. Elle joue aussi un rôle central dans l'évaluation des structures existantes, et l'élaboration de stratégies de réparation et de sauvegarde. Elle intervient enfin de façon essentielle dans le diagnostic et la prévention de plusieurs catégories de risques naturels (instabilité de versants, avalanches, boues torrentielles, séismes) ou anthropiques (pollution, stockages de déchets, effondrement de sous-sols affectés par des exploitations minières abandonnées).

Les approches traditionnelles limitaient la description du comportement des matériaux à l'utilisation de lois simples, assortie d'une vérification d'appartenance à un domaine de validité ; la sécurité était garantie par l'utilisation de coefficients de sécurité fixés en fonction du risque, et de son acceptabilité. Ces démarches ont dû laisser place à d'autres, qui tentent de décrire plus fidèlement les phénomènes réels à attendre dans les structures en cause. En effet

on cherche aujourd'hui à prendre en compte les états limites des matériaux, et la façon dont ils s'en approchent, les sollicitations extrêmes, les non-linéarités matérielles et géométriques, les couplages divers notamment thermo-hydro-mécaniques, voire chimio-mécaniques comme dans les problèmes de dégradation et de durabilité. La motivation est de concevoir plus juste, en utilisant au mieux les ressources des matériaux, mais aussi de comprendre plus finement, à travers la modélisation, les phénomènes de rupture qui surviennent en cas de sollicitations extrêmes, accidentelles (surcharges, fonctionnement à la limite d'usage) ou fonctionnelles (mise en forme des matériaux, travaux en géomécanique). Les progrès enregistrés récemment, et les enjeux des recherches en cours, se situent notamment dans la prise en compte de la complexité – ou tout au moins d'un degré plus grand de complexité – dans la description du comportement mécanique des matériaux (non linéarités, localisation de la déformation et de l'endommagement, échelles multiples, frottement et contacts unilatéraux), dans la modélisation des couplages multiphysiques, dans la caractérisation fine des sollicitations, et aussi dans le développement remarquable des méthodes d'analyse qui prennent en compte la nature discrète des milieux considérés, par exemple granulaires, et des méthodes d'homogénéisation qui permettent de définir certains aspects du comportement macroscopique à partir de l'analyse au niveau microscopique. D'autres défis sont encore à relever, tel que celui des grandes échelles de temps et d'espace, notamment en géomécanique et à ses frontières avec la géophysique et la géologie.

4.2 GÉOMÉCANIQUE

La géomécanique s'intéresse aux géomatériaux, i.e. sols, roches et par extension béton, et aussi neige et glace. Les difficultés inhérentes à ces matériaux sont d'abord leur caractère naturel, qui implique variabilité et hétérogénéité, à des degrés divers ; et aussi

un spectre extrêmement large de caractéristiques mécaniques et même de comportements, des sables pulvérulents et des argiles molles aux roches très résistantes mais fragiles ; et encore l'importance déterminante des irréversibilités dans le comportement de la plupart d'entre eux. Ces irréversibilités obligent à introduire dans les modèles la non-linéarité non seulement des caractéristiques contrainte – déformation, mais aussi la non-linéarité dite « incrémentale » qui distingue les réponses en terme de vitesse à des sollicitations infinitésimales de différentes directions (typiquement charge – décharge). Un autre aspect caractéristique des modèles, par comparaison avec ceux qu'on utilise pour les métaux par exemple, est leur caractère Non-Standard, qui induit une plus grande susceptibilité aux instabilités et à la bifurcation. Et c'est bien là un des verrous en géomécanique, que la *modélisation des instabilités, de la localisation de la déformation, et de la rupture en général*. Ce verrou bride les progrès notamment dans la prévention des risques naturels. Un autre verrou bien identifié, notamment (mais pas seulement) dans le contexte actuel des études de sûreté des stockages en profondeur de déchets à haute toxicité, est la maîtrise *des couplages chimio-thermo-hydro-mécaniques* : non seulement la modélisation, mais aussi l'expérimentation fine nécessaire à la caractérisation des phénomènes, posent ici des difficultés inédites.

Les laboratoires de géomécanique en France développent des recherches de qualité dans ces directions, à un très bon niveau international comme l'atteste leur participation aux évènements scientifiques internationaux et aussi aux contrats européens. On peut compter, en se restreignant au champ de la section 9, une dizaine de grosses équipes, la plupart associées au CNRS, mobilisant environ 200 chercheurs et doctorants, avec environ 70 permanents parmi lesquels les chercheurs CNRS sont rares. Des approches originales sont développées, qui rencontrent des échos et suscitent des collaborations internationales. D'autres équipes, dans des laboratoires relevant de la section 13, partagent certaines des problématiques de ce thème ; des collaborations existent, qu'il faut

encourager. Du point de vue de l'audience internationale, il faut noter que la géomécanique Française est le moteur, depuis 14 ans, du réseau Européen ALERT qui réunit pas moins de 20 universités européennes, et qui organise chaque année un congrès suivi d'une école qui a formé maintenant plusieurs générations de géomécaniciens européens. Aujourd'hui, en géomécanique, il faut encourager les recherches audacieuses, notamment face à des défis majeurs tels que la modélisation aux grandes échelles de temps et d'espace (quelle base expérimentale ?), en permettant aux équipes de s'investir dans des voies qui ne sont pas nécessairement productives immédiatement en terme d'applications. Les équipements sont coûteux (hautes pressions, fortes charges, température), les expériences, longues, se comptent en semaines voire en mois, les matériaux d'essai sont très difficiles à se procurer.

4.3 GÉNIE CIVIL

Les réseaux nationaux uniques en Europe (GDR, GRECO, GEO) ont structuré la recherche amont en Génie Civil. Celle-ci s'appuie sur une quarantaine de laboratoires universitaires (dont une dizaine associés au CNRS) et environ 300 enseignants-chercheurs (et une dizaine de chercheurs CNRS). Les interactions avec le secteur industriel demeurent faibles, et ce dernier s'y intéresse peu (l'effort de recherche est de 0.2 % du CA). Les chercheurs participent peu aux activités d'expertise et de conseil. La recherche reste peu innovante sur le plan technologique. À l'étranger, la recherche et le secteur professionnel se situent tous deux au premier plan. La restructuration des laboratoires réalisée ces dernières années permet une meilleure visibilité, mais la coopération avec les structures importantes relevant du Ministère chargé de l'équipement présente des marges de progrès.

L'école de modélisation est reconnue au plan international (milieux granulaires, milieux poreux, géomatériaux non saturés, couplages thermo-hydro-mécaniques, endommagement

dans les bétons et les roches, bifurcations et instabilités dans les géomatériaux), *mais il n'en ressort aucun grand code de calcul*. Les couplages sont l'un des thèmes à promouvoir : couplages multiphysiques, couplages multi-échelles, couplages entre approches discrètes et approches continues. Les nouvelles technologies contribuent à l'émergence de nouveaux matériaux (nouveaux bétons, géocomposites). Elles offrent également des possibilités à explorer pour l'instrumentation des ouvrages ou des sites à risques (satellites, lasers, drones, fibres optiques, etc.), et contribuer à la fois à la surveillance et la modélisation numérique (validation, analyse inverse).

La gestion des déchets (radioactifs ou non) reste toujours un problème d'avenir, la déconstruction des ouvrages également. La prévention des risques naturels (glissements, avalanches) concernent des géomatériaux peu étudiés (neige, laves torrentielles) et imposent une modélisation pluridisciplinaire : initiation de la rupture, écoulement gravitaire, impact sur les infrastructures.

Les travaux sur le vieillissement et la durabilité des ouvrages en béton ont connu un essor très important ces dernières années. Poussé par des motivations économiques liées à la conservation du patrimoine construit, ainsi qu'aux questions de réparabilité et de sûreté, dynamisé par l'apport du développement des connaissances sur les mécanismes microscopiques de dégradation du béton et par des efforts importants consentis sur le plan expérimental, le champ d'investigation qui s'ouvre est immense. Les phénomènes à décrire et à comprendre couvrent plusieurs échelles de temps et d'espace, les interactions entre les transferts de fluide, la thermochimie, la mécanique sont extrêmement fortes. Les verrous actuels concernent la construction de passages micro-macro englobant l'ensemble des phénomènes aujourd'hui identifiés avec la difficulté supplémentaire d'une évolution constante de la morphologie de la microstructure, l'explicitation du lien entre variables d'endommagement mécanique globales identifiables à l'échelle d'une structure et description de la microstructure, indispensable du fait des

couplages évolutifs, enfin la prise en compte de l'ensemble de cette phénoménologie dans le calcul des structures dans leur environnement et sur des durées importantes.

4.4 STRUCTURES

Le calcul des structures est une discipline clé au sein de la section 09. Outil permettant de finaliser et capitaliser un grand nombre de connaissances en vue des applications industrielles ou scientifiques, il est aussi un moyen d'exploration des comportements non-linéaires des matériaux et des structures ; il rend enfin possible l'accès aux conditions réelles subies par les corps d'épreuves dans des expérimentations toujours plus complexes mettant en jeu des couplages multiphysiques nombreux. Son domaine d'application ne cesse de croître, par la variété des structures soumises au calcul comme par celle des échelles étudiées.

Les progrès continus des machines de calcul, des algorithmes et des formulations des différents problèmes étudiés contribuent et contribueront encore largement dans le futur à cette progression. Les évolutions attendues concernent :

- les calculs de grande taille et la sous-structuration, associée ou non au calcul simultané de phénomènes à plusieurs échelles ;

- le traitement des interfaces et des contacts dont le nombre et la complexité de comportement croissent rapidement sous l'effet de la demande très forte d'un réalisme plus poussé dans la description physique, réalisme permis par les avancées en tribologie ;

- enfin le traitement des problèmes raides tant pour les couplages faisant intervenir plusieurs champs de grandeurs mécaniques ou physiques que pour les fortes non linéarités comme celles liées à l'endommagement ou l'amorçage et la propagation de fissures.

L'apparition de méthodes permettant de s'affranchir du remaillage ou du suivi de frontières, matérielles ou non, stimulera de

nouveaux champs d'application. L'optimisation structurale, qui recherche les formes ou les répartitions optimales de matériaux pour remplir une fonction donnée au moindre coût devrait également progresser et entrer dans les laboratoires comme un outil de conception de systèmes mécaniques ou de compréhension des structures naturelles.

Si la maîtrise de la qualité des calculs a fait de très notables progrès au cours des dernières années, les outils et les concepts forgés, pour beaucoup en France, sont encore insuffisamment incorporés dans les calculs des structures réelles, faute d'outils numériques suffisamment diffusés. De même, les approches probabilistes, qui cherchent à répondre aux questions de robustesse de la conception ou à celles des incertitudes sur les résultats produits restent encore cantonnées dans des communautés spécialisées faute de la diffusion de cette culture dans les formations initiales (même si des efforts importants ont été faits ces dernières années). Ce qui est en jeu ici, c'est pourtant la prédictibilité de la tenue mécanique ou des évolutions dans le temps des structures et des ouvrages, cohérente avec les demandes de la société (mesure et si possible maîtrise des risques).

4.5 DYNAMIQUE ET CONTRÔLE

En dynamique des milieux continus et des structures comme dans la majorité des autres champs de la section 09, l'exploration et la maîtrise des non linéarités et des effets liés à l'hétérogénéité sont les éléments essentiels (avec un angle d'attaque souvent probabiliste) de description et de compréhension des régimes de réponse des grandes structures aux sollicitations extrêmes ou de service, des phénomènes de propagation d'ondes en milieux complexes, des interactions diverses maintenant prises en compte (interaction fluide-structure, aéroélasticité ou interaction sol-structure). Illustrant la spécificité du Département SPI qui est d'aller, au-delà de la compréhension

des phénomènes, vers les problèmes liés aux applications industrielles et à l'ingénierie, on peut relever deux thématiques très vivaces dans la communauté des mécaniciens dynamiciens : la *modification des structures* (ou la conception améliorée de celles-ci), et le *contrôle des structures en service*.

En ce qui concerne la première de ces thématiques, des efforts importants ont été consentis et des progrès très notables ont été réalisés dans le domaine de la réduction des vibrations et des bruits pour les véhicules de transport comme pour d'autres objets ou installations industrielles. Cependant le domaine des hautes fréquences reste encore d'un abord difficile sur le plan prédictif, du fait de la grande dispersion présentée par le comportement de systèmes dans lesquels jouent la présence d'un grand nombre de modes, les effets de l'amortissement (fonction de la fréquence), les nombreuses interfaces particulièrement difficiles à décrire dans cette gamme de fréquences, enfin les interactions très fortes entre sous-structures. Des démarches de construction de modèles hybrides utilisant à la fois des résultats de mesure et des modèles numériques constituent une approche alternative intéressante au recalage complet, maintenant assez bien maîtrisé, des grands modèles numériques. Des gains très importants peuvent être attendus en particulier dans l'analyse et la prédiction de modification de structures existantes en vue d'améliorer leur comportement vibratoire ou acoustique, ou des évolutions successives lors de leur conception.

Dans le cadre de la seconde thématique, il faut noter que la dynamique et le contrôle des réponses de structures de forme complexe, éventuellement couplées à un environnement interne et/ou externe, et soumises à des excitations plus ou moins sévères voire extrêmes (vibrations, crash, impacts, chocs) est une problématique majeure dans la conception et le dimensionnement des structures pour la réduction des coûts associés aux problèmes de sécurité et de confort. Or ces structures sont fortement hétérogènes, et les liaisons et interfaces plus ou moins complexes, la présence d'un environnement (interactions

fluides-structures de type vibro-acoustique ou aéro-hydro-élastique) engendrent des disparités de longueur d'onde qui laissent ouvert le champ d'application de procédures micro-macro. Un enjeu important réside dans la modélisation des interfaces : faut-il partir de la dynamique moléculaire ?

Il serait donc nécessaire, à côté de méthodes impliquant le recours à un très grand nombre de degrés de liberté afin de tenir compte des échelles des phénomènes mis en jeu, de développer des méthodes plus « praticables » (modèles réduits) permettant d'optimiser ces systèmes par des analyses de sensibilités (à des paramètres certains ou incertains).

Le mot-clé « contrôle », au-delà de la modélisation, amène la problématique innovante des méthodes technologiques de réduction des effets dynamiques à l'aide de dispositifs adéquats. Citons à titre d'exemple le recours à des matériaux spécifiques (piézoélectriques, électrostrictifs, alliages à mémoires de forme, etc.) pour constituer des systèmes « intelligents » avec électronique de commande intégrée (contrôle des vibrations, contrôle de forme, etc.). Nous entrons donc dans l'ère de systèmes « intelligents » adaptatifs avec des aspects nano/micro/méso/macro permettant de tenir compte des diverses échelles de temps et d'espace avec des degrés de précision variables selon les besoins.

5 – TRIBOLOGIE, SURFACES, INTERFACES

- La tribologie concerne l'étude des contacts et des matériaux formant le contact, pour analyser et maîtriser le frottement et l'usure soit à sec, soit en présence de lubrifiant ; elle étudie aussi l'adhésion, phénomène souvent néfaste en frottement, mais utilisé pour l'assemblage des corps solides. Science pluridisciplinaire, son développement longtemps empirique s'appuie

depuis plus d'un demi-siècle sur les connaissances acquises et sur les outils développés à partir de la mécanique des solides, de la mécanique des fluides, de la thermique, de la physique, de la chimie, de la science des matériaux, des mathématiques appliquées, voire de la biologie pour les applications médicales. Elle fait appel maintenant aux moyens modernes d'investigation tels que les microscopies en champ proche ou la simulation numérique multi-échelle.

L'implication industrielle de la tribologie est particulièrement forte, tant le frottement, l'usure et la dégradation des surfaces sont des facteurs souvent limitants dans les mécanismes, les systèmes, ou les procédés de mise en forme et d'assemblage. Pour s'attaquer à ces nombreux et difficiles problèmes, la tribologie française compte trois gros laboratoires en partie dédiés ; au moins deux autres laboratoires comptent des équipes de plus de 10 personnes ; des groupes plus faibles numériquement sont dispersés dans une vingtaine d'autres. On peut estimer l'effectif à une centaine d'enseignants – chercheurs, dont une quinzaine de chercheurs CNRS. On notera son fort impact international, avec trois Médailles d'or de la Tribologie en 10 ans. Elle est pourtant quasi-absente de domaines très porteurs tels que la tribologie des moyens de stockage de l'information (couches minces et lubrifiants pour disques durs), du fait de l'inexistence de cette industrie en France.

La gamme des échelles d'étude du contact est très large. L'épaisseur du film lubrifiant est très diverse, de quelques nanomètres à plusieurs millimètres. Si l'on peut étudier le contact isolé, il est le plus souvent nécessaire, dans les applications, de le plonger dans le système auquel il participe : le chargement, la cinématique et la dynamique du système conditionnent les caractéristiques du contact, tout en étant fortement tributaires. L'étude de la sous-structure du contact (hétérogénéité liée à la rugosité) donne une troisième échelle, fortement couplée. On descend même à l'échelle atomique dans des simulations de dynamique moléculaire du frottement entre couches adsorbées ou en film lubrifiant ultra-mince.

Depuis longtemps, on s'attache à coupler contact et mécanisme (élasto-hydrodynamique, plasto-hydrodynamique), et à modéliser les transitions d'échelle dans des modèles statistiques de contact incluant la rugosité (contact sec rugueux, équation de Reynolds avec rugosité). Le développement des méthodes numériques (éléments finis, différences finies, volumes finis) et de nouvelles techniques de mécanique du contact (FFT, méthodes multigrilles) permettent maintenant un calcul déterministe des contacts secs ou lubrifiés à rugosité aléatoire, au moins en régime élastique. C'est manifestement une des voies d'avenir que d'intégrer ainsi les échelles micro- et mésoscopique, en allant vers les déformations non linéaires (micro- et/ou macro-élastoplasticité, endommagement, détachement de particules). De même, le couplage entre les échelles méso- et macroscopique, celle du mécanisme, continue son développement, en contact lubrifié (élasto-hydrodynamique) ou sec.

- Dans le cas des **contacts lubrifiés** on peut distinguer, par ordre de sévérité croissante :

- l'hydrodynamique (HD) à gaz ou à liquide. Les recherches actuelles concernent les couplages fluide – structure avec phénomènes dynamiques et thermiques, déformation élastique des structures, comportement non newtonien de certains lubrifiants ;

- l'élastohydrodynamique (EHD), ainsi que la plasto-hydrodynamique (formation des films continus dans les procédés de mise en forme par déformation plastique). Sur le plan numérique, l'étude des films les plus fins (quelques nm) et la transition vers le régime limite posent de difficiles problèmes de convergence. Mais le principal obstacle à la modélisation prédictive est le comportement des lubrifiants, non newtonien, très difficile à mesurer sous des pressions de 2 à 3 GPa et des vitesses de cisaillement élevées (10^7 s^{-1}). Les mesures in situ (si possible multi-champs) dans un système EHD, couplés à la modélisation EHD inverse pour identifier les lois de comportement, sont certainement la meilleure piste ;

– la lubrification mixte pour laquelle, en l'absence de formalisme complet, on voit apparaître des modèles simplifiés mais assez généraux. Les aspects mécaniques et physico-chimiques des surfaces et de l'interface doivent être couplés pour prévoir les caractéristiques du contact ;

– la lubrification limite et extrême-pression, gérée par la « tribochimie ». Ces réactions multiformes activées par les hautes températures et les vitesses de cisaillement élevées du contact sous haute pression ne sont pas encore complètement connues en dépit de progrès continus dans lesquels l'apport de la tribologie française est bien reconnu. Le besoin de remplacer certains additifs pour des raisons environnementales fournit de nouveaux sujets de recherche. Machines à Forces de Surfaces, analyses d'extrême surface, Microscopies en Champ Proche sont, avec les calculs de dynamique moléculaire et de chimie quantique, des techniques prometteuses pour l'identification des mécanismes réactifs, des produits actifs présents sur les surfaces, de leurs propriétés rhéologiques et tribologiques.

• Dans le cas des **contacts secs**, c'est l'évolution des solides en contact qui va généralement dicter la nature et le comportement de l'interface. Les conditions cinématiques et géométriques déterminent les transformations surfaciques des matériaux et le devenir d'éventuels produits de l'usure. Quelques méthodes générales de raisonnement analysent la compétition entre l'usure produite par le contact et les possibilités d'adaptation cinématique offertes par le troisième corps ainsi libéré :

– les mouvements alternés de faible amplitude (« fretting ») induisent des usures étudiées au travers de cartes de Transformations Tribologiques Superficielles (TTS) ;

– les contacts répétés induisent des fatigues superficielles. On modélise le comportement en fatigue des matériaux sous les sollicitations complexes calculées par la mécanique des contacts élastoplastiques ou élastohydrodynamiques ;

– la lubrification par lubrifiants solides, introduits dans le contact ou formés in situ, est traitée de façon analogue aux contacts HD ou EHD. La loi de comportement peut être étudiée par des essais de nano-indentation, ou par la mécanique des milieux granulaires ;

– l'évaluation des efforts dans les contacts solides est bien maîtrisée par des modèles développés en Mécanique des Solides élastiques ou élastoplastiques. Les modèles incluent si besoin est la rugosité, ainsi que la présence de revêtements superficiels.

- Souvent efficaces pour contrôler frottement et usure, auxiliaires précieux de la lubrification, les revêtements constituent un des champs majeurs de la tribologie. Leur élaboration (en phase liquide, gazeuse, procédés plasmas, etc.) dicte leurs propriétés mécaniques et tribologiques (donc la protection offerte au substrat). L'approche systémique s'impose, car l'étude du revêtement n'a aucun sens en dehors du substrat qui conditionne sa structure et sa résistance sous des conditions de contact données. Un des enjeux majeurs est la mesure de l'adhérence et des propriétés mécaniques, en général par indentation normale (micro- et nano-dureté) et tangentielle (micro-rayure) ; modélisation du contact et simulation numérique sont des clés de l'identification du comportement.

L'adhésion est une composante souvent importante des phénomènes de frottement. Son étude, par la mécanique et la physico-chimie, a de nombreuses applications très pratiques : avarie de contacts secs ou lubrifiés (grippage) ; contact pneu/route ; instabilités de frottement, stick/slip et bruit de crissement (essuie-glaces, lèche-vitres) ; tenue des revêtements, etc. L'application de la mécanique linéaire de la rupture a beaucoup fait progresser ce domaine. Celle des méthodes d'étude des systèmes dynamiques le fera probablement.

Le collage s'appuie sur la physique du contact des interfaces, la chimie, la rhéologie, la mécanique de la rupture ; il constitue une discipline connexe à la tribologie. Ses applications, collages structuraux dans les industries aéronautiques, automobiles, du bâtiment, etc. sont des plus importantes – et en progression.

Les principaux problèmes :

- vieillissement des adhésifs et des interfaces (fonction du niveau de contrainte appliqué, du degré hygrométrique ; leurs effets couplés méritent d'être étudiés). On retrouve des thèmes proches de la fatigue des matériaux, en l'occurrence des polymères ;

- évaluation non destructive des interfaces et joints collés ;

- interprétation des essais mécaniques de jonctions adhésives ;

- prise en compte de tels joints dans un calcul de structure, comme celle des autres modes d'assemblage d'ailleurs : elle reste un problème ouvert.

- On peut en conclusion souligner la similitude d'évolution entre la tribologie, étude des surfaces et interfaces, et la mécanique des matériaux et des structures « en volume » : passage des lois macroscopiques vers des lois incluant l'hétérogénéité à micro-échelle, transitions d'échelles par des méthodes statistiques ou déterministes, difficile identification de lois de comportement en conditions extrêmes, couplages multi-physiques, dynamique et instabilités sont les mots-clés actuels dans les deux cas.

6 – SYSTÈMES MÉCANIQUES, MICRO-SYSTÈMES, ROBOTIQUE, FABRICATION, SYSTÈMES DE PRODUCTION

La production d'objets manufacturés utilise des procédés de fabrication, d'assemblage et de montage de plus en plus divers et complexes – et les utilise à leurs limites, en termes de temps de cycle, de sollicitations des outillages et des matériaux. L'ingénierie simultanée a pour objet de prendre en compte tous ces aspects dès la conception, y compris

les facteurs humains (mais la synergie entre « producticiens » proches des SHS et mécaniciens n'est pas très vivace en France). La modélisation des procédés eux-mêmes (élaboration, mise en forme, traitements thermiques, usinage, revêtements ou traitements de surface, assemblage, jusqu'au démontage et au recyclage), doit encore progresser, pour améliorer la prévision (instabilités, endommagement, rupture, fatigue et durée de vie, propriétés physico-chimiques diverses) notamment en sollicitations extrêmes (usinage à grande vitesse), et opérer une optimisation automatique du procédé, vaste champ à peine défriché. Cependant face aux objets et systèmes complexes, la modélisation atteint parfois ses limites : elle ne permet qu'un pré-réglage approximatif, compensé par un contrôle « en ligne » (capteurs, signaux, images, « défectologie ») débouchant sur une régulation automatique (réseaux neuronaux, intelligence artificielle – STIC).

Dans le cadre d'une demande industrielle forte en validation de modèles, l'expérimentation, d'autant plus lourde que les processus sont complexes, exige des plates-formes technologiques (ou centres techniques) qui, quand elles existent, sont aujourd'hui insuffisamment instrumentées pour la recherche. Les laboratoires ne peuvent que rarement assurer seuls leurs maintenances. Au-delà de la validation, la compréhension de certains phénomènes, comme lors du contact outil/matière, et l'analyse de la fiabilité des procédés profiteraient de cet effort d'instrumentation.

Les micro-systèmes, assemblages dans un même composant d'un actionneur, d'un capteur et d'une électronique, ont vécu leur « âge d'or » dans la période 1995-2000. La communauté française compte quelques dizaines de chercheurs permanents (dont une poignée de mécaniciens, mieux représentés dans le secteur privé), appréciés pour leur aptitude à aborder des aspects théoriques ; mais ces groupes de recherche n'atteignent pas une taille critique (une dizaine de chercheurs) pour tenir leur rang dans la communauté internationale, où domine la diffusion par voie de congrès. Le retard français en matière de capteurs acoustiques est ainsi

patent. La recherche française, y compris le CNRS, dispose cependant de centrales technologiques capables de fournir les micro-dispositifs prototypes. Leur ouverture à des équipes voulant s'impliquer dans les micro-systèmes doit être améliorée, d'autant que la réalisation de nombreux prototypes n'est pas toujours onéreuse, et que la micro-fabrication reste l'objectif d'un projet « micro-système » (on ne peut s'arrêter au stade de la seule conception). Les perspectives de recherches directement discernables au cœur du SPI concernent la maîtrise des contraintes mécaniques dans les micro-systèmes, le contrôle actif de structures à base de MEMS, l'absorption acoustique active et, plus exotique, l'aérodynamique adaptative. Dans ce dernier domaine la réalisation de nano-drônes ou insectes artificiels focalise un certain nombre d'enjeux scientifiques liés à l'échelle envisagée (autonomie d'énergie, conception d'ailes battantes souples à géométrie contrôlée par nano-actionneurs), et suppose le franchissement d'un seuil jamais atteint dans le domaine de l'intégration physique de composants électroniques et mécaniques.

Actuellement un glissement s'opère vers les nanosciences, où les micro-systèmes ont un rôle d'interface à jouer (micro-manipulation, Bio-MEMS), sans négliger des domaines plus spécifiques à l'échelle micrométrique : micro-fluidique, micro-systèmes pour les télécommunications (RF-MEMS, filtres électromécaniques hautes fréquences, micro-commutateurs) et l'optique (MOEMS, routage optique), pour la réfrigération acoustique des composants. Dans ces secteurs, les enjeux scientifiques relevant de la section 09 concernent l'amélioration de la modélisation mécanique des matériaux en films minces microstructurés remplissant plusieurs fonctions, éventuellement biocompatibles (Bio-MEMS), la microgénération d'énergie pour la télécommunication mobile ou les micro-robots. Pour conclure, dans ce domaine très interdisciplinaire, si les verrous relèvent de domaines divers (science des matériaux, des surfaces et interactions pour ce qui concerne la section 09), l'intégration repose essentiellement sur la science mécanique.

En robotique, le contrôle – commande joue évidemment un rôle important ; les recherches dans ce domaine sont généralement réalisées par des équipes qui relèvent du département STIC. Les aspects mécaniques concernent les jeux, les frottements, les flexibilités et de plus en plus des matériaux d'action (AMF, piézo) permettant dès la conception de réaliser des robots performants, particulièrement en micro-robotique et en robotique médicale.

7 – BIOMÉCANIQUE, MÉCANIQUE CELLULAIRE ET TISSULAIRE, ACCIDENTOLOGIE, MÉCANIQUE DU MOUVEMENT HUMAIN

Les études en mécanique des matériaux vivants qui relèvent des domaines d'expertise de la section 09 concernent différents végétaux (plus particulièrement le bois), l'être humain et les animaux. En biomécanique de l'être humain, les travaux portent d'une façon générale sur l'analyse des mouvements humains (marche, posture, geste professionnel ou sportif, éventuellement en situation de choc), l'étude des biomatériaux et l'ingénierie tissulaire, la biomécanique ostéo-articulaire, la biomécanique du rachis, du muscle, la biomécanique cellulaire et la rhéologie.

La biomécanique a un caractère fortement pluridisciplinaire pour lequel les apports significatifs nécessitent des collaborations entre biologistes, chimistes, mécaniciens, physiciens, médecins et chirurgiens. Cette transdisciplinarité, ajoutée à la faiblesse de la demande industrielle en France, conduit au sein du CNRS à un positionnement difficile des recherches et des chercheurs. La France dispose d'un potentiel de recherche académique important qui offre de nombreuses opportunités d'innovation pour

l'industrie et les entreprises françaises. La réussite économique et industrielle des projets les plus originaux dépend de la capacité de ces entreprises à répondre à la demande d'un marché mondialisé. Mais ces possibilités d'innovations sont parfois rendues difficiles par les nécessaires lois bio-éthiques.

La biomécanique est abordée au sein du département des sciences de l'ingénieur, et en particulier en section 09, au travers de deux approches par ailleurs complémentaires. La première est la mécanique appliquée à la biologie. La deuxième est la mécanique du vivant, plus risquée et plus innovante. Son point de départ est l'observation du vivant et son objectif la compréhension et l'explication des mécanismes. Ceci nécessite le développement d'outils expérimentaux et de modèles dédiés au vivant. Dans la section 09, peu de laboratoires développent cette deuxième voie, alors que des travaux relevant de la première sont réalisés par un grand nombre d'équipes.

L'acquisition des connaissances biomécaniques peut-être réalisée à différentes échelles : étude des tissus biologiques, de segments corporels isolés ou du corps tout entier. Les expérimentations sont délicates, en raison bien évidemment de la nature même des tissus étudiés et des grandes variabilités multifactorielles observées. Elles sont réalisées sur sujets ou pièces anatomiques, ainsi que sur des sujets volontaires (expérimentation non lésionnelle ne comportant aucun risque pour les sujets).

7.1 L'IMAGERIE

L'imagerie est un élément essentiel de la biomécanique, qui permet d'accéder avec précision aux caractéristiques géométriques des matériaux biologiques, mais aussi à certaines de leurs caractéristiques mécaniques. Il y a dans ce domaine en France une expertise certaine, en particulier dans les techniques ultrasonores. L'imagerie peut aussi être interventionnelle pour aller vers la planification du geste chirurgical. La chirurgie assistée par ordinateur a pour objectif

d'assister le chirurgien dans la réalisation de gestes diagnostiques ou thérapeutiques les plus précis et les moins invasifs possibles, sous sa supervision. Mais ce domaine d'application concerne plus directement les compétences d'autres sections et peu de chercheurs de la section 09 sont concernés.

7.2 MATÉRIAUX VIVANTS

La complexité extrême des systèmes biologiques et de leur structure met en jeu différents types d'hétérogénéités qui requièrent plus qu'une adaptation des modèles classiques, de par la diversité des formes, des dimensions ou des structures des éléments constitutifs et de leurs variabilités dans le temps et l'espace. Ces études de structures hiérarchiques sont indissociables en biomécanique, pour des approches réalistes qui permettent de lier le moléculaire au microscopique et le microscopique au tissu. L'étude des réponses mécaniques de ces structures à des sollicitations statiques et dynamiques, ainsi que l'étude des lésions qu'elles engendrent, est toujours un problème important pour de nombreuses applications.

En mécanique de l'os, en particulier pour aborder les problèmes de micro-fissures, de vieillissement, de modelage et croissance et de remodelage, l'étude des relations entre ruine ou endommagement du tissu osseux, d'une part, et celles entre la structure et son évolution, d'autre part, sont nécessaires et font l'objet de nombreux travaux. Le rôle des différentes cellules et les mécanismes intimes sous l'action des forces appliquées (mécano-transduction cellulaire) n'est pas complètement compris.

En mécanobiologie, les processus de différenciation et de développement des tissus musculo-squelettiques (os, cartilage, tendons, ligaments, etc.) sont au centre des problèmes de cicatrisation et de consolidation des fractures. Il est d'un haut intérêt de comprendre les rôles de leurs complexes mécanismes intimes et de leur coordination multifactorielle dans la genèse et la réparation tissulaire : la

méconnaissance des détails des mécanismes complexes qui régissent l'activité musculaire, le chargement mécanique du squelette osseux, et le fonctionnement des articulations est un des blocages pour le transfert efficace des connaissances de la biomécanique musculo-squelettique vers l'application clinique, mais aussi dans l'étude des déterminants du mouvement humain.

7.3 PROTHÈSES ARTICULAIRES

Une meilleure compréhension des mécanismes d'échecs des arthroplasties est un problème important de santé publique. Les activités développées sont plus particulièrement centrées sur l'étude des interactions des corps en présence, qu'il s'agisse d'interactions entre matériaux inertes ou entre tissus biologiques et matériaux biocompatibles. Différentes échelles sont considérées pour ces interactions : tissus/matériaux, cellules/matériaux, problèmes d'adhésion biomatériaux/matière vivante.

Un manque majeur porte sur la méconnaissance des sollicitations effectivement vues par les articulations ; l'analyse de ces sollicitations doit obligatoirement intégrer le contact. Des éléments de compréhension sont certainement à tirer d'études des articulations naturelles qui intégreraient l'ensemble des facteurs tribologiques. Par ailleurs, l'influence de la synovie est actuellement mal comprise, et donc mal prise en compte dans les diverses modélisations.

Concernant les matériaux, l'étude de leurs revêtements doit être menée ; la lubrification et la tribo-corrosion, importantes dans l'usure des matériaux, sont à considérer. Les matériaux fonctionnalisés pourront quant à eux être considérés aussi bien pour la reconstitution du tissu osseux que pour les problèmes qu'ils soulèvent lors de l'extraction d'une prothèse.

7.4 MÉCANIQUE DU CORPS HUMAIN

En accidentologie ou en biomécanique des chocs, l'objectif est de contribuer à l'amélioration des conditions de sécurité des usagers des différents modes de transport, en améliorant la protection des usagers contre les accidents. Cet objectif nécessite de produire des connaissances sur la réponse aux chocs de l'être humain, associée à l'analyse des mécanismes lésionnels, et de les transférer vers des outils d'évaluation : mannequins d'essais de choc, modèles numériques du corps humain.

En mécanique du mouvement humain, on s'intéresse en particulier à la compréhension des interactions entre posture, équilibre et mouvement. L'objectif est de connaître les mécanismes centraux et périphériques impliqués dans la programmation de la propulsion et/ou de l'équilibre dans la marche ou la chute, pour des sujets adultes ou enfants sains, pathologiques ou prothésés. Les domaines d'applications concernent le mouvement dans le loisir, le travail, les déplacements et le sport. Dans ce dernier cas, on s'intéresse aux traumatismes sportifs (les études rejoignent alors celles développées en biomécanique des chocs) et à l'amélioration des performances par l'analyse des paramètres biomécaniques pertinents pour l'optimisation du geste sportif. L'analyse du mouvement va sans doute prendre de l'importance dans les applications cliniques, en particulier pour la récupération et le handicap.

L'offre de formation en biomécanique en France est en pleine évolution, en particulier avec la mise en place des projets de réforme des différents cycles de l'enseignement supérieur dans les différentes UFR au sein des universités (Sciences, STAPS, Médecine, etc.), mais aussi par la création de filières dans des écoles d'ingénieurs ou même d'écoles de bio-ingénierie.

8 – SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

- De toutes les rubriques ressortent les mêmes évolutions majeures de ces dernières années :

- prise en compte de l'hétérogénéité ;
- modélisation multi-échelle en espace, voire en temps ;
- étude sous sollicitations complexes (multiaxiales/multiphysiques/extrêmes/dynamiques).

Il ne fait aucun doute que cette tendance maintenant bien amorcée restera un fait majeur des années à venir, appuyé sur la puissance de calcul croissante. Plus les modèles sont sophistiqués et précis, plus ils soulignent le besoin de données d'entrée fiables et adaptées. La modélisation multi-échelle prédictive, éventuellement couplée au calcul à l'échelle de la structure, est une partie de la réponse. Une autre est à chercher dans l'identification des paramètres de plus en plus nombreux de lois de plus en plus réalistes. Il paraît certain que cette identification se fera sur des systèmes et sous des sollicitations complexes, proches de la réalité, voire sur le système réel même, à l'aide de modèles et logiciels aux performances croissantes : la modélisation inverse sera partout. Dans cette optique, les méthodes expérimentales devront suivre, fournir des informations plus riches, et ce sera un des défis à relever (mesures de champs – de plusieurs champs).

La puissance de calcul n'est cependant pas la seule réponse à la complexité. Les méthodes éprouvées ou naissantes du calcul des structures resteront d'actualité, les exemples qui suivent ne prétendant pas à l'exhaustivité :

- qualité des modèles numériques et adaptativité de maillage permettant de calculer juste au moindre coût, à travers la définition de critères mécaniquement pertinents (erreur en loi de comportement, etc.). Le cas des problèmes couplés reste d'une pleine actualité ;

- réduction de modèles (représentations dimensionnelles réduites, élimination de détails peu influents, modèles hybrides, etc.) : la méthodologie doit s'enrichir, l'automatisme progresser ;

- prise en compte des incertitudes : devant la complexité et parfois l'imprévisibilité des milieux étudiés (géomatériaux, matériaux biologiques, matériaux sous sollicitations extrêmes), les progrès dans les applications passeront par le développement des méthodes mathématiques adaptées (des méthodes de Monte Carlo vers les éléments finis flous ou stochastiques).

- De plus en plus, les problèmes « continus » résolus, on devra se pencher sur les instabilités, sur les discontinuités, les interfaces, la rupture. La modélisation des liaisons entre les pièces, dans les structures, est un enjeu important ; en amont, les aspects scientifiques des procédés d'assemblage (soudage, collage, rivetage, etc.) ont été trop peu étudiés. Conséquence de la non linéarité et de l'hétérogénéité, les effets d'échelle sont déjà connus sur les matériaux (nano-indentation) et leurs conséquences lors des procédés de micro-fabrication commencent à être perçues – mais pas étudiées en France à ce jour. La course à la miniaturisation, au nanométrique, ne peut qu'amplifier ces effets, en particulier en multipliant les interfaces. Les modèles de comportement à longueur caractéristique interne (lois de second gradient, milieux enrichis) restent peu appliqués, bien que de mieux en mieux maîtrisés.

Les laboratoires de la section 09 mènent des recherches qui ont vocation à se développer jusqu'à l'application finale aux procédés industriels ou aux problèmes posés par la société. Cela conduit à traiter des situations complexes, c'est-à-dire dont les multiples facettes appellent naturellement la coopération interdisciplinaire, soit par importation de techniques mises au point dans d'autres disciplines, soit par collaborations. Certains domaines sont naturellement à cheval sur des frontières disciplinaires actuelles : mécanique des milieux granulaires ou poreux, acoustique,

interactions fluide – structure, voire tribologie sont des exemples d'interfaces entre Mécanique des Solides et Mécanique des Fluides. D'autres sujets doivent mettre en relation des milieux scientifiques différents. Trop rarement sollicités par les programmes interdisciplinaires du CNRS, nous devons développer les interactions avec les Mathématiques Appliquées (instabilités, systèmes dynamiques, méthodes stochastiques), les STIC (micro-systèmes sous l'angle mécanique, contrôle actif, imagerie en CND), les STIC-SDV-SHS (interaction homme/son), SDU (géomatériaux : sols, neige et glace ; géomécanique, des ouvrages à le tectonique ; acoustique, vibrations et sismique), la Chimie des Matériaux (de façon à couvrir tout le cycle de l'élaboration au recyclage : sous l'angle des relations structure – propriétés mécaniques, chaque stade de la vie du matériau est déterminant pour les suivants). Au sein du Génie Mécanique, il faut absolument mieux articuler la liaison entre la Mécanique proprement dite et l'étude des méthodes de conception/productique, qui fait appel aux compétences de SHS et des STIC. Enfin, la Biomécanique, par l'accidentologie, l'étude mécanique de la matière biologique et des matériaux de prothèses, mais aussi l'acoustique (étude du bruit, psycho-acoustique, imagerie US) sont naturellement en contact avec les Sciences de la Vie et même au service de l'art médical.

Cette ouverture devra aussi se faire sentir au cœur même du champ disciplinaire de la section, actuellement centré sur le comportement structural (traduisons : gouverné par les propriétés mécaniques) des matériaux et des structures. D'ores et déjà, si la distinction matériau/structure reste évidente en termes pratiques, elle l'est beaucoup moins sur le plan des approches scientifiques : tout matériau étudié à fine échelle, en tenant compte de son caractère hétérogène, devient une (micro-) structure, c'est-à-dire un ensemble d'éléments en interaction, et est modélisé et calculé comme tel. Presque tous les matériaux biologiques (os, ligaments, muscles, bois) sont de merveilleux exemples de structures hiérarchiques adaptatives, souvent multifonctionnelles.

La multifonctionnalité sera un point clé des matériaux de demain. C'est déjà vrai souvent :

- un textile répond à des exigences mécaniques par son (ses) matériau(x) et sa structure (plus précisément ici, sa texture) ; ces aspects sont étudiés par des laboratoires de la section 09. Mais il est aussi barrière thermique, d'étanchéité ; il doit être agréable au toucher : mécanique et physico-chimie du contact ; bientôt objet thérapeutique, outil de communication, pour ne rien dire des aspects psychologiques – esthétiques – voire sociaux ;

- l'emballage agro-alimentaire en polymères associe généralement une couche à vocation structurale et des revêtements destinés à la protection du contenu par l'étanchéité aux gaz ;

- les matériaux poreux et fibreux doivent associer des performances thermiques, mécaniques, acoustiques.

Dans le cadre des Sciences pour l'Ingénieur, l'intégration de la multifonctionnalité, associée au besoin d'optimiser, suppose que soient pris en compte la nature chimique, les procédés d'élaboration, de transformation et d'assemblage, les microstructures et les défauts induits, le comportement mécanique en service, les effets couplés notamment avec l'environnement, la recyclabilité. Pour répondre à ces défis, il faut construire une véritable capacité d'ingénierie des matériaux et des structures, par une volonté d'aboutir à des outils de modélisation et de simulation numérique. La multifonctionnalité conduira naturellement à associer à la mécanique des compétences présentes dans d'autres sections du Comité National. C'est dans cette optique que la succession de l'actuelle section 09, dans un contour quelque peu remodelé et élargi, pourrait se réaliser sous l'intitulé « Ingénierie des Matériaux et des Structures, Mécanique des Solides, Acoustique ».

ANNEXE

LISTE DES ACRONYMES

CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment	MOEMS	Micro-Opto-Electromechanical Systems
FFT	Fast Fourier Transform	AFM	Atomic Force Microscopy
EHD	Elasto Hydro Dynamique	AMF	Alliage a Memoire de Forme
TTS	Transformations Tribologiques Superficielles	MMC	Metallic Matrix Composite
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems	CMC	Ceramic Matrix Composite
RF-MEMS	Radio Frequency Micro Electro Mechanical Systems	OMC	Organic Matrix Composite
		EBSD	Electron Back Scattered Diffraction
		PML	Perfectly Matched Layers
		SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

