

09

INGÉNIERIE DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES – MÉCANIQUE DES SOLIDES – ACOUSTIQUE

Président de la section
Alain COMBESURE

Membres de la section
Stéphane ANDRIEUX
Yves AUREGAN
Yves BRÉCHET
Bruno DAMBRINE
Jacques-Jean-Marie DESRUES
Danielle FORTUNE
Pierre GILORMINI
Mustapha JOUIAD
Jean-Pierre LEFEBVRE
Nathalie MAUREL
Denis MAZUYER
Stéphane PAGANO
Étienne PATOOR
Gilles PERRIN
Jean-Dominique POLACK
Luc RÉMY
Gilles REQUILÉ
Daniel J. RIXEN
Pierre SARAMITO
Frédéric VALÈS

PRÉAMBULE

Ce document a été écrit collectivement par les membres de la section 09 avec l'appui de directeurs de laboratoires et de membres bien connus de la communauté. Cette initiative a été lancée dès le début du mandat de la présente commission, et vient d'aboutir à un texte transmissible. La rédaction a été initiée et coordonnée par le président de la section. Le travail a commencé par une remise en perspective à partir du rapport de conjoncture de la section précédente, dont les conclusions sont portées en annexe. Ce document essaye de proposer une vision de la communauté sur son essence et sur ses évolutions.

1 – LES ENJEUX

1.1 UNE RECHERCHE NÉCESSAIRE AU DÉVELOPPEMENT D'EMPLOIS INDUSTRIELS DURABLES

• Les disciplines représentées dans la section 09 sont à la fois **des disciplines de**

savoir, et des disciplines de l'ingénierie. On les retrouve aussi bien dans l'activité de **génération de connaissances de base**, que dans la démarche de **mise en œuvre de ces connaissances** dans des **réalisations concrètes**.

Les projets européens qui ont réussi comme Airbus, Ariane, le secteur automobile, le Nucléaire, reposent sur une compétence scientifique et technologique forte. Les technologies qui sous tendent ces succès industriels dépendent fortement des recherches scientifiques menées par les sections 09 et 10 du CNRS : mécanique des structures et des solides, science des matériaux, énergétique, acoustique et mécanique des fluides. Les défis qui sont relevés par cette communauté sont essentiels : allègement et sécurité des structures, diminution du bruit, maîtrise des consommations énergétiques, confort. **Ces travaux se sont faits sans tapage médiatique excessif, mais avec une grande efficacité et une réussite industrielle évidente.** La compétition avec les industriels d'outre mer et d'extrême orient est très vive et repose bien souvent sur des **défis technologiques, la recherche d'améliorations** et d'optimisation incrémentales **allant de pair avec la recherche de solutions en rupture.** Ces solutions en rupture sont souvent aux interfaces entre la mécanique, la science des matériaux et le génie des procédés, disciplines qui sont de façon unique rassemblées dans les sections 09 et 10. Parallèlement, le raccourcissement des cycles d'introduction dans les produits industriels des innovations ou des ruptures, essentiel dans la compétition mondiale, doit s'appuyer sur un corps de disciplines, de compétences et d'outils qui se trouvent au cœur de la communauté que rassemblent les sections 09 et 10.

- Au-delà des domaines traditionnels des transports, de la production de l'énergie, des structures du génie civil, les concepts et les méthodes développées dans ces disciplines trouvent des champs d'applications nouveaux et fertiles dans le domaine des microtechnologies (mécanismes de dommage dans les circuits intégrés, microfluidique, optimisation des MEMS) aussi bien que dans le domaine des

sciences du vivant (biomécanique, bioadhésion, thérapie génique, etc.). Ce sont **des disciplines** à la fois **indispensables aux enjeux de la santé** (outils pour la santé, compréhension des mécanismes d'évolution des cellules par exemple, etc.), **aux secteurs fondamentaux de notre économie** industrielle, mais aussi **de plus en plus cruciales dans le développement des industries dites de pointe.**

1.2 UN OUTIL DE COMPRÉHENSION DU MONDE CONCRET

Ces sciences permettent de faire le lien entre les découvertes de la physique et la réalité concrète. Au-delà de l'exigence de « comprendre pour comprendre », les disciplines de l'ingénierie revendiquent une volonté de « **comprendre pour faire** ». Les lois fondamentales de la physique, de la chimie, de la mécanique s'incarnent en quelque sorte dans les réalisations de l'ingénieur, et **inversement les problèmes issus des questions pratiques d'ingénierie génèrent des questions scientifiques de fond. C'est dans cet aller retour permanent entre le domaine du savoir et celui du faire que se situe une des originalités majeures des disciplines représentées dans les sections 09 et 10.** Par exemple pour faire un voguer un bateau ou voler un avion il faut effectivement avoir bien compris les lois de la physique comme le principe d'Archimède par exemple mais cela ne suffit pas ! Il faut savoir concevoir les objets, dimensionner les structures, optimiser les matériaux et leurs procédés de mise en œuvre.

1.3 IMPORTANCE DÉCISIVE DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE POUR LA COMPRÉHENSION

Les disciplines en question se construisent dans un équilibre dynamique entre les

études expérimentales et les approches théoriques. D'une part la variété toujours grandissante des matériaux disponibles a stimulé des études expérimentales innovantes aussi bien en mécanique, en acoustique qu'en science des matériaux. Mais il est également très clair que les sciences mécanique acoustique et matériau ont fait ces dernières années des progrès considérables dans la compréhension des phénomènes physiques en faisant le lien entre les expérimentations sur les matériaux et les simulations numériques, en particulier celles faisant appel à des calculs intensifs. Les progrès des hardwares et logiciels informatiques ont permis aux scientifiques de construire des modèles de la réalité et de les inclure dans des méthodes numériques permettant de simuler des situations complexes, aussi bien en terme de matériaux qu'en terme de géométries et de sollicitations, et de les comparer avec des études expérimentales. Ces progrès permettent d'aborder la réalité de manière très différente mais aussi de bien mieux appréhender des phénomènes complexes et couplés : on est par exemple maintenant capable de simuler complètement le déploiement et la chute d'un parachute et donc de comprendre pourquoi et comment les parachutes fonctionnent concevoir des structures de parachutes complètement nouvelles et originales. De même les approches multiéchelles de la simulation du comportement des matériaux (couplées avec les observations de micro structures) apportent une excellente compréhension des effets des interactions entre les échelles sur le comportement et la rupture. Un troisième exemple concerne les approches multiphysiques qui sont développées pour la prévision du comportement des sols et bétons par exemple. Enfin une part importante de l'augmentation de la sécurité et du confort des transports est due à cette nouvelle maîtrise. C'est une véritable révolution culturelle qui est en cours dans ces domaines : l'optimisation des structures permettant de limiter les coefficients de sécurité, le développement de « matériaux sur mesure » sont les microstructures optimisées pour des cahiers des charges mécaniques, acoustiques, thermiques complexes. Les exigences du développement durable sous ten-

dent cette évolution : on ne peut plus se contenter d'utiliser l'existant, il faut « développer sur mesure », et cette démarche exige une compréhension profonde, quantitative et prédictive des relations causales entre toutes les échelles des phénomènes élémentaires. Enfin, la société demande de plus en plus d'assurance sur les conséquences, y compris lointaines ou connexes, de l'introduction des nouveautés permises par la science : maîtriser le principe de précaution afin qu'il ne soit pas un frein systématique et opaque nécessite là encore une compréhension profonde des systèmes complexes et une capacité à les modéliser pour pouvoir en explorer le fonctionnement.

1.4 UN APPORT DÉTERMINANT POUR LA QUALITÉ ET LA FIABILITÉ DANS LES SCIENCES DU VIVANT ET LES NANOSYSTÈMES

Des champs très nouveaux de développement et d'application de ces disciplines s'ouvrent dans plusieurs directions : la « mécanique » du vivant est en plein essor par exemple dans la modélisation de la biomécanique des tissus mous et des os ou la modélisation du comportement du bois. Un des exemples les plus médiatisés est l'apport de la modélisation thermo hydro mécanique pour la maîtrise de l'évolution dans le temps du tableau de la Joconde. On peut également citer les apports déterminants de cette science pour l'élastographie qui ne peut se comprendre à partir du seul traitement du signal. Le dernier exemple qui semble intéressant est lié au développement des micro et nanosystèmes qui rencontrent des difficultés, car ou bien ils ne fonctionnent pas comme attendu (sur ces systèmes extrêmement petits la surface est très grande par rapport au volume et les phénomènes qui pilotent le fonctionnement se situent aux interfaces alors que les méthodes traditionnelles s'appliquent la plupart du temps aux volumes), ou bien leur durée de vie est très limitée et donc leur fiabilité insuffisante, ce qui peut leur être très rapidement fatal.

Ces innovations techniques sont clairement issues d'autres champs disciplinaires que ceux représentés dans la section 9. Leur viabilité en tant que réalisation de l'ingénieur dépend grandement des contributions que peuvent apporter nos disciplines à la résolution des problèmes concrets qu'ils rencontrent.

1.5 UNE SCIENCE DE L'ÉQUILIBRE ET DU MOUVEMENT

La discipline se trouve comme on le voit bien à la croisée des sciences physiques, chimiques et des mathématiques appliquées. S'appuyant sur les acquis de chacune, elle n'est réductible à aucune d'entre elles. Les sciences mécaniques et la science des matériaux sont un exercice de l'équilibre et du mouvement, c'est-à-dire de la juste mesure entre une simplification abusive et une sophistication excessive. Il n'est par exemple pas nécessaire de résoudre les équations de la mécanique quantique pour évaluer la rupture des pièces mécaniques. Mais de proche en proche l'analyse de la chimie et de la thermodynamique des alliages permettra d'en contrôler la microstructure, la modélisation de la thermomécanique des pièces offrira un contrôle des hétérogénéités spatiales, la micro-mécanique de la rupture reliera les aspects microstructuraux aux mécanismes et à la cinétique de l'endommagement que la mécanique des solides intégrera pour donner à la mécanique des structures des lois de comportement et des critères de rupture. Sur cet exemple très simple, on comprend que les disciplines qui émergent à la section 9 sont, par le fait même d'y être rassemblées, les mieux à mêmes de réaliser les « transitions d'échelle » qui sont aujourd'hui reconnues comme indispensables pour une conception optimisée, aussi bien pour les sollicitations usuelles que les sollicitations sévères, aussi bien pour les performances immédiates que pour la performance dans la durée.

1.6 UNE RECHERCHE QUI RÉPOND AU BESOIN ESSENTIEL DE SÉCURITÉ DES PERSONNES ET DES BIENS

Un des caractères distinctifs des scientifiques de la section 09 est qu'ils travaillent sur les problèmes technologiques qui concernent la sécurité des personnes et des biens. L'essentiel de leur travail est en effet lié à la prévision de la durée de vie et à la résistance des objets aux sollicitations de la vie quotidienne mais également aux situations exceptionnelles et accidentelles. Il s'agit de prévoir et d'assurer une bonne sécurité des objets et ainsi de se prémunir contre les risques technologiques. Il s'agit également de construire la base scientifique des outils de gestion de la durée de vie des installations industrielles ou de génie civil. Ce champ ouvre lui-aussi de très nombreuses perspectives scientifiques par exemple dans le domaine de la prise en compte du caractère probabiliste incontournable de la description des phénomènes et de la prise de décision, ou encore dans celui du développement de méthodes d'assimilation des données mesurées, issues de la vie réelle l'ouvrage, et des problèmes inverse ou d'identification. Ce travail est un travail de fond et a aussi de nombreux impacts économiques dans la mesure où il se situe d'abord au niveau de la prévention des risques, et dans un second temps à celui de la gestion des conséquences des incidents ou accidents. Cette recherche est donc extrêmement importante, car d'une part elle a pour effet de limiter les accidents au maximum et d'autre part, elle permet d'assurer la sécurité technologique à un coût minimal et maîtrisé.

Les enjeux sociétaux associés à ces questions sont considérables.

1.7 LES ENJEUX SCIENTIFIQUES ESSENTIELS EN 2007

Pour la section 09 les enjeux essentiels se placent sur deux échelles de temps et sur deux directions complémentaires.

Pour ce qui est de la discipline elle-même

On peut classer les actions en fonction de leur échelle de temps :

Sur une échelle à 5 ans

Il s'agit de pouvoir apporter des réponses concrètes et exploitables à des questions assez bien connues sur le plan fondamental mais inexploitées sur le plan pratique du fait de la lourdeur des analyses et d'autre part d'approfondir des domaines spécifiques. Les points les plus stratégiques sont :

- l'étude expérimentale et la simulation numérique des effets de l'élaboration des pièces et des matériaux sur leur durée de vie : il s'agit de prévoir la qualité des élaborations et leurs effets sur la qualité des pièces fabriquées ;

- le développement de techniques de calcul performantes en dynamique et en non linéaire ;

- les méthodes de simulation numérique sont disponibles mais leur efficacité est très moyenne : l'attente des chercheurs et des industriels est de voir un gain de plusieurs ordres de grandeur sur les temps de calcul. Ceci peut être attendu du seul gain de performance des calculateurs mais des gains plus rapides et qui se cumulent avec les précédents peuvent être attendus de part des stratégies bien choisies. Ce domaine nécessite une excellente maîtrise de la physique simulée et ne peut être du seul ressort des spécialistes de l'analyse numérique ;

- l'assemblage de matériaux multifonctionnels qui permet des conceptions innovantes et robustes et des ruptures technologiques. La prise en compte de leur désassemblage qui est indispensable à un recyclage efficace ;

- les méthodes de conception multiphysique et multimatériaux qui prennent en compte au moment de la conception tous les phénomènes physiques à maîtriser mais permettent également de faire des sauts qualitatifs sur la réalisation des structures.

Pour ce qui est de l'approfondissement de la connaissance (temps caractéristique 10 ans)

On peut mettre en avant les domaines suivants :

- le multiéchelle espace temps ;

Comment les échelles interagissent entre elles dans le comportement mais surtout lors de la dégradation et de la rupture des matériaux ?

Quelles sont les échelles pertinentes à prendre en compte pour une prévision macroscopique ?

En dynamique transitoire : quelles sont les échelles pertinentes et comment se combinent-elles ?

- le développement des identifications à partir des mesures de champ sur lesquelles la France occupe une position de pionnière ;

- les développements de la micro et nano mécanique et acoustique ;

- la mécanique de l'incertain : cette discipline concerne principalement les sols les matériaux naturels et humains mais aussi la prévision de l'intégrité et des risques naturels (séismes) ;

- la compréhension des mécanismes de déformation et de rupture de matériaux enchevêtrés ou à structure complexe (mousses composites, os, milieux granulaires cimentés ou non, milieux multi-phases, etc.) par couplage d'imagerie 3D in situ et de simulation numérique multiéchelle ;

- le comportement des matériaux « mous » naturels : peau, organes, membranes, etc. En particulier la prise en compte dans leur modélisation de la spécificité du vivant, à savoir sa capacité d'adaptation et d'autoguérison.

Pour ce qui concerne les sujets de recherche dont le centre de gravité des compétences est la section 9 mais qui demandent des interactions avec d'autres sections

On peut distinguer :

– la prise en compte de la perception dans la conception des matériaux et des structures : confort acoustique, qualité sonore visuelle ou tactile de telle pièce ou assemblage. Ces recherches nécessitent un continuum et des interactions fortes et quotidiennes entre des spécialistes du traitement du signal, des membres des SHS spécialistes de la « linguistique », et des acousticiens ou mécaniciens suivant les domaines d'application ;

– le vaste domaine de la « mécanique du vivant » ou les interactions avec la biologie sont essentielles ;

– la prévision et l'étude des interactions entre physiques :

– a) le domaine de l'interaction fluide structure est bien développé mais reste à approfondir notamment pour tout ce qui concerne l'aéroacoustique,

– b) le domaine de la thermo hydromécanique connaît un développement très important actuellement, notamment dans les géomatériaux avec des implications environnementales qui nécessitent des interactions avec la géochimie et le géophysique,

– c) la thermo métallogie conditionne la qualité de l'élaboration des matériaux à haute température,

– d) le couplage avec la chimie (migrations d'espèces dues aux gradients hydriques et de températures) est très important également et demande une forte compétence en expérimentation fine et en simulation,

– e) les évolutions microstructurales au cours des procédés et en particulier des procédés de mise en forme, et leurs conséquences sur le comportement mécanique,

– f) l'électro acoustique,

– g) le traitement du signal, science de la perception et acoustique ou mécanique.

Ces domaines sont très vastes et les chercheurs de la section 09 ne peuvent apporter des avancées déterminantes que dans le problème où sa compétence est concerné de manière principale : par exemple la maîtrise, c'est-à-dire la prévision des distorsions lors du séchage du bois a besoin de connaissances en chimie, en thermique, en écoulement de fluide, et en mécanique mais l'objet de la recherche est principalement mécanique.

2 – POSITIONNEMENT NATIONAL ET INTERNATIONAL

2.1 NATIONAL

Les disciplines de la section 09 sont pratiquées par d'autres EPIC mais elles ne sont pas le cœur de leur compétence. On peut citer le CEA qui développe les applications nucléaires, l'ONERA centré sur l'aéronautique et l'espace, l'INRA sur les questions des biomatériaux. Des organismes professionnels comme le CETIM, l'INRETS, le LCPC et le CSTB par exemple développent plutôt une valorisation de la recherche que des actions très approfondies. Assez peu de recherches à long terme sont menées de manière autonome dans le monde des entreprises. Ces entreprises (EDF, SCNCF, Renault, PSA, ARCELOR, St Gobain, ALCAN, etc.) ont des centres de recherches souvent performants mais leurs actions sont à plus court terme et limitées aux applications qui les concernent. Bien souvent également elles méconnaissent les recherches menées dans d'autres types d'industrie. Par exemple les entreprises du secteur nucléaire ignorent les pratiques des industries automobiles, et inversement. La section 09 est peu dotée en laboratoires propres (2 UPR). La plupart des

chercheurs des laboratoires de la section sont donc en contact permanent avec des enseignants chercheurs et positionnés dans des UMR dépendant du département Ingénierie mais aussi de tutelles qui sont pour le plus grand nombre des écoles d'ingénieur. L'originalité de toutes les équipes de recherche est de produire une connaissance amont qui est commune (mise en facteur) à toutes les domaines applicatifs (industriels, de la culture, ou de la santé par exemple). La recherche sur le comportement des « coques » très minces sert tout aussi bien au lancement d'Ariane V qu'à la prévision des vibrations des instruments de musique, qu'à la compréhension de la déformation des parois des globules rouges lors de leur passage à travers des membranes. Les laboratoires sont aussi des ponts entre les diverses industries qui ont concentré leurs efforts sur quelques domaines spécifiques et qui sont souvent mal armées pour aborder de problèmes nouveaux. La section se positionne donc clairement comme un centre de recherche amont en mécanique science des matériaux et acoustique qui peut prendre des risques scientifiques, en s'engageant sur des recherches qui ont pour objet le pourquoi et risquent de ne pas apporter les résultats escomptés dans un délai inférieur à dix ans. Elle est également le centre de gravité d'outils numériques qui ont structuré la communauté mécanicienne et permis une capitalisation effective des connaissances : les grands codes de calcul généralistes, utilisés aujourd'hui tant par la recherche que par l'industrie.

2.2 INTERNATIONAL

La France a une position originale et particulière dans la scène internationale. On peut affirmer qu'elle tire sa position particulière de sa bonne maîtrise des concepts de la thermodynamique et des mathématiques. En général les français se distinguent par des recherches très novatrices sur des sujets peu abordés, un peu en décalage avec les modes actuelles : on peut observer une sorte de « french touch ».

Les Français sont connus principalement sur les sujets scientifiques suivants :

- la mécanique théorique et mathématique ;

- la mécanique numérique, en particulier autour des outils avancés et innovants de simulation numérique ;

- la mécanique thermodynamique ou l'école française a une excellente renommée internationale en particulier pour tout ce qui concerne le cadre d'élaboration des modèles de comportement matériaux mais aussi les modèles thermodynamiques pour les interactions entre physiques et les couplages ;

- les mesures de champ où ils savent marier technique expérimentales de pointe comme l'imagerie 3D et simulation numérique ce qui permet des avancées spectaculaires dans la compréhension du comportement et de la rupture des matériaux ;

- l'acoustique musicale et ultrasonore ;

- la physique de la plasticité des métaux et des polymères et les outils de simulation numérique pour les changements d'échelle, du défaut au milieu continu anisotrope.

Cependant on remarque un manque d'intérêt certain des chercheurs pour l'engagement dans les structures de recherche qu'elles soient associatives ou institutionnelles, sauf pour l'acoustique. Cet esprit « gaulois » nuit à la visibilité que la communauté mérite sur le plan international.

On remarque par exemple que la communauté Française de la section 9 est toujours parmi les deux premières en Europe (et très souvent la plus nombreuse) à présenter des communications dans les congrès mais n'est que très représentée dans les instances internationales. C'est un point faible qu'une instance comme le CNRS pourrait aider à améliorer.

3 – MOYENS ACTION ET ORGANISATION À MOBILISER AU CNRS

La communauté est caractérisée par un nombre de chercheurs relativement petit et probablement trop dispersés au sein de nombreux laboratoires ne dépendant pas tous de la section. Elle serait peut être plus visible et plus forte si elle était rassemblée dans des structures plus importantes. Un congrès organisé régulièrement (une fois tous les 4 ans par exemple) pour les chercheurs CNRS de la section pourrait peut être aider.

La section gagnerait certainement si l'on favorisait l'accueil temporaire de chercheurs étranger de haut niveau ainsi que des jeunes étrangers prometteurs. Un accueil d'ingénieurs de recherche des EPIC et laboratoires industriels est intéressant.

La section devrait développer les structures mixtes entreprises CNRS pour mieux diffuser et écouter les besoins : cela permettrait de

plus d'assurer un meilleur transfert vers le tissu industriel.

Sur le plan des relations internationales il nous semble que la première priorité pour le CNRS est de développer des liens structurels avec quelques équipes bien choisies et de mettre en place une expérimentation sur des laboratoires Franco-asiatiques (Chine, Inde, Japon).

Il nous semble intéressant de revoir les frontières avec les physiciens les chimistes et la section 10, sur l'acoustique et les matériaux (par exemple les matériaux granulaires).

Il n'y a pas de volonté clairement affichée par le CNRS sur cette discipline : une manière de mobiliser les énergies en recherche serait de lancer un programme amont par an, financé de manière significative sur l'un des points forts cités plus haut et sur un thème à risque scientifique et ceci directement à l'échelle de l'Europe.

Enfin un soutien du CNRS à l'engagement des chercheurs dans les structures européennes et internationales semble stratégique et motivant.

ANNEXE

ANNEXE 1 : SYNTHÈSE DES PROPOSITIONS DU RAPPORT DE CONJONCTURE DE LA SECTION PRÉCÉDENTE

L'hétérogénéité des milieux complexes est au centre des évolutions de la discipline ; la coopération interdisciplinaire dans les recherches n'en est qu'une conséquence, la multifonctionnalité venant compléter les caractéristiques

des tendances en cours particulièrement sensible *dans le domaine des applications*, incontournables en Ingénierie. Une telle analyse milite, à côté d'autres paramètres comme la petite taille actuelle de la section, pour un remodelage et élargissement des contours de la future section 09 que nous avons voulu traduire dans son nouvel intitulé désirant englober l'ensemble de la thématique de l'ingénierie des matériaux et des structures. Dans le même mouvement, la section tient à affirmer son intérêt pour tous les systèmes impliquant, couplés avec d'autres, des comportements structuraux, qu'il s'agisse de systèmes artificiels, naturels et même vivants.

La nouvelle section s'intitule pour le prochain mandat,

Ingénierie des matériaux et des structures, Mécanique des solides, Acoustique

avec les sous-thèmes :

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

– ondes, vibrations, perception, évaluation non destructive ;

– milieux continus, hétérogénéité, couplages multi-physiques, systèmes discrets, milieux granulaires et poreux ;

– relations microstructures/propriétés mécaniques ;

– structures, dynamique et contrôle, géomécanique, génie civil ;

– tribologie, surfaces, interfaces ;

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

– biomécanique, mécanique cellulaire et tissulaire, accidentologie, mécanique du mouvement humain.

La thématique « matériaux » reste éclatée sur plusieurs sections (05, 15 et 09) et départements (Chimie MIPPU et ingénierie). Le rééquilibrage souhaitable entre les sections 09 et 10 ne s'est pas accompli dans les faits. C'est ainsi que les communautés des milieux granulaires et poreux restent divisées entre les deux sections.

