

LA MÉCANIQUE DU FUTUR ET LA RECHERCHE EN SCIENCES MÉCANIQUES

Rapport de l'Académie des sciences et
du Haut Comité Mécanique

19 novembre 2019

Photo de couverture :

Mesure de déformation par corrélation d'images lors d'un essai de traction biaxiale.

Laboratoire de Mécanique et Technologie, CNRS, École normale supérieure de Paris-Saclay.

Table des matières

Avant propos	5
Synthèse.....	6
Recommandations	7
I - La mécanique au cœur d'un monde en mouvement.....	9
II - Les grands défis que doit relever la mécanique du futur	11
II. 1 - Des défis sociétaux.....	11
II. 2 - Des défis économiques.....	11
II. 3 - Les défis scientifiques.....	13
II. 4 - Une situation internationale en évolution accélérée.....	14
II. 5 - Les défis de la formation	14
III - La mécanique du futur	15
III. 1 - L'industrie et les technologies du futur	15
III. 2 - Un cœur de discipline et des domaines émergents.....	16
III. 3 - La mécanique et la révolution numérique	17
III. 4 - La formation	18
IV - Conclusions et perspectives.....	19
Annexe A - La mécanique : des sciences, des technologies, des métiers, des industries.....	21
A. 1 - La mécanique, une discipline scientifique	21
A. 2 - La mécanique, un domaine technologique	22
A. 3 - Les métiers du mécanicien	22
A. 4 - La mécanique dans l'industrie	23
Annexe B - La mécanique des fluides : un état des lieux de la recherche en France.....	23
B. 1 - Éléments de contexte historique.....	23
B. 2 - Les révolutions de la fin du XX ^e siècle	24
B. 3 - Les lignes de force des recherches actuelles	25
B. 4 - Interactions avec d'autres communautés	27
B. 5 - Périmètre, effectifs et moyens de la communauté nationale	28
Annexe C - Quelques repères en mécanique des solides et des structures	30
C. 1 - Bases théoriques et avancées récentes	31
C. 2 - Calcul des structures et simulations numériques.....	33
C. 3 - Des applications de plus en plus complexes	33
C. 4 - Rayonnement international.....	34
C. 5 - La biomécanique, une composante essentielle	34
C. 6 - Les interactions avec l'acoustique.....	34

C. 7 - Résumé de quelques perspectives pour le futur	34
Annexe D - Transferts thermiques et énergétique	36
D. 1 - Domaines scientifiques et avancées récentes	36
D. 2 - Les orientations	39
D. 3 - La position française par rapport à l'international	41
D. 4 - Conclusion.....	41
Annexe E - La combustion et l'énergie	41
E. 1 - Bases théoriques et avancées récentes.....	42
E. 2 - Résumé de quelques perspectives pour le futur	43
E. 3 - Simulation à haute performance	45
E. 4 - Enjeux industriels et sociétaux.....	45
E. 5 - Rayonnement international.....	46
E. 6 - Conclusion	46

Avant propos

Ce document a été préparé dans le cadre d'un groupe de travail rassemblant des membres de l'Académie des sciences et des membres du Haut Comité Mécanique (HCM). Les réflexions menées à partir du printemps 2018 avaient pour objectif de traiter de la mécanique du futur et des recherches en sciences mécaniques en s'appuyant sur le *Livre blanc de la recherche en mécanique* réalisé en 2015 sous l'égide du HCM. Ces réflexions devaient être concrétisées sous la forme d'un rapport montrant l'importance de la mécanique et des sciences mécaniques, décrivant à grands traits les évolutions récentes et les champs de recherche émergents. Le présent avis propose une synthèse, des recommandations et il traite du rôle de la mécanique par rapport aux grands défis économiques et sociétaux, il décrit à grands traits les grands défis scientifiques et les champs de recherche émergents, l'évolution de la situation au niveau international, les défis de la formation, de l'industrie et des technologies du futur, des opportunités ouvertes par la combinaison de la mécanique et du numérique. Face à des enjeux de premier ordre, ce rapport recommande de faire le pari de la recherche, il souligne la nécessité de soutenir recherche et formation dans ce domaine, d'œuvrer au rapprochement des mondes de la recherche, de l'innovation et de l'industrie, d'intensifier les échanges entre tous les acteurs et d'engager une dynamique de progrès pour ce secteur dans son ensemble.

Synthèse

Les sciences mécaniques constituent l'un des piliers de la connaissance. Sciences millénaires, elles sont parmi les premières à avoir permis le développement des connaissances scientifiques et d'une grande variété d'applications. Leurs fondements ont été établis par les trois plus grands physiciens que l'humanité ait probablement connus (Galilée, Newton, Einstein). Historiquement la France est un des berceaux de la mécanique rationnelle (D'Alembert, Lagrange, Laplace, etc.) et de la mécanique des milieux continus. Son approche analytique a toujours fait merveille pour mener à bien les grands projets de construction métallique et de génie civil (tour Eiffel, canal de Suez, viaduc de Millau, aéronautique, lanceurs spatiaux...). Les sciences mécaniques désormais classiques ont fondé les méthodes de conception dans des domaines vitaux pour la société (production d'énergie, transports, matériaux, construction, génie civil, environnement, procédés) et sont une des principales sources du développement industriel, en particulier dans le cadre de l'industrie du futur. La force des sciences mécaniques ne réside pas seulement dans leur capacité à produire des solutions, mais aussi et surtout dans celle de les concevoir et de les rendre possibles.

Aujourd'hui, à l'ère du numérique, des données massives et des ciseaux génétiques, on pourrait penser que les progrès dans le domaine de la mécanique sont moins nécessaires, que les connaissances sont suffisantes et que les investissements devraient être faits ailleurs. Et pourtant les sciences mécaniques ont encore de nombreux défis à relever de nos jours et elles ont aussi à profiter pleinement des nouvelles possibilités offertes par le développement du numérique. L'objectif de cet avis est précisément de montrer que ce domaine devrait être consolidé pour les raisons suivantes :

- (1) **Filière importante en France** à la fois en termes de production et d'emplois, les industries mécaniques constituent un socle indispensable à l'économie du pays. Pour répondre aux enjeux de la mondialisation, la France doit maintenir un effort soutenu de recherche, de développement et d'innovation pour améliorer la compétitivité et renforcer son potentiel industriel en privilégiant les productions à fort avantage concurrentiel.
- (2) **Dans la compétition scientifique intense** engagée avec l'arrivée de nouveaux acteurs, notamment ceux de pays en forte industrialisation comme la Chine et l'Inde, certains pays (États-Unis, Allemagne...) ont structuré l'écosystème de recherche et d'innovation notamment par la mise en place de centres d'excellence sur l'industrie du futur visant à rapprocher les acteurs. La France ne peut se contenter d'assister en spectateur aux développements scientifiques qui se feraient ailleurs. Même si des investissements ont été réalisés (PIA) et des dispositifs ont été mis en place (Instituts Carnot, IRT, SATT...), il reste beaucoup à faire au regard des enjeux.
- (3) **Des développements scientifiques** récents permettent d'envisager les problèmes complexes actuels et notamment ceux qui sont associés aux grands défis sociétaux du changement climatique, de la transition énergétique, du renouveau industriel, du développement durable, de la mobilité et des systèmes urbains durables, de la production éco-responsable, de l'environnement et de la santé. Le monde de demain sera demandeur de solutions dont beaucoup se trouvent dans le domaine de la mécanique.
- (4) **Des questions nouvelles apparaissent aux frontières** de la mécanique, de la physique, de la science des matériaux, de la chimie et de la biologie et notamment celles qui ont trait au micro et nanotechnologies et à la biomécanique, ainsi qu'aux nouvelles méthodes de fabrication et aux matériaux architecturés.

- (5) **Au-delà des applications industrielles**, les sciences mécaniques sont importantes, dans une variété de domaines allant de la prévision météorologique à la simulation du climat, à l'analyse des risques sismiques et à la propagation des incendies, etc.
- (6) **La convergence entre le numérique et la mécanique**, déjà exploitée dans le domaine de la conception et de la fabrication, ouvre de nouvelles possibilités associant la mécanique, l'intelligence artificielle et les données massives, la mécanique assurant le lien indispensable avec le monde physique dans lequel nous vivons.

Recommandations

Ces recommandations s'adressent aux décideurs et aux acteurs du domaine.

- **Soutenir la recherche en sciences mécaniques** au niveau fondamental, en associant expérimentation, modélisation et simulation et en donnant également toute sa place à la recherche technologique. Ce soutien pourrait être concrétisé par un programme « Blue Sky » ciblé sur les sciences mécaniques dans le cadre de l'ANR. Les recherches dans le domaine de la mécanique sont porteuses d'innovations nécessaires à l'avenir industriel de la France. Elles constituent aussi des enjeux de premier ordre dans la réponse aux défis sociétaux.
- **Promouvoir le rapprochement entre le monde industriel (y compris les petites et moyennes entreprises et les entreprises de taille intermédiaire) l'écosystème de l'innovation et la recherche académique.** Appuyer les organisations, et les dispositifs (contrats Cifre, chaires industrielles, etc.) permettant d'intensifier les échanges entre les acteurs. Limiter le nombre des structures créées dans les années récentes (Instituts Carnot, IRT, Satt) et les intégrer dans le système de recherche pour qu'elles puissent mieux jouer le rôle d'appui au transfert et à l'innovation.
- **Appuyer les recherches aux interfaces des disciplines** et pour cela encourager les projets rassemblant des équipes d'horizons différents pour s'attaquer aux phénomènes complexes multi-physiques actuels.
- **Encourager les développements des technologies nécessaires pour « l'Industrie du Futur »** en consacrant une part suffisante de financements au développement de recherches dans le domaine de l'ingénierie numérique, de la simulation de procédés et de produits, de la réalité augmentée, des procédés innovants (fabrication additive...), de l'automatisation des procédés, de l'utilisation des robots dans la production manufacturière et du recours aux matériaux architecturés.
- **Être présent au niveau international** en prenant une part active dans les programmes coopératifs européens, en développant les projets bilatéraux et en appuyant les candidatures aux bourses de l'ERC dans le domaine de la mécanique.
- **Faire évoluer les formations** au moyen de pédagogies innovantes associant expérimentation, modélisation et simulation afin qu'elles soient encore plus attractives pour les jeunes, plus en phase avec les besoins de compétences nouvelles et futures des entreprises, et pour que les mécaniciens puissent jouer pleinement leur rôle d'intégrateur de technologies et d'architectes industriels de systèmes matériels complexes.
- **Mieux communiquer** sur la diversité des enjeux ainsi que sur l'importance et la richesse scientifique et technologique du secteur ; tirer parti de la formidable source d'idées que constitue l'ensemble des recherches en cours dans les laboratoires de mécanique français et s'attaquer aux verrous scientifiques qui freinent l'innovation.

La mécanique du futur et la recherche en sciences mécaniques

Près de 40 ans après la publication du rapport établi en 1980 par l'Académie des sciences sur *Les sciences mécaniques et l'avenir industriel de la France*¹, et dans un contexte économique, social, scientifique en évolution rapide, marqué par l'apparition de nouvelles disciplines (telles que l'utilisation des données massives et l'intelligence artificielle), il est important de faire le point sur les progrès, nombreux, accomplis par ces sciences et sur les défis, tout aussi nombreux, qui les attendent.

La parution en 2015 du *Livre Blanc de la Recherche en Mécanique*², produit par l'Association Française de Mécanique, a été l'occasion de croiser les regards, à la fois d'ingénieurs et de chercheurs sur ce domaine indispensable à l'économie. Le présent texte s'appuie sur cet ouvrage volumineux pour proposer des pistes d'actions afin d'aller plus vite et plus loin.

I - La mécanique au cœur d'un monde en mouvement

La mécanique est la science du mouvement. Autant dire qu'elle est omniprésente dans notre vie quotidienne. Précisons toutefois que les échelles qui nous intéressent ici vont de quelques nanomètres à quelques milliers de kilomètres, c'est-à-dire l'échelle de notre planète. Ce sont les échelles de notre vie quotidienne, au sens large, pour lesquelles la mécanique « classique » est pertinente (la mécanique quantique et la mécanique relativiste prenant le relais aux échelles nettement inférieures ou supérieures).

Sous le vocable « mécanique » se trouvent quatre composantes intimement corrélées : (1) un domaine scientifique (avec des sous-domaines identifiés), (2) des technologies, (3) des métiers et (4) des industries. Ces différentes facettes, décrites de façon plus détaillée dans l'annexe A, justifient qu'il soit fait référence dans la suite aux « sciences mécaniques » (au pluriel) pour désigner l'une ou l'autre facette, ou plusieurs d'entre elles, le contexte désignant clairement quel aspect de la mécanique est concerné.

Au plan industriel, les sciences mécaniques sont impliquées à tous les niveaux, dans la conception, la fabrication et la mise en œuvre de systèmes de tous types dans la plupart des secteurs de la société et aussi dans un très grand nombre d'entreprises. Il est intéressant de noter que la filière mécanique ne représente pas moins de 40 % de la production industrielle en France, qu'elle offre environ 1 200 000 emplois et qu'elle mobilise une part importante des dépenses de R&D des entreprises. Ce socle industriel est clairement indispensable à l'économie du pays.

Historiquement, la France a toujours occupé une place prépondérante dans le domaine des sciences mécaniques par ses capacités de formalisation et sa maîtrise des approches mathématiques, notamment celles de type variationnel, qui ont souvent différé des approches plus pragmatiques fondées sur l'expérience du monde anglo-saxon, ce

¹ **Académie des sciences** (1980) *Les sciences mécaniques et l'avenir industriel de la France*. La documentation française. Paris.

² **Association française de mécanique** (2015) *Livre blanc de la recherche en mécanique*. EDP Sciences. doi 10.1051/978-2-7598-1683-5

qui lui a conféré certains avantages dans la maîtrise des grands projets nécessitant une modélisation avancée.

Sur le plan des technologies, celles qui sont issues des sciences mécaniques ont toujours été l'un des vecteurs du progrès de la société moderne. Elles participent de toutes les industries, devenant de plus en plus difficiles à isoler et à identifier. Là où il y a production industrielle, il y a utilisation de technologies mécaniques : un moteur d'avion, un capteur, un robot, un scanner, une éolienne en sont des exemples. L'industrie mécanique, qui travaille et assemble des matériaux qui vont bien au-delà des matériaux métalliques, intègre en permanence des technologies de toute nature, et notamment celles de l'électronique et de l'informatique, afin de fournir des ensembles de plus en plus intelligents et performants, répondant à des fonctions habituelles ou innovantes. Le mécanicien est souvent amené à jouer le rôle d'intégrateur et d'architecte au cœur d'un système multifonctionnel.



Le viaduc de Millau.

Au plan scientifique, les sciences mécaniques développent les concepts fondamentaux permettant de comprendre les mouvements et les déformations des corps, fluides ou solides qui nous entourent et les échanges d'énergie en leur sein (l'état des recherches et les perspectives de ces domaines sont donnés de façon plus détaillée dans les annexes B à E). Ces concepts sont à la base de la modélisation des systèmes, de plus en plus complexes. Associés à des méthodes numériques innovantes, ces modèles permettent la simulation du fonctionnement des systèmes et la prévision de leur comportement. Ils sont donc essentiels aux prises de décision les concernant.

Dans ce cadre général, les sciences mécaniques, sous l'un ou plusieurs des trois aspects qui viennent d'être évoqués, jouent un rôle majeur dans les domaines industriels de la production d'énergie, de l'élaboration des matériaux, des procédés, de l'environnement, du traitement et de la distribution des eaux, du génie civil, de l'aéronautique, de l'espace et du transport automobile, ferroviaire ou maritime.

Les sciences mécaniques ne se limitent pas aux seuls objets industriels ou manufacturés. Elles sont aussi fortement impliquées dans l'analyse et la recherche de solutions aux grands défis sociétaux qui ont trait à l'évolution du climat, à la santé et au développement d'énergies décarbonées. Elles jouent un rôle important, parfois essentiel, (i) en météorologie et climatologie (le système complexe est alors la planète Terre et la dynamique de ce système est principalement déterminée par les mouvements turbulents de l'atmosphère et leur couplage avec les océans), (ii) en mécanobiologie (le système

complexe est alors la cellule, l'organe ou l'homme lui-même), (iii) en géomécanique (le système est alors la croûte terrestre), (iv) ou encore dans le domaine de l'environnement (qualité de l'air, bruit, hydrologie, traitement des eaux, etc.) .

II - Les grands défis que doit relever la mécanique du futur

II. 1 - Des défis sociétaux

Plusieurs défis sociétaux vont marquer l'évolution du monde au cours des prochaines décennies.

Le premier est celui de la **démographie**. La consommation que cette croissance de la population va induire passe par un **développement durable** nécessitant une **conception optimisée** utilisant moins de matière, moins d'énergie et produisant moins de déchets tout en fournissant à toutes les populations, les ressources nécessaires à leur alimentation.

Le second défi est **environnemental** avec une réduction des pollutions et de l'énergie consommée et un contrôle des émissions de gaz à effet de serre. **La transition énergétique** des énergies fossiles vers des énergies neutres en émission de carbone implique l'introduction d'énergies décarbonées à des niveaux élevés. Pour remédier au défi environnemental, il faut aussi fabriquer des objets durables et réparables.

Le troisième défi est lié à **la mobilité**, qui doit être facilitée sans induire d'effets négatifs en termes de pollution ou de consommation énergétique, tout en garantissant la sécurité et la rapidité.

Un quatrième défi est lié à **l'homme** lui-même, à sa qualité de vie, à son autonomie et à sa résilience. Il faut mieux comprendre les mécanismes fins (chimiques, biologiques, mécaniques) de son développement et des maladies, développer des solutions de substitution (organes artificiels), faire progresser la sécurité des diagnostics et des gestes médicaux.

Ces défis sociétaux ont un impact majeur sur l'orientation des recherches dans le domaine des sciences mécaniques, qui sont essentielles dans le domaine de la conception, de l'énergie, des transports, de l'environnement et dont l'interface avec la biologie prend de plus en plus d'importance. Ils ne pourront être relevés sans recherche de solutions scientifiques et notamment sans celles qui seront issues des sciences mécaniques.

II. 2 - Des défis économiques

Les sciences mécaniques ont été développées en relation étroite avec des problématiques industrielles, qui ont été l'objet dans les dernières décennies de profondes évolutions.

Le premier défi tient à la **mondialisation des marchés** qui conduit à ne maintenir aujourd'hui sur le territoire français que des productions possédant un avantage concurrentiel certain. Alors que des marchés nationaux semi-protégés étaient courants dans les années 1980, la situation a évolué et les conditions de cette concurrence mondialisée nécessitent des efforts soutenus de productivité, de recherche-

développement et d'innovation pour maintenir le potentiel industriel. Pour autant, on constate des volontés de relocalisation soutenues par des mesures protectionnistes (comme par exemple celles récemment adoptées par les États-Unis).

Le second défi résulte du transfert d'une partie de la **recherche et développement** vers des entreprises de plus petite taille. La généralisation de la notion d'entreprise étendue conduit à confier à l'entreprise fournisseur, souvent une entreprise mécanique, la responsabilité d'une solution technique complète, qu'il s'agisse du choix du matériau et de sa mise en œuvre, de la réalisation d'une fonction mécanique ou d'un équipement de production adapté au besoin du client. La responsabilité de **recherche et développement** est ainsi reportée sur des entreprises plus petites, ce qui conduit à un élargissement de leur rôle de fabricant de composants à celui de fournisseur de solutions. Ce processus semble d'ailleurs être en cours en France. Le retour que fait l'ANRT est que le nombre de thèses Cifre croît dans les « Start-up » et les PME alors qu'il reste stable dans les grands groupes.

L'accélération de la mise sur le marché des produits et leur personnalisation sont désormais critiques. Cette évolution a modifié en profondeur les processus de conception (conception simultanée) et de fabrication (procédés adaptés à des séries plus faibles, flexibilité des systèmes de production, diminution des temps de mise au point des outillages), ainsi que des supports logistiques. De nouvelles perspectives apparaissent avec les méthodes de fabrication additive qui permettent de concevoir des objets dont la forme et les propriétés ne sont plus limitées par la géométrie des moules et par des matériaux architecturés aux propriétés physiques indépendantes (résistance mécanique, dureté, conductivité électrique et thermique). Le « pneu idéal » réalisé par Michelin est une belle démonstration de ce type de capacités.



L'A350 d'Airbus. Photo : Airbus, S. Ramadier.

Enfin la croissance des **impératifs réglementaires**, qu'il s'agisse de normes de bruits et de vibrations, d'économies d'énergie, de limitation des émissions polluantes, de cycle de

vie des produits pour leur maintenance et leur recyclage en fin de vie (traçabilité, objets connectés) rend indispensables des efforts soutenus de recherche et développement. Souvent pénalisantes sur le plan économique, ces contraintes n'en constituent pas moins des occasions de s'assurer un avantage concurrentiel par l'innovation.

Tous ces facteurs conduisent à des besoins d'innovation pour la création de nouveaux produits ou de nouveaux procédés. Il faudra à cet effet des compétences technologiques, des idées nouvelles et des avancées scientifiques, celles qui pourraient être réalisées au sein des entreprises innovantes elles-mêmes, ou celles qui pourraient être issues des laboratoires et des institutions de recherche.

II. 3 - Les défis scientifiques

La mécanique, en tant que science, a souvent développé son cœur de discipline à partir de questions posées aux interfaces avec d'autres disciplines. Elle bénéficie des progrès accomplis dans des disciplines voisines, autant qu'elle contribue à celles-ci par ses concepts et méthodes.

Le premier défi tient aux **échelles spatiales** de plus en plus petites : la miniaturisation extrême des composants, de même que la compréhension toujours plus fine des mécanismes fondamentaux de la matière, amorphe ou vivante, nécessite le développement d'une **mécanique à très petite échelle**. Les domaines de la micro ou nanofluidique, des *Micro Electromechanical Systems* (MEMS) ou des *Nano Electromechanical Systems* (NEMS), qui sont déjà à l'œuvre dans bon nombre d'objets quotidiens, vont se généraliser, y compris dans le secteur de la santé. Ce premier défi est aussi celui de la nature multi-échelles de nombreux problèmes de mécanique, qui nécessite des approches permettant le passage d'une échelle à l'autre et des capacités d'homogénéisation.

Dans le domaine de la santé, la compréhension des mécanismes de développement et de réparation passe par une modélisation des **couplages** entre biologie, chimie et mécanique, nettement plus complexes que les couplages multiphysiques qui se sont fortement développés ces dernières années. Le corpus théorique permettant ces couplages reste largement à développer et à confronter à la réalité expérimentale.

La **gestion des risques**, qu'ils soient environnementaux (séismes, tsunamis...) ou industriels (durée de vie des installations nucléaires, tenue des grands ouvrages) pose un troisième grand défi. Prévoir un tremblement de terre dévastateur, identifier et protéger les zones à risques, mais aussi garantir la **durée de vie** des matériaux et des structures sont des questions sur lesquelles l'expérimentation est difficile et les bases théoriques encore peu fiables. Un effort de recherche y est particulièrement nécessaire, en particulier pour savoir démontrer la résilience des structures touchées par un séisme c'est-à-dire pouvoir prouver que, bien que modifiées par cet événement, les structures gardent un comportement mécanique acceptable.

Enfin, les sciences mécaniques doivent accompagner et profiter de la **révolution numérique** en cours. Elles ont déjà largement contribué au développement du calcul scientifique et aux méthodes de conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO). Elles peuvent intégrer les progrès récents en apprentissage profond et intelligence

artificielle. Elles peuvent également relever le défi d'expérimentations plus représentatives, grâce à une métrologie plus fine et à une meilleure exploitation des données et des informations.

II. 4 - Une situation internationale en évolution accélérée

L'évolution récente des sciences mécaniques est caractérisée par l'apparition de nouveaux entrants dans la compétition scientifique du domaine, qui remettent en question la prééminence des pays occidentaux, suivant en cela l'évolution du paysage économique mondial.

C'est ainsi que le développement industriel en Asie, et notamment en Chine, en Inde et en Corée, va nécessairement induire une croissance des capacités de recherche en mécanique dans ces pays, avec un déplacement du centre de gravité dans ce domaine. La mondialisation a déjà conduit à un déplacement des capacités de R&D vers les pays émergents et une concurrence accrue des entreprises industrielles de ces pays.

Face à cette concurrence, des initiatives ont été lancées aux États-Unis dans le cadre du « Advanced Manufacturing » présenté par le président Obama ou en Allemagne avec le projet « Industry 4.0 », accompagnant la quatrième révolution industrielle actuellement en marche, fondée sur l'utilisation des technologies de l'information, la numérisation, les nouveaux procédés de fabrication, et répondant aux enjeux énergétiques, écologiques et sociétaux. Aux États-Unis, des centres d'excellence par secteur industriel permettent d'identifier et de tester les solutions pertinentes pour les problématiques du secteur, bénéficiant pour cela d'importantes subventions publiques. En Allemagne, ce sont des centres d'excellence établis dans tous les *Länder* pour que les entreprises puissent comprendre et tester les nouvelles technologies en partenariat avec les milieux académiques et les centres de recherche. L'effort mondial dans ce domaine est considérable.

En ce qui concerne la recherche de base en sciences mécaniques, la France est actuellement bien placée, grâce à une école de pensée réputée, bénéficiant à la fois d'une formation traditionnellement forte en mathématiques, d'un réseau d'écoles d'ingénieurs de haut niveau et d'une bonne structuration de la communauté. Elle est régulièrement le troisième pays contributeur à l'International Congress on Theoretical and Applied Mechanics, le grand congrès mondial et quadriennal du domaine. Mais il faut aussi noter que la France est moins présente dans les domaines plus proches des applications où elle se trouve en cinquième ou sixième position, le plus souvent derrière l'Allemagne et le Japon et parfois derrière le Royaume-Uni.

II. 5 - Les défis de la formation

Le projet éducatif dans le domaine des sciences mécaniques est également confronté à une évolution scientifique accélérée et à l'apparition de nouvelles frontières, de nouveaux besoins et de nouveaux acteurs.

Le premier défi tient à la **formation scientifique initiale et à l'attractivité** de la science en général, et des sciences mécaniques en particulier : comment inciter les jeunes à s'engager dans une voie réputée difficile, celle de la science ? Et comment, parmi d'autres domaines scientifiques, motiver l'apprentissage de connaissances techniques, de compétences et de capacités de résolution de problèmes dans le domaine de la

mécanique ?

Le second défi, lié au précédent, concerne **l'enseignement supérieur**. L'accélération du rythme du changement dans le développement scientifique et les percées technologiques, conduisent à repenser les pratiques de formation des universités et des grandes écoles. Comment peut-on alors conserver un enseignement des fondements de la discipline, base indispensable à la maîtrise des concepts et des outils du domaine, et en même temps donner aux mécaniciens du futur la vision système qui leur permettra de concevoir, gérer et assurer la maîtrise d'œuvre des projets ardues et de répondre ainsi aux besoins des industriels ?

Le troisième défi concerne la position de notre pays dans la **mondialisation de la formation supérieure** des ingénieurs et des chercheurs du domaine avec des offres de formation multiples par les grandes universités de recherche les plus visibles sur le plan international. Une course est désormais lancée pour attirer les talents, ceux qui se destinent à des carrières en entreprise et ceux qui souhaitent poursuivre des carrières de recherche. Dans ce contexte, des pôles d'excellence comme celui créé sur le Plateau de Saclay pourraient permettre de rassembler des talents mondiaux dans le domaine de la mécanique.

III - La mécanique du futur

III. 1 - L'industrie et les technologies du futur

Les sciences mécaniques sont largement partie prenante dans le programme « Industrie du Futur » dont l'objectif est de renforcer l'industrie manufacturière face à la concurrence internationale, pour conserver et développer en France une activité industrielle forte, innovante, exportatrice, créatrice de richesses et génératrice d'emplois.

Il s'agit de renforcer la modernisation des moyens de production et d'accompagner les entreprises dans l'usage des nouvelles technologies, du numérique et des nouvelles organisations de production. Les nouveaux procédés, comme la fabrication additive, l'automatisation des moyens de production et la robotisation, sont concernés dans cette démarche, avec l'usage plus raisonné des ressources. Des plateformes pilotes ont été mises en place pour un certain nombre de technologies, notamment au sein des instituts Carnot, des centres techniques industriels ou encore des IRT.

L'Industrie du Futur, c'est aussi un besoin considérable de formation des personnels et une adaptation des stratégies commerciales des entreprises aux besoins du marché international.

Sur le plan technologique, la mutation se traduit par une interconnexion des objets, des machines et des systèmes au sein des sites de production, entre les sites et avec l'extérieur. Le rôle croissant du numérique dans ces évolutions, requiert qu'une attention particulière soit portée à la sécurité de l'information et des données. L'usine flexible, plus propre et connectée, s'organise pour adapter la production en fonction de l'évolution de la concurrence mondiale.

Les grands groupes industriels sont déjà largement engagés dans cette mutation, notamment dans l'industrie automobile, mais cette transformation industrielle est moins présente dans les PME. Il faut donc accompagner les PME dans la modernisation des moyens de production et leur proposer des conseils en stratégie et en nouvelles technologies, pour combler les manques dans le domaine des compétences numériques. Dans ce cadre général, l'Alliance Industrie du Futur, initiée par la Fédération des Industries Mécanique, est une bonne initiative pour accompagner les ETI/PMI dans la modernisation de leurs outils industriels et la transformation de leur modèle économique par les nouvelles technologies.

Il s'agit également de renforcer les plateformes pilotes adaptées, leur permettant d'évaluer les technologies les plus pertinentes tout en diminuant les prises de risques financiers. C'est le cas par exemple de la plateforme Additive Factory Hub (AFH), lancée par Safran, CEA, Cetim, Arts et Métiers, SystemX et l'université Paris-Saclay, pour mutualiser les expertises et les moyens les plus performants pour augmenter l'impact de la fabrication additive dans l'industrie.

Cette Industrie du Futur, enjeu majeur pour le devenir des systèmes industriels et des systèmes de production en France et en Europe, devrait offrir une image plus attractive pour les jeunes générations et une réelle opportunité d'emplois valorisants.

III. 2 - Un cœur de discipline et des domaines émergents

La proximité de la mécanique avec d'autres sciences, originellement les mathématiques et la physique, les sciences de l'univers et plus récemment la biologie, son approche systémique et intégratrice, expliquent qu'elle est partie prenante de nombre de domaines émergents fortement interdisciplinaires. Le développement de ces domaines pose des problèmes fondamentaux qui nécessitent des progrès au cœur même de la discipline. C'est donc sur deux fronts complémentaires, cœur de discipline et domaines émergents aux interfaces, que se fera la mécanique du futur. En voici quelques exemples.

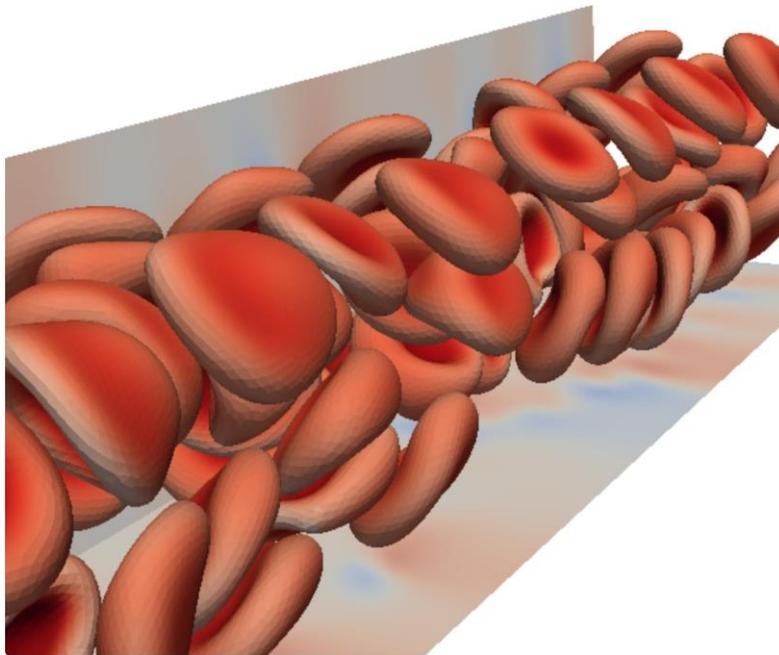
La convergence avec la physique et la science des matériaux autour des micro- et des nanotechnologies pose le problème des petites échelles spatiales. Ce même problème se pose à nouveau, à une échelle encore plus fine, dans le défi de la prévision de la durée de vie des matériaux et des structures sous conditions extrêmes (irradiation sous fluage par exemple). En complément des simulations des physiciens à l'échelle atomique sur des échelles de temps très courtes (incompatibles avec la prévision d'une durée de vie), une mécanique à très petite échelle doit être développée, aux limites de la mécanique des milieux continus, dont les concepts doivent être étendus, ou réinventés, à ces échelles, avec des dispositifs expérimentaux à développer et à valider.

Les interactions avec la biologie et le domaine de la santé, notamment la compréhension des mécanismes de développement (et de réparation) cellulaire chez l'homme motivent une approche fondamentale des **couplages** entre biologie, chimie et mécanique, domaine nettement plus large que les couplages multiphysiques qui se sont fortement développés ces dernières années. Le corpus théorique permettant ces couplages profonds et larges reste amplement à développer et à confronter à la réalité.

Un autre domaine fortement interdisciplinaire, en relation avec la chimie, le génie des procédés, la biologie et les sciences médicales, est celui des sources d'énergie alternatives issues par exemple de la biomasse, des procédés écoresponsables.

La mécanique converge aussi avec l'informatique, le contrôle, le traitement des données et l'intelligence artificielle, sous la forme de robots, de systèmes mécatroniques et de véhicules autonomes.

Les sciences mécaniques détiennent en partie les clés des questions environnementales (bruit, pollution de l'air...). Elles sont fortement impliquées sur ces questions où elles rencontrent les géosciences et l'écologie scientifique pour traiter de l'évolution du climat, de l'accès à l'eau, du traitement des eaux usées, du traitement et du recyclage des déchets.



Simulation de l'écoulement des globules rouges dans un vaisseau sanguin. S. Mendez et F. Nicoud, université de Montpellier.

III. 3 - La mécanique et la révolution numérique

La mécanique a déjà largement contribué au développement du calcul scientifique et elle est actuellement l'une des disciplines qui utilisent les ressources informatiques les plus importantes (masse de données traitées et produites) et les plus performantes (en termes de rapidité et de robustesse) pour réaliser des simulations frontières. Elle a aussi été en pointe dans le développement des méthodes d'ingénierie et de conception assistée par ordinateur et dans la gestion du cycle de vie des produits, avec notamment la gestion des configurations, des données, des documents techniques et des projets.

Elle doit intégrer les progrès récents en apprentissage profond et intelligence artificielle et bénéficier de la **révolution numérique** en cours. Le partage de résultats de simulations extrêmement nombreuses ou de campagnes expérimentales dans de grandes bases de données (à constituer) et les progrès dans la gestion des données massives (*Big data*)

peuvent apporter des changements profonds de paradigme en mécanique. On pourrait voir se développer une mécanique pilotée ou guidée par les données (*Data-driven*), de façon complémentaire ou alternative à l'approche phénoménologique des lois mécaniques, notamment dans le domaine du comportement. Il est néanmoins clair qu'un modèle robuste restera nécessaire pour une utilisation intelligente de ces outils. L'apprentissage profond et les données massives peuvent aussi permettre d'aider les entreprises dans le maintien de leur mémoire et culture techniques.

La France fait partie des pays leaders dans le domaine de la modélisation aux éléments finis en mécanique avec Abaqus, Code_Aster en *open source*, ou encore dans le domaine de la simulation des grandes échelles avec AVBP ou Yales2. Ces codes montrent son niveau d'excellence scientifique et notamment les bénéfices de son haut niveau d'enseignement en mathématiques et dans les sciences de l'ingénieur. Dans le domaine de la simulation, les grands logiciels de mécanique permettent de capitaliser le savoir et les résultats de la recherche et il y a pour la France un enjeu à ne pas dépendre des grands codes de mécanique anglo-saxons.

III. 4 - La formation

Comme cela a été souligné, La **formation scientifique initiale** joue un rôle déterminant dans la naissance des vocations et les choix d'orientation des jeunes générations. La science devrait être pratiquée à tous les niveaux et notamment dès l'école primaire. Les sciences mécaniques génèrent des besoins en mathématiques, communs avec ceux de la physique. Les difficultés rencontrées pour satisfaire ces besoins ont été mises en évidence récemment à propos de la réforme du lycée et l'Académie des sciences et l'Académie des technologies ont ainsi souligné³ que « l'enseignement scientifique n'était pas un discours sur la science ».

Au-delà du cycle primaire et du collège, la mécanique possède d'indéniables atouts ; encore faut-il que la richesse des disciplines soit présentée dès le lycée et dans les premières classes universitaires :

- la variété des situations rencontrées et leur caractère concret constituent certainement un des atouts de la mécanique ;
- un deuxième atout est celui de la criticité des problèmes auxquels les ingénieurs en mécanique seront confrontés. Ils auront à développer des solutions qui favoriseront un monde plus durable, plus sain et plus sûr, dans le contexte des grands défis de l'énergie, de l'eau, de l'environnement, de la mobilité et de la santé ;
- enfin, les industries mécaniques sont fortement pourvoyeuses d'emplois (premier employeur industriel en France avec 21% de l'emploi industriel⁴) et la nation a besoin de former de bons mécaniciens de tous niveaux, c'est-à-dire avec les compétences demandées au recrutement, mais aussi dotés d'un bagage leur permettant de s'adapter et d'évoluer tout au long de leur vie professionnelle.

Au niveau supérieur, master ou ingénieur, les mécaniciens du futur seront en mesure de concevoir et diriger des projets difficiles exigeant une vision système. Ils devront être

³ <http://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/avis290118.pdf>

⁴ Source Fédération des Industries Mécaniques, <https://www.entreprises.gouv.fr/semaine-industrie/activites-industrielles/industrie-mecanique>.

capables d'intégrer différentes disciplines et de traiter des problèmes complexes ayant aussi des dimensions sociales.

Le cœur de la discipline se trouve dans la *mécanique des milieux continus*, celle des matériaux, des fluides et des solides et de leurs interactions. Ces matières, qui s'appuient notamment sur la physique, la chimie et les mathématiques constituent l'« ADN » des mécaniciens et forment le socle indispensable pour la suite.

D'autres disciplines connexes sont très souvent enseignées dans les départements de mécanique : les sciences énergétiques (thermodynamique, transferts thermiques, génie des procédés), ou encore dans d'autres départements comme la biologie pour toutes les applications qui impliquent une convergence entre le vivant et la mécanique. Il est également important de combiner les sciences mécaniques avec celles de l'information et notamment celles qui sont liées au traitement du signal, au contrôle des systèmes, à la robotique et à la science des données.

Quel que soit le niveau de formation, un mécanicien doit avoir à la fois des compétences de modélisation et d'analyse - et donc maîtriser ses méthodes propres et les outils mathématiques et numériques nécessaires -, doit faire preuve d'une culture tant disciplinaire que transversale et notamment pouvoir s'appuyer sur les technologies de l'information. Il doit aussi pouvoir mettre en œuvre des approches d'ingénierie des systèmes, des analyses multi-échelles et des approches multidisciplinaires. La modélisation et la simulation numérique de systèmes complexes, pour leur optimisation et la prévision du fonctionnement opérationnel, sont aussi devenues des outils incontournables tant en recherche que dans la pratique industrielle.

Les formateurs devront, au-delà de l'enseignement du cœur de discipline, réaliser une ouverture large pour donner des connaissances multidisciplinaires et privilégier les capacités d'intégration par l'apprentissage par projet, la créativité et la résolution de problèmes. Il s'agira de développer les atouts concurrentiels de la connaissance et de l'innovation, les capacités de travail en équipe, une forte composante internationale, des capacités à travailler dans un environnement diversifié et mondialisé.

Une des difficultés rencontrées sera de faire passer l'enseignement des sciences de l'ingénieur, et des sciences mécaniques en particulier, de la connaissance théorique au monde réel des compétences.

IV - Conclusions et perspectives

Les sciences mécaniques jouent un rôle majeur en tant que source d'innovations pour plusieurs secteurs industriels importants, pour l'économie et en tant que source de solutions pour les grands défis sociétaux futurs. Face à ces enjeux de premier ordre, il est important de consolider la recherche dans ce domaine, œuvrer au rapprochement des mondes de la recherche, de l'innovation et de l'industrie, intensifier les échanges entre tous les acteurs, encourager les coopérations et les partenariats, engager une véritable dynamique et convaincre les décideurs de la nécessité du développement de la recherche et de la formation dans les sciences mécaniques.

D'un côté, il faut affirmer le danger qu'il y aurait à diminuer l'effort de recherche, et donc à prendre du retard, dans les domaines manufacturiers dont la mécanique est, avec la chimie, une composante essentielle : outre l'aspect économique de ce savoir, lorsqu'il s'agit de risques, de sûreté des équipements, de durée de vie, c'est la mécanique qui, avec ses critères scientifiquement fondés, a bien souvent le dernier mot dans la décision ultime de choix d'une solution.

Mais il faut aussi souligner que la mécanique, dont sont issus bien d'autres domaines, n'a pas peur d'évoluer. Les mécaniciens ont été pionniers en matière de simulation numérique, de calcul scientifique et de conception et fabrication assistée par ordinateur. L'entrée dans une nouvelle ère du numérique avec l'essor des données et de l'apprentissage machine est une chance car elle renforce la pérennité des acquis et ouvre des domaines nouveaux.

La modernité et les capacités d'innovation de la mécanique ne sont pas toujours appréhendées à leur juste valeur par les décideurs. La tendance a plutôt été de réfléchir en termes de grands défis sociétaux alors que ce sont des disciplines comme les sciences mécaniques qui peuvent apporter des solutions aux problèmes les plus critiques pour l'économie et être une source de création de valeur et de richesse pour la société. Il y a donc un travail d'explication à faire. Les mécaniciens doivent plaider en faveur de décisions éclairées et d'investissements dans le domaine des sciences mécaniques et des technologies associées, pour maintenir et accroître les capacités à résoudre les grands problèmes de notre temps. L'épuisement des ressources naturelles, l'accès à l'énergie, le contrôle de la pollution, la gestion de l'eau, l'adaptation au réchauffement climatique, l'amélioration des conditions dans les pays en développement, sont des défis majeurs qui vont solliciter les sciences mécaniques et les mécaniciens.

En définitive, le message que ce texte porte est celui de l'importance des enjeux de la mécanique, qui reste un des principaux vecteurs de progrès scientifique et technologique pour l'innovation et le développement durable.

La suite de ce rapport est composée de cinq annexes. La première (Annexe A) cherche à définir la mécanique au travers de ses diverses facettes. Ce texte a été adapté d'une contribution de Michel Combarous. On a retenu ici quatre éléments permettant de définir la mécanique en tant que science, discipline technologique, métier et industrie. Les annexes B et C traitent principalement de mécanique des fluides et des solides et des structures et des interactions avec d'autres domaines. Ces deux annexes ont été initialement rédigées par Jacques Magnaudet (évolution des recherches en mécanique des fluides) et par Djimedo Kondo (mécanique des solides) à partir de leurs expériences au Comité national de la recherche scientifique (sections 10 et 9). Les annexes D et E traitent plus particulièrement des transferts énergétiques au sein des systèmes mécaniques. Ces annexes donnent un éclairage sur une partie des problématiques scientifiques en mécanique. Une vision plus complète du domaine se trouve dans le Livre blanc de la recherche en mécanique publié en 2015.

Annexe A - La mécanique : des sciences, des technologies, des métiers, des industries

Comment se situe **la mécanique** ? Plusieurs définitions de ce terme général sont utilisées, tant dans le langage courant que dans des cercles plus spécialisés. Assez classique pour bien des expressions du même type, cette situation est accentuée en France, et entraîne un flou certain, dans la perception du rôle et de l'importance de la mécanique, au sein de la communauté des mécaniciens comme à l'extérieur. Parmi ces acceptions, on distingue : une science, ou plus exactement un ensemble de disciplines scientifiques, un domaine technologique, un cœur de métier à part entière, un ensemble de secteurs industriels.

« *La mécanique est la science des lois du mouvement et de l'équilibre, et de l'application de ces lois à la construction et à l'emploi des machines.* » (Larousse du XIX^e siècle).

On va d'abord traiter des deux premiers volets, celui de la science et de la technologie, pour ensuite considérer les métiers et les secteurs.

A. 1 - La mécanique, une discipline scientifique

« **La science des lois du mouvement et de l'équilibre** », c'est le *savoir c'est-à-dire la discipline scientifique*. Dans le cadre de cette définition de la mécanique, la première branche de la physique au sein de laquelle se sont développées les formulations quantitatives, de nombreux champs du savoir sont regroupés, bien au-delà de notre environnement immédiat, de l'infiniment grand (mécanique céleste) à l'infiniment petit (mécanique quantique). Le dernier siècle a vu également le développement considérable de la mécanique des milieux déformables, fluides plus ou moins classiques, solides aux comportements plus ou moins simples, matériaux aux compositions et structures plus complexes, aux rhéologies subtiles.

La mécanique incorpore des disciplines connexes comme l'acoustique, les transferts thermiques, la thermodynamique, bien des aspects du génie des procédés et de la science des matériaux. Ceci correspond à un souci de cohérence des savoirs autour des objectifs des industries mécaniques, et de la compréhension de phénomènes naturels que l'on peut qualifier de « mécaniques ».

Dans les universités et dans beaucoup d'écoles d'ingénieurs, comme dans toutes les formations de techniciens, le vocable « mécanique » fait référence au « noyau dur » des disciplines évoquées ci-dessus, ou à l'ensemble de ces disciplines, dans une vision orientée vers les applications.

A. 2 - La mécanique, un domaine technologique

« **L'application de ces lois à la construction et à l'emploi des machines** », c'est le *savoir-faire, c'est-à-dire la discipline technologique*. Cette définition trop restrictive doit être perçue au sens large, intégrant progressivement l'ensemble des disciplines technologiques nécessaires à la conception, construction et utilisation des machines.

Ce fut, par exemple, l'introduction des apports de la thermodynamique, d'abord empirique, puis formalisée, dans l'élaboration des moteurs à combustion interne. Par exemple aussi, l'apport de l'automatique et de l'analyse des systèmes dans des procédés mécaniques de plus en plus complexes. Par exemple enfin, l'introduction de plus en plus massive du numérique.

D'une manière générale la mécanique intervient, en tant que discipline technologique, dans le processus de conception ou de réalisation, chaque fois que le service à l'utilisateur final contient l'une des **fonctions génériques** suivantes : supporter (fournir l'ossature physique d'un système), résister (aux sollicitations et agressions), transmettre (des mouvements, voire des informations), transporter (des objets, des hommes, des fluides), modifier des structures (déformation, enlèvement de matière, assemblage), mesurer (les formes, les états), modifier les compositions (mélanges, séparations), transformer l'énergie, transférer (des constituants, des quantités de mouvement, de la chaleur).

Les principaux **vecteurs de ces fonctions** sont *alors des matériaux, des mécanismes, des structures, des moteurs et actionneurs, des mélangeurs et séparateurs, des réacteurs et échangeurs, des capteurs*.

Dans beaucoup de cas, des procédés complexes intègrent des associations de vecteurs de nature différente. La compréhension de leurs interactions suppose alors la mise au point de modèles de comportement des systèmes, que l'on peut considérer comme autant de « nouveaux vecteurs ».

A. 3 - Les métiers du mécanicien

Il serait fortement réducteur de limiter le rôle du mécanicien à la fourniture des fonctions et composants purement mécaniques. Il assume le plus souvent la fonction **d'architecte industriel de systèmes matériels complexes** qui, face à un cahier des charges, sait intégrer autour du *squelette et de la musculature* tous les autres organes et fonctions, en prenant en compte les influences mutuelles et en arbitrant les compromis.

Le **mécanicien est souvent le maître d'œuvre** qui manie les méthodes modernes d'analyse fonctionnelle et qui combine, en optimisant les interactions, les différentes composantes technologiques dans une réalisation matérielle optimisée et fiable.

Les produits et procédés modernes, même les plus banals, associent, autour de la structure matérielle, des technologies relevant de plusieurs disciplines de l'art de l'ingénieur. Le mécanicien-concepteur doit maîtriser **les interfaces entre ces disciplines**.

Il doit élargir son champ d'action aux **technologies de fusion** entre disciplines, où la simple juxtaposition des composants relevant de chaque discipline n'est plus suffisante. Un exemple classique d'une telle technologie de fusion est l'*optomécatronique*, associant l'informatique, l'automatique, l'électronique et l'optique à une solide base de sciences mécaniques. Elle est omniprésente dans l'automobile, la photographie, les machines-outils, l'électroménager, les périphériques de l'informatique, l'audiovisuel.

A. 4 - La mécanique dans l'industrie

La présence de la discipline dans l'industrie est évidente. Que ce soit dans les phases d'élaboration, de transformation, de finition, d'utilisation de la matière, la mécanique, qu'elle soit des solides mais aussi des fluides, depuis l'ère industrielle jusqu'à aujourd'hui et pour demain, est le maillon sans lequel les progrès technologiques n'auraient pu, ne peuvent, ne pourront se faire. Les techniques de formage, d'enlèvement de matière et aujourd'hui d'apport de matière (fabrication additive), de tissage, viennent les premières à l'esprit, mais il y en a bien d'autres. La mécanique est également présente dans la conception et la réalisation de grands « systèmes » : véhicules terrestres, aériens, spatiaux, ou de grands « instruments » qu'ils soient d'investigation (télescopes, « Laser Mégajoule »...) ou de production d'énergie (hydraulique, nucléaire ou éolienne), sans oublier tous les systèmes de taille plus modeste mais importants en pratique (robots manufacturiers, dispositifs médicaux, etc.). Derrière ces applications, on retrouve des grandes entreprises, fleurons mondiaux de la compétence française (Airbus, Alstom, Safran, ArianeGroup, Saint-Gobain, Michelin, PSA, Renault, Naval Group, Areva, EDF, etc.), qui ne sont pas seulement « mécaniciennes », et une multitude d'entreprises, de taille moyenne ou petite, mais indispensables en tant que sous-traitantes ou positionnées en propre sur des niches majeures pour l'Industrie du Futur. La synergie de cette industrie avec les laboratoires de recherche (CNRS, universitaires ou semi-industriels comme CEA, Onera, Ifpen, etc.), les centres techniques (Cetim, Institut de Soudure, etc.) est excellente et confère à ce secteur un potentiel d'innovation remarquable.

Annexe B - La mécanique des fluides : un état des lieux de la recherche en France

B. 1 - Éléments de contexte historique

La mécanique des fluides est une science ancienne dont on peut dater les fondements « modernes » au milieu du XVIII^e siècle, avec les contributions fondatrices de Daniel Bernoulli, Leonhard Euler et Jean le Rond D'Alembert. Outre ce dernier, les scientifiques français se sont particulièrement illustrés dans la discipline à la fin du XVIII^e siècle et durant la première moitié du siècle suivant, âge d'or d'où émergent en particulier les noms de Laplace, Navier et Cauchy. Si Saint-Venant et Boussinesq ont prolongé ce rayonnement durant la deuxième moitié du XIX^e siècle, c'est surtout la Grande-Bretagne et l'Allemagne qui ont dominé la discipline des années 1830 jusqu'à la Deuxième Guerre mondiale, en particulier avec les géants que furent Stokes, Helmholtz, Kelvin et Rayleigh, puis Prandtl et Taylor. Durant cette longue période, et en fait jusqu'à l'aube des années 1980, la France apparaît en retrait sur la plupart des avancées majeures réalisées dans les deux pays précités, rejoints à partir des années 1930 par l'URSS et les USA. Certes,

des contre-exemples à ce constat existent (Bénard, Kampé de Fériet...) mais ils constituent davantage des îlots isolés que des preuves de l'existence d'une école forte, organisée et rayonnante. Les « Trente glorieuses » ont vu ce décalage se poursuivre, là encore en dépit de l'existence de brillants contre-exemples.

	<i>Journal of Fluid Mechanics</i>	<i>Physics of Fluids</i>	<i>Int. J. Heat Mass Transfer</i>
France	46	100 (36)	66 (41)
Allemagne	47	59	57
Japon	58	116	67
Royaume Uni	496	81	176
USA	804	2059	525

Nombre de publications de mécanique des fluides de quelques pays durant la période 1972-1979. Concernant le *Journal of Fluid Mechanics*, la France se situe au 7^e rang derrière les États-Unis, le Royaume-Uni, l'Australie, le Canada, le Japon et la République Fédérale d'Allemagne. Les chiffres entre parenthèses représentent le nombre d'articles relevant réellement de la mécanique des fluides dans des revues couvrant également d'autres domaines (plasmas, rayonnement...).

Concrètement, la majeure partie des recherches menées en France durant la période 1950-1975 se concentre autour de quelques champs d'application bien identifiés : aéronautique, hydraulique, génie pétrolier. Des liens importants sont tissés ou renforcés avec certains aspects de la thermique, de la combustion et du génie des procédés. Parallèlement, une recherche beaucoup plus amont et essentiellement théorique se développe dans quelques laboratoires, souvent indépendamment des questionnements issus des sciences pour l'ingénieur. Elle est particulièrement centrée sur des problématiques de turbulence et d'aérodynamique fondamentale, de cinétique des gaz, ou sur l'utilisation d'approches asymptotiques.

La modestie de la production scientifique internationale de la France durant cette période peut être appréciée au travers des chiffres du tableau ci-dessus relatifs aux années 1970. On y constate un nombre de publications françaises dans les principales revues du domaine à peu près au niveau de ceux de l'Allemagne et du Japon, mais bien en-deçà de ceux du Royaume-Uni et *a fortiori* des États-Unis.

B. 2 - Les révolutions de la fin du XX^e siècle

Un virage majeur intervient durant les années 1980, sous l'effet concomitant de trois « révolutions » conceptuelles et/ou méthodologiques : celle de la physique non linéaire (systèmes dynamiques, théorie du chaos, instabilités hydrodynamiques...), celle des approches issues de la physique de la matière molle (hydrodynamique physique, milieux granulaires...), celle enfin de la montée en puissance de la simulation numérique.

La France a joué un rôle majeur dans l'émergence des deux courants de pensée « physiciens » ci-dessus, avec notamment pour le second la large diffusion des approches initiées par P-G. de Gennes. Si ces « révolutions » ne se sont évidemment pas limitées à notre pays, leur impact y a été et y est toujours particulièrement fort, davantage peut-être que dans d'autres pays ayant bénéficié plus tôt d'une tradition de mécanique des fluides « moderne » mais basée sur des approches différentes. Quant à la simulation

numérique, elle a profondément renouvelé la façon d'appréhender une grande partie de la mécanique des fluides, et les rôles respectifs des expériences de laboratoire et des approches théoriques s'en sont trouvés modifiés (mais non minorés). En effet, au-delà des problèmes de complexité croissante qu'elle a permis d'aborder au fur et à mesure de l'augmentation foudroyante des performances des ordinateurs, elle donne accès à des grandeurs parfois inatteignables par l'expérience et permet un découplage arbitraire d'effets, précieux pour l'étude de mécanismes élémentaires.

La complémentarité fructueuse entre ces nouvelles voies d'analyse des phénomènes et la solide tradition mathématique française a induit une très forte montée en puissance de la mécanique des fluides française sur la scène internationale, aisément perceptible, voire mesurable aujourd'hui.

En parallèle des trois révolutions conceptuelles ci-dessus, on doit souligner le très fort renouvellement des approches expérimentales intervenu depuis le début des années 1990, grâce à l'imagerie rapide et aux techniques de traitement d'images, à la vélocimétrie par image ou suivi de particules, puis un peu plus tard à la tomographie à rayons X et à la résonance magnétique nucléaire pour l'exploration des écoulements dans les milieux hétérogènes.

B. 3 - Les lignes de force des recherches actuelles

La nature des milieux étudiés et les caractéristiques des écoulements qui s'y développent conditionnent très largement les difficultés théoriques et expérimentales des problèmes à traiter. De ces différences (écoulements incompressibles/fortement compressibles, à petit/grand nombre de Reynolds, fluides et milieux homogènes/hétérogènes, présence/absence d'effets non hydrodynamiques...) résultent des problématiques et des classes d'approches largement distinctes, qui structurent des sous-communautés bien identifiées. Celles-ci, au-delà de quelques outils et méthodologies génériques partagés, évoluent au plan scientifique de façon autonome, dessinant ainsi des lignes de force au sein de la discipline. Certaines sont anciennes mais restent stimulées par des questions fondamentales non résolues ou par des demandes nouvelles en provenance des applications. D'autres sont apparues beaucoup plus récemment, notamment du fait des questionnements nouveaux en provenance des sciences de la vie, des progrès considérables réalisés dans la miniaturisation des systèmes, ou encore des possibilités inédites offertes par les métrologies et techniques de simulation modernes pour sonder les milieux hétérogènes.

Ainsi, malgré un certain arbitraire et des tailles de communautés très diverses, on peut identifier dans les recherches actuelles huit axes majeurs :

- la turbulence, où coexistent des questionnements directement liés aux problèmes d'ingénierie (organisation de la turbulence de paroi, génération du bruit, influence du forçage électromagnétique...), aux écoulements géophysiques (influence de la stratification, de la rotation...) et des travaux fondamentaux sur les propriétés de transport des scalaires et des particules matérielles, la turbulence d'ondes, les scénarios de transition dans les écoulements cisailés, l'intermittence et l'origine de la dissipation dans la limite non visqueuse, etc.
- les instabilités et le contrôle des écoulements. Si les concepts de base ont peu progressé récemment, leur application s'étend (notamment au travers des approches de stabilité globale) à des configurations d'écoulements plus complexes, soit

géométriquement (prise en compte d'obstacles), soit par la présence de forçages divers (compressibilité, réactions chimiques, rotation/stratification...). L'utilisation des méthodes adjointes et des approches de réduction de modèles pour prédire la réceptivité et la sensibilité des écoulements est également en plein développement, tout comme les travaux visant à développer des techniques de contrôle par auto-apprentissage sur des configurations de plus en plus réalistes ;

- les écoulements à grande vitesse, où les recherches se concentrent principalement sur l'effet des ondes de choc dans différentes situations (interaction avec des couches limites, des particules, influence sur le mélange) et les propriétés de la turbulence supersonique (pour les applications aéronautiques mais aussi astrophysiques) ;
- les ondes de surface et ondes internes, qui suscitent des recherches mues aussi bien par des questions d'ingénierie pure (hydrodynamique navale, résistance des ouvrages côtiers) que des problématiques où océanographie et ingénierie, voire protection civile, se combinent (génération et propagation des tsunamis et des vagues scélérates, influence de la topographie sur la propagation des ondes internes) ;
- les interactions fluide-structure, où, à côté de la problématique bien connue des vibrations dues aux tourbillons très présente dans de nombreuses applications (génie nucléaire, sillages d'hélicoptères et d'éoliennes...), s'est récemment développée une intense activité autour des questions d'adaptation à la nage et au vol, des instabilités de systèmes déformables (végétaux, filaments, particules mobiles, élastocapillarité...), et de la poroélasticité dans les milieux mous (gels, tissus) ;
- la mécanique du vivant. De nombreuses recherches sont évidemment centrées sur l'humain et concernent notamment les pathologies de la macro-circulation (anévrismes, athérosclérose), la caractérisation de la microcirculation cérébrale et ses pathologies spécifiques (maladie d'Alzheimer notamment), et d'un point de vue plus local, les questions de déformation, d'agrégation et de rupture des globules et cellules. Cependant, un nombre croissant de travaux s'intéressent à d'autres facettes du vivant, notamment aux relations entre contraintes hydrodynamiques et développement, question générique pour les vertébrés mais aussi les plantes et les arbres, ainsi qu'aux mouvements individuels ou collectifs des micro-organismes (plancton par exemple), constitutifs des fluides dits « actifs » ;
- les écoulements pilotés par les effets de surface, où les très petites échelles, voire les effets non hydrodynamiques, jouent un rôle prépondérant. Dans la première catégorie se rangent les questions de fragmentation des jets, nappes ou colonnes liquides, les problèmes de génération et de déplacement de gouttes calibrées en microfluidique ou encore les écoulements sur des surfaces superhydrophobes. La deuxième recouvre les micro- ou nanoécoulements impliquant des effets tels que la transpiration thermique, le glissement aux parois, les phénomènes de mouillage dynamique, les forces d'origine osmotique, etc. L'étude de tels écoulements ne va pas sans le développement de métrologies (mesure des forces et déformations de surface) et approches de simulation (dynamique moléculaire) spécifiques ;
- les écoulements de milieux divisés et de fluides complexes. Ces milieux sont de natures très diverses : émulsions, mousses, suspensions, écoulements chargés en particules/gouttes/bulles, assemblages et lits granulaires, milieux poreux... Ils posent de manière intrinsèque la question du passage d'une description microscopique à l'élaboration d'une « rhéologie » macroscopique seule capable d'amener des prédictions exploitables dans une optique d'ingénierie. Des approches de modélisation (impliquant notamment des techniques de prise de moyenne), des méthodes de simulation et des

métrologies dédiées sont développées pour chacune des classes de ces milieux, auxquels d'importantes communautés consacrent leurs efforts.

B. 4 - Interactions avec d'autres communautés

Forte de ses mutations et avancées méthodologiques récentes, la mécanique des fluides d'aujourd'hui entretient et développe de fortes interactions avec de nombreuses disciplines de base, tout en investissant de nouveaux champs d'application allant bien au-delà du périmètre des sciences pour l'ingénieur. Sans viser à l'exhaustivité, on peut facilement identifier cinq grands domaines en interaction avec lesquels la communauté de la mécanique des fluides développe dans différentes directions un foisonnement de travaux transdisciplinaires :

- les mathématiques appliquées, autour des questions liées aux équations aux dérivées partielles, aux singularités de leurs solutions, au caractère bien posé des modèles, aux propriétés des schémas numériques ;
- la mécanique des solides et des matériaux, pour l'ensemble des problématiques concernant les interactions fluide-structure, l'élastocapillarité, les milieux vivants, le comportement et la rhéologie des milieux mous ou divisés ;
- la physique et la physicochimie pour une très vaste gamme de problèmes allant des questions de nature théorique rencontrées au sein du triptyque ondes/instabilités/turbulence, au comportement des fluides et milieux complexes : milieux granulaires, suspensions, écoulements en présence de polymères, mouillage ;
- les sciences de l'Univers dans leurs différentes dimensions, qu'il s'agisse de la géophysique interne (dynamique du manteau et de la lithosphère, volcanisme, génération des dynamos planétaires), de l'astrophysique (turbulence et instabilités, formation des disques d'accrétion) ou bien sûr des enveloppes superficielles (dynamique océanique et littorale, dynamique des fronts atmosphériques, formation des nuages, de la pluie et de la grêle, etc.) ;
- les sciences de la vie autour des problématiques relatives aux écoulements en présence de cellules déformables et de tissus mous, à la migration cellulaire, à la physiologie des micro-organismes et des plantes, mais aussi à l'embryogénèse et à toutes les questions de biophysique impliquant des écoulements.

Bien entendu, les interactions entre la mécanique des fluides et les disciplines traditionnelles des sciences pour l'ingénieur perdurent. Elles se sont aussi largement renouvelées, intégrant les approches conceptuelles et les méthodologies apparues durant les dernières décennies et abordant de nouveaux questionnements. En se restreignant à quelques exemples, on peut mentionner :

- en combustion : le développement partagé de schémas numériques et de codes, ainsi que de modélisations de sous-maille, les analyses de stabilité et de sensibilité des flammes, l'exploration des mécanismes hydrodynamiques de l'atomisation de jets et nappes ;
- en génie des procédés : les études sur l'hydrodynamique et les propriétés de mélange des écoulements multiphasiques à particules, gouttes ou bulles, celles des mécanismes de formation de dépôts en filtration membranaire, l'analyse des propriétés rhéologiques des interfaces fluides complexes et des milieux colloïdaux ;

- dans le domaine des plasmas : le développement de méthodes de simulation pour les plasmas de décharge et de rentrée, mais aussi pour les plasmas de bord (tokamaks), les propriétés du vent ionique (pour la propulsion des satellites) ;
- en thermique : l'étude détaillée des écoulements diphasiques avec changement de phase (sprays, impacts de gouttes, échangeurs et caloducs), les recherches sur l'intensification des transferts par manipulation de structures thermoconvectives (panneaux photovoltaïques, bâtiments).

À ces champs d'application établis de longue date, il convient d'ajouter celui de la filière spécifique que constitue la microfluidique, qui se prolonge aujourd'hui en direction de la nanofluidique. Dans ce domaine, une mécanique des fluides à très petite échelle, dans laquelle les forces non hydrodynamiques jouent un rôle prépondérant, a pris, notamment en France, un essor remarquable. Les applications avérées ou potentielles de ces recherches sont extrêmement vastes, certaines participant d'ailleurs au renouvellement des questionnements en génie des procédés et en thermique : refroidissement de composants électroniques, délivrance de principes actifs, laboratoires sur puce, impression par jet d'encre, chimie fine, stockage de CO₂, conversion d'énergie, micro- et nanomoteurs, etc.

B. 5 - Périmètre, effectifs et moyens de la communauté nationale

En France, les chercheurs et enseignants-chercheurs de la discipline relèvent majoritairement du domaine des sciences pour l'ingénieur, au travers de la section 10 du Comité national de la recherche scientifique pour les uns, de la section 60 (et dans une moindre mesure de la section 62) du Conseil national des universités (CNU) pour les autres. Néanmoins une part significative de la communauté émerge en mathématiques appliquées, en physique, en physicochimie ainsi qu'en sciences de l'Univers. Ainsi la discipline est véritablement présente dans 7 sections du CNRS relevant de 4 instituts distincts. On peut estimer à environ 850 chercheurs et enseignants-chercheurs l'effectif total correspondant, auxquels il convient d'ajouter une centaine d'ingénieurs-chercheurs développant une activité de publication régulière (CEA, CEA-DAM, EDF R&D, Irstea, Onera, Cerfacs, etc.).

Une douzaine de groupements de recherche, pilotés par le CNRS et impliquant pour certains des entreprises ou des Epic, structurent certains pans de la communauté en offrant, parfois sur de longues périodes, un cadre peu formel mais efficace d'échange et de collaboration. De par la nature de la discipline, qui fournit avant tout des outils prédictifs, les entreprises qui bénéficient des recherches menées dans les laboratoires publics sont avant tout de grands groupes et des Epic des secteurs de l'énergie, de la défense, des transports, ainsi que des procédés à haute valeur ajoutée. Les liens avec les PME-PMI sont nombreux mais plus ponctuels.

Une analyse basée sur la production scientifique des 10 dernières années dans les trois principales revues de la discipline indique que près de la moitié de la production scientifique française est issue de la région parisienne (Paris : 25 %, plateau de Saclay : 19 %), tandis que quatre ensembles régionaux (Marseille, Toulouse, Lyon, Grenoble) y contribuent pour environ 40 %. Quatre autres centres (Nice, Poitiers, Lille, Bordeaux) complètent l'essentiel du panorama.

Les laboratoires historiquement liés aux applications aéronautiques et navales disposent d'un nombre significatif d'installations expérimentales lourdes (souffleries subsoniques et supersoniques, bancs de turbomachines, bassins de carène et bassins à houle, etc.). Quelques installations spécifiques sont dédiées aux écoulements environnementaux et géophysiques (souffleries atmosphériques, plateformes tournantes, veines hydrauliques). La planification et la gestion de ces installations ne bénéficient pas d'une coordination nationale, ce qui freine certains projets et rend parfois certains choix peu clairs. En revanche des initiatives européennes importantes ont permis durant les années récentes de tirer un bon parti des principales installations dédiées à l'étude de la turbulence et des systèmes environnementaux et géophysiques.

Les ressources nécessaires à la simulation intensive bénéficient au contraire d'une gestion très structurée au travers de 15 mésocentres régionaux, du groupement Genci et du réseau européen Prace. La mécanique des fluides est l'une des disciplines les plus consommatrices de calcul intensif, avec environ 1/3 de la demande nationale totale, 2 comités thématiques dédiés au sein du Genci et une présence forte dans 4 autres.

B. 6 - Rayonnement actuel de la France dans le contexte international

Différents indicateurs démontrent le dynamisme et la visibilité de la communauté académique française sur la scène internationale. L'activité de publication analysée dans le tableau ci-dessous au travers des trois principales revues actuelles indique que la France contribue aujourd'hui à environ 15 % de la production mondiale, et que sa production équivaut à plus de 40 % des celle des États-Unis. Elle est maintenant au niveau de celle du Royaume-Uni et très supérieure à celle de l'Allemagne, de la Chine (néanmoins en très forte progression) et du Japon.

	<i>Journal of Fluid Mechanics</i>	<i>Physics of Fluids</i> + <i>Phys. Rev. Fluids</i>
France	1161	1057
Allemagne	481	459
Chine	437	696
Japon	256	353
Royaume-Uni	1523	798
USA	2675	2665

Nombre de publications de mécanique des fluides de quelques pays durant la période 2008-2018. La France se situe au 3^e rang pour le *Journal of Fluid Mechanics* et au 2^e pour l'ensemble *Physics of Fluids-Physical Review Fluids*.

On peut citer nombre d'autres indices de ce rayonnement : 2^e contingent de participants au congrès annuel de l'American Physical Society – Division of Fluid Dynamics, élection de 15 français en tant que *Fellow of the American Physical Society* depuis 2000 et de 6 *Euromech Fellows* sur un total de 19. De même, alors que le *Journal of Fluid Mechanics* n'a pas compté d'éditeur français durant 1/3 de siècle (jusqu'en 1989), il en compte aujourd'hui quatre.

B. 7 - Quelques sujets de préoccupation

Si la France possède actuellement une position remarquable et enviée sur la scène internationale, certaines évolutions du contexte national et de l'environnement médiatique sont à prendre en compte car elles pourraient entraîner à terme un affaiblissement de la dynamique de la communauté nationale. On en retiendra ici quatre :

- l'évolution récente de l'Agence nationale de la recherche (ANR) s'est avérée très défavorable au cœur de la discipline, pour lequel on n'a pu que constater un effondrement du nombre de projets lauréats destinés à l'avancement des outils et concepts qui lui sont propres (environ 2-3 par an). La mécanique des fluides reste certes présente dans de nombreux projets liés aux défis sociétaux, mais n'y remplit généralement qu'une tâche précise, consistant le plus souvent en une application des connaissances et outils existants, sans progression méthodologique ou conceptuelle notable ;
- du fait de la réduction, voire de la disparition, des centres de recherche et développement de nombreuses entreprises, les anciens partenariats avec les équipes académiques tendent à changer de nature, passant dans de nombreux cas du statut effectif de collaboration à celui de prestation, beaucoup moins enrichissant pour les équipes de recherche et la discipline. Il y a là un risque d'appauvrissement du lien laboratoires-industrie pour une part significative de la discipline ;
- l'enseignement de la mécanique des fluides a évolué diversement suivant les formations. Certaines ont intégré, au moins sous forme de cours de « sensibilisation », les évolutions récentes de la discipline. D'autres restent par contre plus traditionnelles, ce qui rend difficile l'appréhension par les étudiants des avancées considérables récemment réalisées et des potentialités technologiques en plein essor ;
- les progrès de l'intelligence artificielle, de la fouille de données ou encore des techniques d'auto-apprentissage génèrent certains discours suggérant que l'exploration et la compréhension des mécanismes physiques est en voie d'obsolescence. Il n'en est rien, et ces démarches demeurent plus que jamais nécessaires pour prévoir les changements d'état et les crises des systèmes physiques, qui sont souvent les phénomènes qui engendrent les conséquences les plus importantes, voire les plus dramatiques dans les systèmes impliquant des écoulements, à commencer par celui dans lequel nous vivons. À rebours de ces discours, l'intelligence artificielle apparaît complémentaire des démarches de modélisation développées dans la discipline. Des travaux de plus en plus nombreux de mécanique des fluides en intègrent d'ailleurs les possibilités, en combinant par exemple modélisation physique et utilisation d'algorithmes tirant le meilleur parti d'informations puisées dans de grandes bases de données.

Annexe C - Quelques repères en mécanique des solides et des structures

Il convient d'abord de rappeler le vaste socle commun que partagent la mécanique des solides et la mécanique des fluides. L'unité de ces deux domaines scientifiques, bien visible dans les concepts de base de la mécanique des milieux continus, se prolonge aussi bien dans les approches d'investigations (expérimentales, théoriques, et numériques) que dans les interactions que développe chacun d'eux avec des disciplines

telles que les mathématiques, la physique, la biologie, etc.

Les champs couverts par ce qu'il est convenu d'appeler mécanique des solides sont larges. Ils incluent de façon non exhaustive :

- la recherche fondamentale sur les concepts de la mécanique des solides ;
- l'ingénierie des matériaux et des structures avec un apport important de la simulation pour la prévision et la prise de décision ;
- l'acoustique de la source (vibrations) à la perception des sons (psycho-acoustique) en passant par la propagation (fluide-solide) ;
- les interactions avec les disciplines voisines, donnant naissance à des domaines pluridisciplinaires (biomécanique, géomécanique et robotique en sont quelques exemples).

Il n'est pas inutile, avant d'aborder le futur, de reconnaître les progrès réalisés au cours des trois dernières décennies.

C. 1 - Bases théoriques et avancées récentes

Les travaux fondamentaux amorcés dans les années 1950 se sont d'abord prolongés pendant une vingtaine d'années dans différentes directions, parmi lesquelles on pourrait noter à titre indicatif l'introduction et le développement d'approches nouvelles pour les comportements non linéaires des matériaux et des structures, et pour le calcul de structures : cadre thermodynamique des processus irréversibles, bases de la méthode des éléments finis... Si les années 1980 ont confirmé l'essor de la discipline, elles ont en particulier connu la consolidation des approches précitées, en même temps que le développement de nouvelles synergies entre elles ; on pourrait par exemple souligner les premiers développements des méthodes d'homogénéisation (asymptotiques ou de milieux aléatoires) en contexte non linéaire (viscoplasticité, endommagement, etc.). C'est incontestablement les années 1990 qui ont permis une explosion à la fois des méthodes de calculs numériques performantes, ainsi que des approches variationnelles plus spécifiquement dédiées aux problèmes non linéaires (plasticité, endommagement rupture).

Pour éviter un long catalogue, et en se concentrant ici sur les apports de la recherche fondamentale en mécanique des solides, on retiendra en résumé qu'elle a permis :

- la rationalisation des principaux concepts de la mécanique des milieux continus ;
- la formulation des lois de comportement des matériaux dans un cadre conceptuel robuste ;
- le développement des méthodes variationnelles, base théorique sur laquelle s'est appuyé le développement spectaculaire des méthodes de simulation numérique bénéficiant du développement simultané des moyens de calculs. Nous reviendrons sur les simulations numériques ;
- la création d'une théorie de l'homogénéisation des milieux hétérogènes et plus largement d'un corpus théorique pour les problèmes multi-échelles ;
- le développement de méthodes géométriques modernes pour le fondement de la mécanique ainsi que l'écriture d'algorithmes numériques robustes qui s'avèrent prometteurs. On peut également citer les avancées récentes dans la théorie des invariants en mécanique grâce à des outils de géométrie algébrique. Une

structuration de cette activité est en cours en France grâce à un regroupement entre mécaniciens théoriciens et géomètres, afin de renouveler la géométrisation de la mécanique non linéaire.

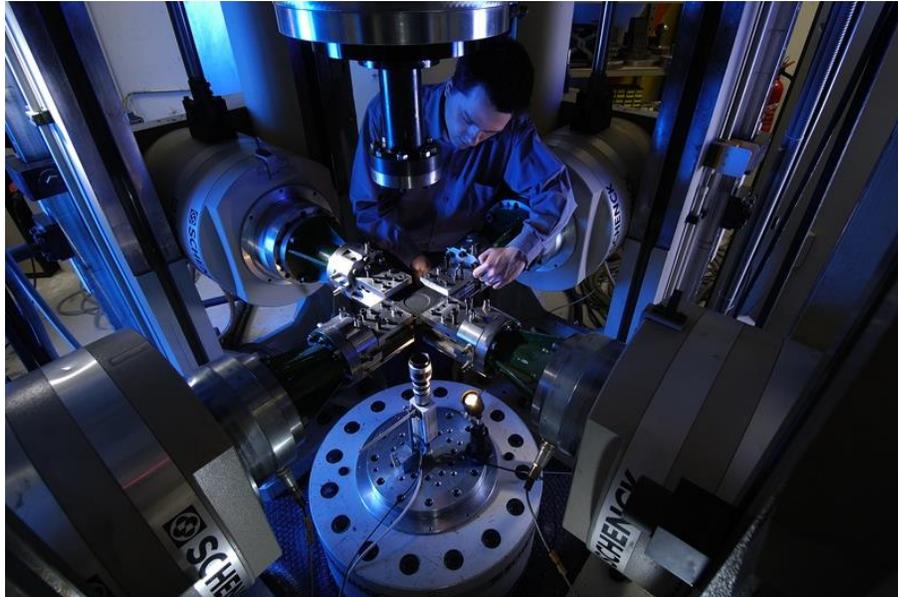


Photo : Laboratoire de mécanique et technologie, ENS – Paris Saclay, CNRS.

Avancées récentes en mécanique des solides expérimentale

Ce sont manifestement les méthodes expérimentales particulièrement innovantes et à base d'imagerie (corrélation d'images numériques, microtomographie, etc.), couplées parfois à des techniques de réduction de modèles, qui ont probablement connu l'essor le plus spectaculaire en mécanique des solides depuis un peu plus d'une décennie. Au point que bon nombre de recherches conduites aujourd'hui en mécanique des matériaux de structures s'appuient presque systématiquement sur une démarche alliant des caractérisations/observations de plus en plus fines (aux échelles pertinentes) et des modèles robustes de comportement à identifier ou à valider. Un tel dialogue, de plus en plus enrichi par la prise en compte de l'incertain (mentionnons les remarquables avancées réalisées en mécanique stochastique ces deux dernières décennies), a aussi favorisé la mise en place d'un continuum ingénierie des matériaux - analyse de fiabilité et de durabilité des structures.

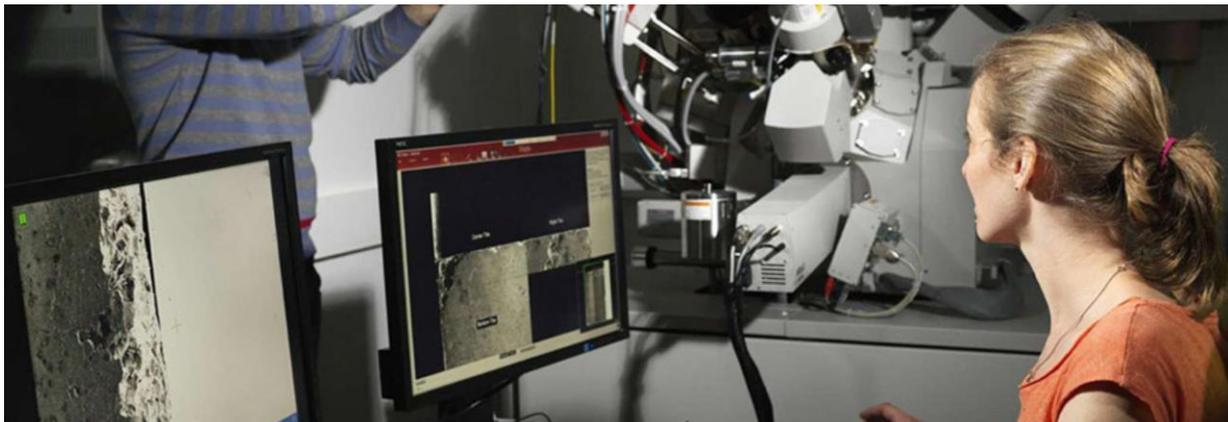


Photo : Laboratoire MSS-Mat, CNRS, CentraleSupélec.

C. 2 - Calcul des structures et simulations numériques

Enfin, une mention spéciale doit être faite du déploiement sans précédent de méthodes de calcul et de simulations numériques (éléments finis, méthodes spectrales, éléments finis étendus, etc.) déjà évoquées pour le calcul de structures, auxquelles on peut ajouter la conception assistée par ordinateur (CAO). L'avènement il y a une vingtaine d'années des approches dites par champ de phase constitue également un fait remarquable qui laisse deviner une certaine convergence entre la mécanique des milieux continus généralisés et la science des matériaux. En fait, les moyens de simulations disponibles ou en développement sont aussi, pour certains d'entre eux, dédiés en partie à la compréhension des phénomènes et à la génération de données de référence. Ces simulations numériques directes sont légions en mécanique des fluides ; elles ont connu un intérêt grandissant ces dernières années en mécanique des solides, tout en tirant profit des méthodes de réduction de modèles dont certaines étaient connues. On peut raisonnablement imaginer que les simulations numériques en mécanique connaîtront de nouvelles avancées dans plusieurs domaines, dont ceux qui concernent la modélisation de phénomènes multiphysiques couplés que l'on rencontre dans plusieurs secteurs d'applications industriels (par exemple les procédés). Les attentes les plus fortes vis-à-vis du numérique sont sans aucun doute dirigées vers ce qu'il est maintenant convenu d'appeler le « *Data-driven mechanics* » et qui n'en est qu'à ces débuts. Au-delà du scepticisme que cela peut légitimement susciter, il y a sans doute là une opportunité pour la mécanique qu'il conviendra de saisir en tentant de marier de telles approches avec des modèles physiquement fondés et mathématiquement cohérents. À cette fin, les liens avec les mathématiques appliquées, avec la physique des solides, la science des matériaux (sans oublier la métallurgie physique) devront continuer d'être affermis.

Au-delà donc des apparences qui peuvent donner l'impression d'un émiettement du champ de la mécanique des solides, il semblerait au contraire qu'on assiste à un rapprochement très net, voire une certaine convergence, des approches et méthodes expérimentales, théoriques et numériques. Ceci concerne toutes les classes de matériaux de structures (métaux, composites, matériaux à base cimentaires, milieux granulaires, matériaux fibreux, matériaux issus de la fabrication additive, etc.) et s'avère très prometteur dans une perspective d'applications industrielles.

C. 3 - Des applications de plus en plus complexes

Il est maintenant possible d'envisager des applications des recherches avec toute la complexité que recèlent de nombreux secteurs de l'industrie mécanique, des transports, de l'énergie ou de la construction, qui font l'objet d'une forte demande sociétale. Bien entendu, cela doit se faire en maintenant une recherche de base de très grande qualité et une réflexion amont qui permettront de nourrir continuellement ces applications ou même d'être suscitées par elles. Dans cette perspective, il va de soi que les enjeux en matière de formation de base en mécanique sont énormes et doivent être en permanence soutenus.

À l'instar de la mécanique des solides fondamentale, le même bilan pourrait être tiré dans les autres champs cités plus haut, avec notamment les progrès spectaculaires effectués dans les moyens expérimentaux, l'imagerie par exemple, la mécanique étant à la fois

bénéficiaire et contributrice fondamentale de ces progrès. Il convient de souligner le fait nouveau que ces progrès ont été accomplis à différentes échelles.

C. 4 - Rayonnement international

Tout cela place la communauté scientifique nationale dans les toutes premières au niveau international en matière de publications. Encore à titre de référence, nous nous plaçons au 3^e rang mondial aussi bien en mécanique/physique des solides qu'en mécanique des solides numérique, avec de plus une position de leader dans certaines thématiques.

C. 5 - La biomécanique, une composante essentielle

L'engouement croissant pour la « mécanique pour le vivant », ainsi que vis-à-vis des interactions de notre discipline avec la biologie, est une réalité à prendre pleinement en compte. Paradoxalement, on pourra noter que ces interactions avec la biologie sont de nature à renforcer en même temps les liens entre les deux composantes, fluides et solides, de la mécanique. Un autre exemple de grand intérêt est le développement d'une mécanique aux très petites échelles. Ce domaine émergent suscite de nouvelles questions difficiles impliquant les surfaces et interfaces (solide-solide, ou solide-fluide). Certaines de ces questions sont déjà bien connues des mécaniciens tribologues ; d'autres nécessiteront probablement de repenser des pans entiers de la mécanique des solides.

C. 6 - Les interactions avec l'acoustique

L'acoustique entretient avec la mécanique des solides des liens privilégiés, au point que son regroupement dans la même section CNRS (section 09) avec la mécanique des solides et la biomécanique n'a rien de surprenant. Outre ceux du domaine de la vibroacoustique, ces liens sont appelés à se renforcer dans le futur, notamment dans les deux secteurs majeurs que sont le contrôle non destructif de pièces mécaniques et la propagation d'ondes dans les milieux vivants. On commence à entrevoir les applications biomédicales qui en résultent.

C. 7 - Résumé de quelques perspectives pour le futur

Ce serait une erreur de croire que le cadre de la discipline est figé et qu'il ne reste plus qu'à développer de nouvelles applications des avancées d'un passé proche en y ajoutant quelques ingrédients récents. Les concepts et les outils sont en constante évolution sous l'effet d'exigences sociétales, environnementales ou économiques.

Citons pour résumer, quelques-uns des défis majeurs qui se présentent :

- les exigences sociétales en matière de durabilité/fiabilité des matériaux et des structures sont de plus en plus fortes : sécurité et durée de vie des installations (durée de vie des centrales nucléaires, tenue des ouvrages de génie civil), résistance aux phénomènes extrêmes causés par les changements climatiques, risques environnementaux ;
- les technologies les plus récentes, y compris dans le domaine biomédical, se dirigent vers des échelles très fines. L'exploration du comportement des matériaux à ces échelles demande d'y revisiter la mécanique des milieux continus en introduisant des longueurs caractéristiques (ses prévisions sont alors

étonnamment bonnes mais nécessitent d'être consolidées et les simulations systématisées) ;

- les disciplines émergeant aux interfaces nécessitent d'explorer les couplages entre les phénomènes mécaniques et d'autres phénomènes physiques (acoustiques, thermiques, électriques, magnétiques, biologiques...). La mécanobiologie a démontré le rôle fondamental des actions mécaniques sur le développement des cellules. Une mécanique à cette échelle, intégrant chimie, biologie et mécanique, reste à fonder sur des bases conceptuelles solides ;
- de nouvelles techniques numériques, comme l'intelligence artificielle (IA), ouvrent des perspectives enthousiasmantes, parfois vues comme concurrentes mais en réalité complémentaires de la modélisation physique. La mécanique a été la première discipline à utiliser et à contribuer aux progrès de la simulation numérique dans la seconde moitié du XX^e siècle. Dès le début de l'intelligence artificielle (il y a une trentaine d'années), les interactions fructueuses, notamment dans les filières de fabrication, qui pouvaient résulter de ces techniques ont été identifiées (création du GdR Calcul de structure et intelligence artificielle dans les années 1980). Les progrès récents de l'IA sont spectaculaires et l'ensemble de la mécanique doit les intégrer. Mais il ne faut pas s'y tromper : sans un modèle physique robuste, les algorithmes généraux, au fonctionnement parfois mal compris, sont lents et peuvent conduire à des extrapolations hasardeuses. Un usage bien compris de ce domaine nouveau implique des interactions fortes avec les disciplines plus traditionnelles. En l'occurrence, avec la mécanique dès lors qu'on parle de corps en mouvement.

Annexe D - Transferts thermiques et énergétique

La thermique traite de l'une des formes les plus usuelles de l'énergie : la chaleur. Elle s'intéresse à tous les phénomènes liés au transfert d'énergie et intègre naturellement les interactions et les couplages entre les mécanismes de transfert de chaleur d'une part, de masse d'autre part et à des phénomènes étudiés dans d'autres champs disciplinaires (mécanique des fluides et des solides, génie des procédés, combustion, science des matériaux, génie électrique, physique, chimie) et ce, quelles que soient les échelles spatiotemporelles considérées. Les transferts thermiques sont omniprésents dans les différents domaines de la mécanique. Les comportements des matériaux, fluides et solides, sont influencés par la température et par les sollicitations thermiques. La thermique est également associée à l'énergétique, c'est-à-dire à la science des conversions entre les différentes formes d'énergie : elle permet de comprendre comment ces conversions, nécessairement imparfaites entre sources, se traduisent par une dissipation thermique et donc par des flux de chaleur conditionnés par l'environnement externe des convertisseurs.

D. 1 - Domaines scientifiques et avancées récentes

On peut classer les thématiques actuelles par domaines scientifiques, tout en faisant référence aux applications dans les grands secteurs socio-économiques et industriels.

Transferts radiatifs dans les milieux semi-transparentes

Les travaux les plus saillants portent sur le rayonnement des gaz et des plasmas, les couplages radiatifs, les transferts radiatifs dans les milieux hétérogènes, la caractérisation fine des propriétés radiatives des matériaux, la conception de matériaux à propriétés radiatives optimales et l'approche statistique du rayonnement. La communauté française, très active à l'échelle internationale, entretient de nombreux liens avec des partenaires académiques et industriels de la combustion, de la thermique du bâtiment, des énergies renouvelables, des plasmas froids (génie des procédés et matériaux) et chauds (tokamaks), de la science des matériaux et des procédés d'élaboration et de mise en forme (caractérisation des propriétés radiatives des surfaces et interfaces, matériaux hétérogènes semi-transparentes, matériaux pour l'énergie, fours électriques/ induction) et du secteur aéronautique et spatial. Les travaux en cours couplant transferts en champs proche et lointain cherchent à obtenir une vision unifiée du transport radiatif, de l'échelle atomique à celle des systèmes industriels.

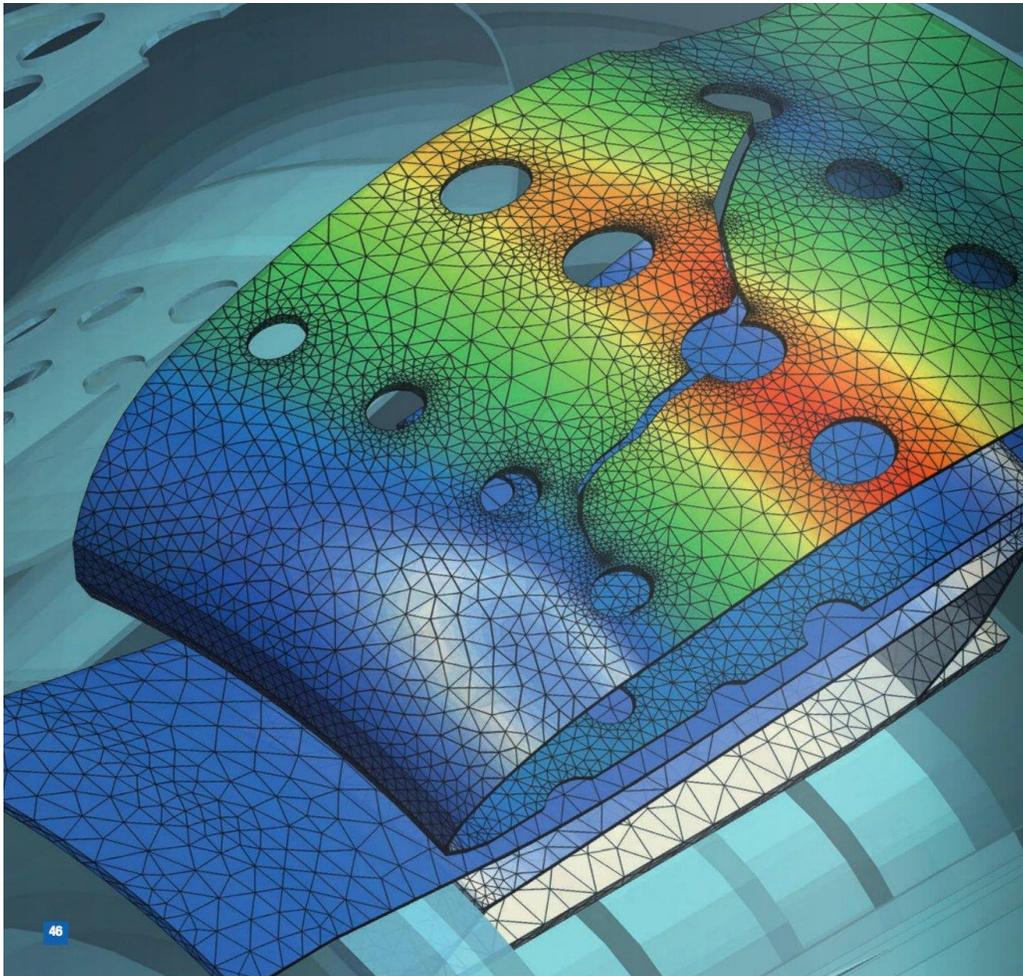
Les transferts thermiques convectifs dans les fluides et milieux monophasiques

Il s'agit des instabilités, de la turbulence, de la manipulation des structures thermoconvectives (tourbillons de Rayleigh-Bénard, allées de Von Karman, avec des applications dans le domaine de l'intensification des échanges chaleur/masse) et enfin de la problématique des écoulements de fluides complexes (non newtoniens et/ou thermodépendants, émulsions, suspensions), avec une demande du secteur agroalimentaire.

Les transferts aux micro et nanoéchelles

Cette thématique inclut (i) Les écoulements avec ou sans changement de phase dans les caloducs et les mini-échangeurs, et les questions qui traitent de l'intensification des

transferts dans des systèmes très divers (réfrigération, électronique, piles à combustible) ; (ii) La conduction dans les microstructures, les couches de très faible épaisseur et les interfaces, avec des applications en science des matériaux et en électronique (procédés d'élaboration de couches minces et dépôts), ou pour des éléments fonctionnant à haute température (barrières thermiques) ; (iii) Les transferts d'énergie aux échelles ultimes de la matière où la loi de Fourier pour la conduction, les équations de Navier-Stokes pour la dynamique des fluides et la loi de Planck pour le rayonnement ne sont plus adaptées du fait des très courtes échelles spatiotemporelles mises en jeu. Ces phénomènes se produisent respectivement lorsque le libre parcours des phonons, des molécules, ou des photons devient supérieur à la taille du système considéré. C'est notamment le cas des films « minces » au sens de la physique du solide, avec des applications en électronique, thermoélectricité et dans les superisolants à nanoporosité et transport balistique des phonons.



Simulation numérique de la fissuration d'une chambre de combustion de moteur aéronautique, soumise à un chargement de fatigue thermomécanique. Les couleurs représentent les isovaleurs du champ de température. Le calcul a été mené avec le code aux éléments finis Z-set à l'Onera.

Enfin, ils concernent aussi les transferts radiatifs paroi/paroi avec échanges assurés par les modes électromagnétiques de surface. Cette thématique se situe à l'intersection de la physique du solide, de l'électromagnétisme et de la thermique. Les enjeux sont ceux des nanotechnologies et des structures matérielles associées (nanotubes de carbone...) pour

des applications dont le nombre explose, tant en sciences de la matière et de l'énergie que dans celles de l'information.

Transferts multiphasiques dans les milieux hétérogènes

Cette thématique couvre d'une part la thermique des milieux multiphasiques où interviennent des changements de phase : condensation, évaporation, ébullition, avec une prise en compte du rôle exercé par les interfaces dont l'étude est généralement motivée par des problématiques industrielles provenant par exemple du secteur énergétique (condenseurs, évaporateurs, bouilleurs) ou de l'élaboration des matériaux (solidification contrôlée par jets ou sprays) avec des problématiques d'intensification des transferts, où la collaboration avec les physicochimistes est indispensable (effet de la texturation des surfaces en ébullition externe par exemple).

On considère d'autre part les transferts thermiques dans les milieux poreux, un sujet traité en France par une communauté très reconnue et dont l'originalité est fondée sur le développement de méthodes d'homogénéisation, par prise de moyenne volumique ou approches asymptotiques, permettant de combiner les différentes échelles contribuant au transport. Cette dynamique s'appuie aussi sur le développement de méthodes de calcul intégrant directement des images 3D (μ -tomographie X, IRM...) permettant de connecter grandeurs homogénéisées et paramètres texturaux des milieux. Les applications sont multiples : matériaux pour l'isolation, séchage, géothermie, sûreté nucléaire, biologie, stockage des déchets, incendies, mise en forme des composites, filtration, réacteurs de génie chimique, piles à combustible, pyrolyse et combustion de la biomasse...

Les transferts aux interfaces, d'abord solide/solide avec contact fixe ou mobile, avec les problématiques thermomécaniques des résistances thermiques de contact (assemblages et collages, tribologie et freinage, usinage). On trouve ici également la problématique des transferts pariétaux aux interfaces paroi/fluide, avec les problèmes de modélisation nécessaire au dépassement de l'approche classique basée sur les modèles simples utilisant les coefficients d'échange issus des corrélations traditionnelles de la convection thermique ou massique. Là aussi, les domaines d'applications sont nombreux : intensification des transferts, ébullition et condensation, échangeurs/ stockeurs pour la récupération de la chaleur fatale. Les progrès dans ces domaines nécessitent une coopération active entre thermiciens et mécaniciens des fluides, ainsi que la prise en compte des régimes transitoires dans les modélisations.

L'optimisation énergétique des systèmes

Elle concerne tous les domaines où l'application devient le cœur de la discipline, les transferts de chaleur étant couplés avec d'autres phénomènes, de transfert de masse, mécaniques, physicochimiques, électriques, électroniques, biochimiques ou même aux sciences de l'environnement et de l'Univers. Il est possible de distinguer ici notamment : les échangeurs de chaleur, les machines thermiques, l'électronique et l'électrotechnique, les piles à combustible, le solaire thermique et photovoltaïque, la thermique des procédés agroalimentaires et de mise en forme des matériaux, la gestion du froid et de la chaleur, la thermique du bâtiment et de l'environnement, la thermique du vivant, les matériaux et fluides à haute température. L'approche thermodynamique/énergétique est indispensable pour concevoir et optimiser les cycles moteurs et récepteurs utilisant un fluide thermodynamique et plusieurs fluides caloporteurs (moteurs à combustion interne, turbines à gaz, moteurs aéronautiques, réfrigérateurs, pompes à chaleur) ou plus

généralement pour tout système moteur ou récepteur équipé d'auxiliaires (pile à combustible par exemple). La maximisation du rendement s'appuie sur l'analyse des bilans énergétiques ou exergétiques avec comme objectif la réduction des causes d'irréversibilité.

La métrologie thermique

Il s'agit d'abord des techniques de mesure directe. Par direct, on entend les mesures, de température par exemple, issues de capteurs dont le principe est basé sur une instrumentation conçue à cet effet, souvent par les physiciens (effet Seebeck pour les thermocouples, détecteurs quantiques pour les caméras infrarouges...) et dont le thermicien est un expert de la mise en œuvre (paramètres d'influence, implantation et conception des capteurs « invisibles » thermiquement...).

La métrologie thermique intègre de plus en plus les méthodes inverses, d'abord pour la caractérisation thermophysique de matériaux. Une autre application est celle de l'estimation, au sens statistique, des flux en utilisant la conduction inverse en régime le plus souvent instationnaire. Ces techniques de fluxmétrie non intrusives deviennent maintenant de plus en plus populaires, non seulement en laboratoire de thermique, mais dans l'industrie et dans d'autres domaines (fluxmètres pour l'injection en plasturgie, fluxmétrie en paroi dans les tokamaks ou aux interfaces dans les composants électroniques).

La modélisation et la simulation

Les méthodes de modélisation et simulation numérique sont largement déployées depuis quelques années dans le domaine des transferts convectifs, pour prendre en compte la turbulence au moyen de simulations directes (DNS : *Direct Numerical Simulation*) ou de simulation des grandes échelles (LES : *Large Eddy Simulation*), en exploitant les ressources accrues des ordinateurs. Des couplages sont aussi réalisés entre les simulations des grandes échelles pour les écoulements et le transfert radiatif. On assiste également au développement rapide des méthodes de Boltzmann sur réseaux (Lattice-Boltzmann), qui permettent d'aborder l'analyse de systèmes complexes avec des moyens informatiques limités, avec des succès dans l'approche de problèmes de turbulence ou des écoulements multiphasiques.

D. 2 - Les orientations

Dans un contexte énergétique et économique tendu, il y a une forte demande de recherche en transferts thermiques dans le domaine de l'énergie. On peut citer des problèmes complexes comme celui de la récupération de la chaleur issue du plasma dans les cœurs de tokamak (ITER), celui de la fatigue thermomécanique dans les centrales nucléaires au sein desquelles les matériaux sont soumis à des alternances d'écoulements chauds et froids (CEA, IRSN), et aussi le développement des différentes techniques optiques (photo- ou thermomécanique) avec l'intéressant problème du pilotage des différents champs. Les recherches menées dans le domaine des transferts thermiques sont motivées par de nombreux enjeux de société : solaire concentré, émissions polluantes dans les systèmes de combustion, imagerie médicale, climatologie, planétologie, systèmes embarqués (refroidissement de l'électronique dans le transport ferroviaire, automobile, aéronautique et spatial), procédés industriels, biologiques, lutte contre les feux, intensification des transferts, efficacité énergétique, thermique des bâtiments, nouvelles énergies, ITER... D'une façon générale, la thermique devient un

facteur incontournable pour gérer l'énergie, optimiser et contrôler les systèmes industriels, concevoir des matériaux nouveaux...

Depuis le début des années 2000, du fait du réchauffement climatique, de la raréfaction des ressources fossiles et du renchérissement correspondant, la problématique de l'énergie est devenue un sujet de plus en plus présent.

Un objectif constant est celui de la recherche d'une meilleure efficacité énergétique, dans le secteur de l'énergie, dans tous les secteurs des procédés (métallurgie, cimenterie, plasturgie...), dans l'habitat, le tertiaire et les transports. Au niveau industriel, cela doit conduire à une récupération systématique des rejets thermiques où la chaleur perdue par un procédé pourrait servir de source chaude à un autre procédé ; la même démarche est à promouvoir et à intensifier dans les procédés cycliques (alternativement chauffés et refroidis) comme ceux rencontrés dans l'industrie verrière par exemple. Les enjeux ne sont pas seulement techniques et économiques, mais surtout méthodologiques, et les approches basées sur la thermodynamique (méthode du « pincement » par exemple) doivent occuper une place primordiale, pour savoir où placer un échangeur ou une pompe à chaleur.

Un autre objectif est celui de la valorisation des chaleurs fatales et du rayonnement solaire collecté et converti en chaleur. Il faut pour cela maîtriser les régimes intermittents afin d'apparier fourniture et demande de puissance, et donc concevoir soit des systèmes de stockage, c'est-à-dire des « batteries thermiques » basées sur le changement de phase ou sur la variation de la chaleur sensible, soit passer par le vecteur hydrogène afin d'assurer cet indispensable lissage. Cet aspect présuppose la conception et l'optimisation de systèmes originaux.

Les verrous scientifiques et technologiques à traiter sont nombreux : développement de systèmes énergétiques innovants capables de stocker l'énergie ou de récupérer la chaleur fatale ; développement des matériaux pour l'énergie, c'est-à-dire des matériaux résistant aux conditions extrêmes : hautes températures et hautes pressions, hauts flux, avec la thématique centrale de leur vieillissement ; mise au point de matériaux isolants et superisolants à la fois écologiques et économiques ; matériaux capables de stocker l'hydrogène de façon réversible ; matériaux, à changement de phase ou non, capables de stocker et restituer la chaleur avec des flux importants (matériaux conducteurs) ; problème du raccordement matériel et de sa modélisation, des composants nanothermiques au monde de la thermique classique (changement d'échelle) ; développement d'une métrologie thermique adaptée, permettant d'évaluer des flux thermiques de manière non intrusive (techniques inverses) et l'amélioration des techniques de caractérisation thermique, notamment pour les matériaux hétérogènes et pour les dépôts ; application de la thermique aux grandes échelles, c'est-à-dire à celles de l'environnement (une agglomération, par exemple, en dépassant l'échelle habituelle de la thermique du bâtiment), intégrant une modélisation stochastique du fait d'une méconnaissance croissante des paramètres du système et des sources de chaleur (éclairage solaire, température ambiante ...).

D. 3 - La position française par rapport à l'international

La thermique française est active sur la scène internationale et très présente dans les conférences comme International Heat Transfer Conference (IHTC), International Center for Heat and Mass Transfer (ICHMT), etc. Si l'on prend par exemple le critère du nombre de communications soumises au congrès mondial quadriennal de thermique (International Heat Transfer Conference, août 2014, Kyoto), on observe qu'environ 8 % sont français, derrière la Chine et le Japon, mais devant les autres grands pays européens (Allemagne, Royaume-Uni et Italie).

D. 4 - Conclusion

Les questions de transferts thermiques couvrent une large gamme d'échelles incluant les nanoéchelles (très proche de la physique), celles plus métrologiques à l'échelle du composant, et celles des systèmes et des procédés. Ces problématiques se situent donc pour une large part aux interfaces avec d'autres disciplines : physique de la matière condensée, optique, électromagnétisme, matériaux, mécanique des fluides, génie des procédés, biologie... Des efforts particuliers sont à mener vers les sciences des matériaux car la conception de systèmes énergétiques optimisés passe nécessairement par le recours à des matériaux « hors normes » et par une interaction « intelligente » entre leurs composants. Les préoccupations liées à la transition énergétique doivent aujourd'hui ouvrir à la discipline un champ d'action favorable à un nouvel essor : qu'il s'agisse de conversion, de stockage ou d'utilisation optimisée de l'énergie thermique au sein de systèmes, les transferts thermiques sont au cœur de nombreux verrous actuels.

Annexe E - La combustion et l'énergie

La combustion procure actuellement 85 % de l'énergie primaire dans le monde. Elle intervient dans une variété d'activités, fournit l'énergie de la majeure partie des véhicules automobiles, fait voler les avions et les fusées, procure l'énergie pour un grand nombre de procédés industriels (ciments, verres, métaux...). La combustion est aussi source de risques (feux, incendies, explosions) et elle est source de gaz à effet de serre et de pollution de l'air. Un objectif constant dans le domaine est d'augmenter l'efficacité en réduisant la consommation et les émissions polluantes et en améliorant la fiabilité et la sécurité des procédés. Une difficulté majeure pour l'avenir, largement sous-estimée, sera de réussir à remplacer les énergies fossiles dans un grand nombre d'applications. On peut augmenter la part des carburants issus de la biomasse mais les quantités qui pourraient être produites sont limitées par la disponibilité des sols. Pour certaines applications comme celles de la propulsion aéronautique et spatiale ou encore celle du transport maritime, il n'y a pas d'alternative à l'utilisation de la combustion et les combustibles liquides donnent encore les meilleures densités d'énergie massiques ou volumiques. Dans les procédés d'élaboration de matériaux comme le verre ou le ciment, la combustion est difficilement contournable.

L'analyse de la combustion fait intervenir une variété de disciplines scientifiques avec notamment la mécanique des fluides, la physicochimie et la cinétique des réactions, la thermodynamique et les phénomènes de transport, cumulant les difficultés de ces

domaines. La cinétique fait intervenir des dizaines à des centaines d'espèces et des dizaines à des milliers de réactions avec des vitesses de réaction qui suivent les lois exponentielles d'Arrhenius, ce qui donne aux problèmes de combustion un caractère mathématiquement « raide ». Ces problèmes sont également multi-échelles avec des zones de réaction de quelques dixièmes de millimètre à peine, tandis que les systèmes considérés ont des dimensions souvent très grandes avec des écoulements turbulents caractérisés par une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. Une autre complexité est liée au fait que beaucoup de combustibles utilisés en pratique sont solides ou liquides, ce qui nécessite le traitement de plusieurs phases.

La combustion pose de nombreux problèmes d'interactions et de couplage. C'est ainsi que des oscillations de grande amplitude peuvent résulter du couplage résonant entre la combustion et les modes acoustiques du système, induisant une dégradation des performances, une fatigue des structures, l'intensification des flux de chaleur aux parois et, dans les cas extrêmes, des accidents qui peuvent s'avérer catastrophiques dans les systèmes à haute performance (comme les systèmes de propulsion) ou dans ceux qui gèrent des énergies élevées. Le couplage avec les divers modes de transfert thermique et notamment avec le rayonnement est aussi d'une grande importance pratique.

Les phénomènes de combustion impliquent des configurations géométriques complexes et des conditions de fonctionnement particulières avec la présence de plusieurs phases. La combustion est souvent réalisée à des pressions élevées, voire extrêmes comme dans les moteurs-fusées où les conditions sont transcritiques. Des questions aussi complexes nécessitent de mener de front des études sur des problèmes fondamentaux dans des configurations simplifiées et d'autres plus appliquées sur des systèmes plus proches des situations pratiques.

E. 1 - Bases théoriques et avancées récentes

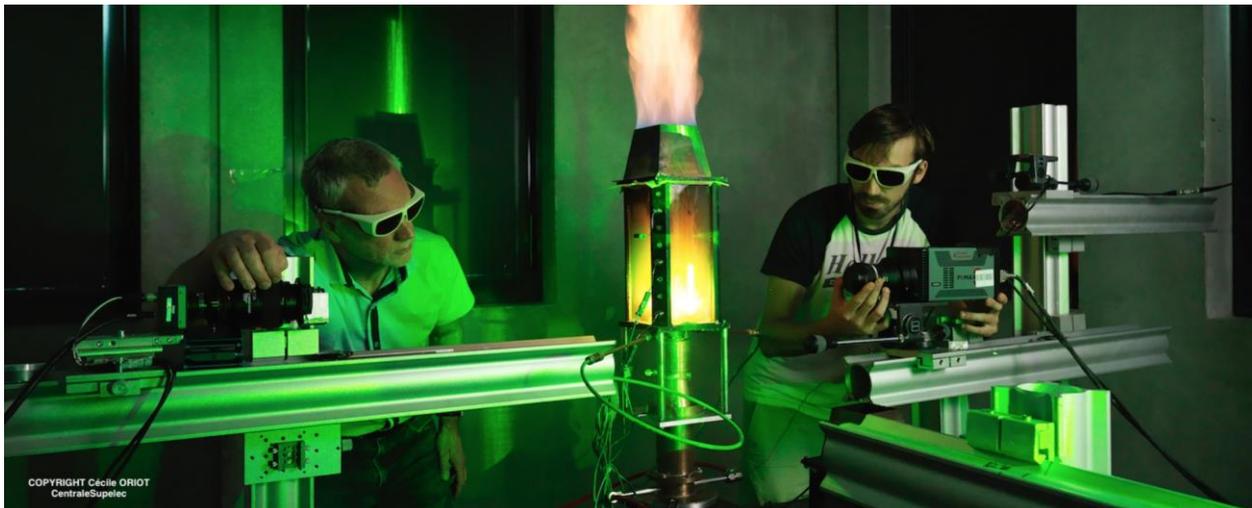
La théorie a progressé d'une façon remarquable à partir des années 1960 avec notamment l'utilisation des techniques asymptotiques, des méthodes de réduction de schéma cinétique, des techniques de tabulation de la chimie. D'autres travaux ont permis de mieux comprendre les interactions des flammes avec les écoulements, les tourbillons, la turbulence, les modes acoustiques et de décrire ces mécanismes au moyen de modèles unifiés. Des progrès ont été réalisés dans le domaine de la cinétique chimique de la combustion avec l'amélioration des schémas pour des hydrocarbures comportant un grand nombre d'atomes de carbone. La question de la combustion turbulente a été abordée par le biais de stratégies de modélisation très variées, utilisant par exemple les notions de fonctions de densité de probabilité (PDF) ou de densité de surface de flamme. L'effort de modélisation initialement réalisé dans le cadre des équations de Reynolds moyennées s'est plus récemment orienté vers la simulation des grandes échelles.

Sur le plan expérimental, des progrès ont été réalisés avec le développement de techniques de diagnostics optiques utilisant les lasers et des caméras numériques intensifiées. Des mesures instantanées non intrusives, multidimensionnelles, multiscalaires ont ainsi été réalisées à basse, puis à haute cadence (PIV, Raman spontané, Raman cohérent, LIF essentiellement). Des méthodes ont aussi été développées pour caractériser les phases liquides dispersées (LIF, Phase Doppler) ou pour mesurer les fractions volumiques de particules de suie par incandescence induite

par laser (LII).

Dans le domaine du calcul, les développements les plus remarquables ont trait à la simulation des grandes échelles (LES), avec le développement de codes de calcul comme AVBP ou YALES2 issus de travaux collaboratifs regroupant des organismes comme le Cerfacs, l'Ifpen et les laboratoires du CNRS et exploitant au mieux les performances des machines massivement parallèles apparues dans les années 1990.

Les calculs permettent de simuler des configurations de complexité croissante en tirant parti des capacités nouvelles des codes, de l'augmentation des puissances des processeurs, de la croissance du nombre de processeurs, de la vitesse de transfert des réseaux de transmission de données et de l'adaptation des méthodes de résolution aux nouvelles architectures parallèles. Le développement de la simulation des grandes échelles est actuellement largement engagé dans les laboratoires, avec des applications industrielles.



Étude de la production de suies par incandescence induite par plan laser. (Photo EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Cécile Oriot).

La simulation aux grandes échelles permet d'aborder des questions difficiles comme celle des instabilités de combustion, les variabilités cycliques dans les moteurs à combustion interne, l'estimation des flux de chaleur vers les parois des foyers, etc. Les calculs LES peuvent permettre des analyses de phénomènes instationnaires qui étaient inaccessibles aux méthodes moyennées classiques. La modélisation et la simulation ont fait des progrès significatifs dans le domaine des pressions élevées et en particulier pour ce qui a trait aux conditions transcritiques (la pression dépasse la valeur critique et la température d'injection est inférieure à la température critique). La prise en compte de chimies détaillées reste un sujet de recherche important, avec des avancées dans le développement et l'exploitation de méthodes fondées sur la réduction de schémas et la tabulation.

E. 2 - Résumé de quelques perspectives pour le futur

L'optimisation des processus de combustion est un enjeu permanent, pour réduire les

émissions polluantes sans diminuer les performances, tout en évitant les instabilités qui peuvent être induites par des couplages résonants. Dans un contexte d'épuisement des ressources fossiles, la réduction de la consommation dans toutes les utilisations de la combustion, et donc des émissions de gaz à effet de serre, est un objectif primordial. La réduction de la consommation n'est pas simplement un problème de combustion puisque l'efficacité de celle-ci est déjà excellente. Il s'agit de mieux récupérer l'énergie de la combustion, ce qui est plutôt une question de transferts thermiques, de cycle thermodynamique et d'architecture système. On peut dans ce cadre envisager de nouvelles technologies de combustion qui facilitent la capture des gaz à effets de serre. Pour les émissions polluantes, il s'agit d'explorer des architectures avancées, de nouvelles solutions pour l'injection, des systèmes de traitement des gaz d'échappement novateurs, des procédés innovants permettant la capture des gaz à effet de serre en vue de leur séquestration et pour cela poursuivre le développement de modèles et de méthodes permettant la prévision.

De nombreux défis scientifiques et technologiques sont à lever, impliquant une combinaison d'analyses théoriques, d'expérimentations mettant en jeu les diagnostics avancés, des modélisations intégrant les progrès déjà réalisés et des simulations utilisant les possibilités offertes par le calcul à haute performance, avec de nombreux sujets à caractère fondamental :

- modélisation cinétique pour des espèces et des combustibles classiques et alternatifs (biocarburants) qui pourraient trouver une utilisation pratique dans le futur. Méthodes *ab initio* pour le calcul des constantes de réaction, méthodes de réduction à partir des schémas détaillés, mise en œuvre pratique dans des approches de tabulation ;
- modélisation de la combustion turbulente avec prise en compte de la cinétique complexe au moyen de méthodes de réduction ou de tabulation ;
- systèmes d'injection, combustion diphasique, combustion à haute pression ;
- formation, destruction et traitement des polluants (oxydes d'azote, particules de suie, imbrûlés) ;
- dynamique et contrôle de la combustion ; instabilités, couplages et régimes transitoires (allumage, extinction, variations cycliques, démarrage à froid, flashback...), instabilités couplées par des modes azimutaux, combustion assistée par plasma, allumage par laser, robustesse des systèmes de contrôle de la combustion dans des environnements extrêmes.

On trouve aussi une variété de questions plus technologiques :

- développement de nouveaux procédés de combustion, de nouveaux systèmes, de nouvelles architectures de foyers ou de systèmes d'injection permettant une réduction de la consommation et des émissions polluantes, de nouveaux carburants, de nouveaux modèles (cinétiques, numériques) ;
- développement de systèmes de combustion avancés pour la propulsion et nouveaux modes de combustion (par onde de détonation ou à volume constant), matériaux énergétiques pour la propulsion, combustion à haute pression, injection et combustion dans des conditions transcritiques ;

ainsi que des sujets ayant trait à la sécurité :

- initiation et propagation des détonations, prévision de la transition déflagration/détonation, notamment dans des configurations industrielles complexes ;

- propagation des incendies et des feux de forêts, optimisation de la lutte contre les incendies.

Le développement de diagnostics avancés reste un enjeu permanent. L'accent est mis actuellement sur les techniques de mesures de suies en termes de fraction volumique, de distribution en tailles, de structure et de composition et sur les techniques de diagnostics quantitatifs rapides, permettant l'étude simultanée des champs de vitesse, de température, de mélange et la caractérisation des espèces et des taux de réactions. La mesure non intrusive de températures de parois constitue aussi un enjeu majeur pour beaucoup d'applications.

E. 3 - Simulation à haute performance

Dans le domaine de la simulation, l'objectif est maintenant de poursuivre le développement des modèles permettant une représentation plus fine des effets de la cinétique complexe, l'influence de phases dispersées sous forme liquide ou solide, le couplage de la dynamique de flamme avec les modes acoustiques du système, le couplage avec le rayonnement, l'interaction de la flamme avec les parois (influence sur la propagation, transferts thermiques, fatigue des matériaux...). L'objectif est de perfectionner les outils de calcul pour les besoins de la recherche et pour ceux de la conception et de l'optimisation de systèmes de combustion avancés. La quantification des incertitudes (UQ) et l'assimilation de données (ajustement du calcul en fonction des données expérimentales connues, classique en météo) constituent des sujets actuels. L'assimilation de données a déjà été explorée pour les feux de forêts et il s'agit d'une voie intéressante pour l'avenir. Enfin la tendance actuelle implique des couplages de codes pour traiter des phénomènes physiques en interaction au moyen de codes dédiés, l'exemple type étant celui de la combustion et du rayonnement qui demandent des architectures de codes très différentes.

Un élément clé dans le domaine du calcul est de faire émerger des codes de simulation communs, permettant l'intégration des développements réalisés, facilitant les collaborations interdisciplinaires ainsi que la mutualisation des efforts de développement pour viser la prochaine évolution vers l'exascale. Il ne s'agit pas d'une course à la puissance de calcul mais plutôt de rendre possible l'incorporation de mécanismes plus fins ou l'analyse de systèmes complets.

E. 4 - Enjeux industriels et sociétaux

La combustion intéresse beaucoup d'applications qui ont chacune des besoins spécifiques mais qui partagent aussi un noyau de connaissances commun (moteurs à combustion interne, turbines à gaz, foyers aéronautiques, procédés industriels). Dans les applications destinées à la production d'énergie, on recherche la plus grande flexibilité en termes de mode de conduite, de combustible, de technologies adaptées au captage du CO₂ (« *capture ready* »). Dans ce secteur, l'utilisation de combustibles solides reste importante avec un regain d'intérêt associé à la promotion de l'énergie de la biomasse, mais le sujet est insuffisamment étudié au niveau fondamental. Les objectifs industriels à atteindre concernent toujours la réduction des émissions (NOx, SOx, NOX, particules...).

La combustion concerne aussi les problèmes de sécurité, que ce soit en termes de prévention ou de lutte : incendies, feux de forêts, explosions, sûreté des installations industrielles ou des centrales nucléaires. Les feux de forêt sont aussi une source de pollution importante. Ce sont des thématiques qui méritent des efforts de recherche à la hauteur des enjeux économiques et sociétaux associés.

Le problème des particules est désormais l'objet de préoccupations permanentes et d'inquiétude pour la santé publique. Il s'agit dans ce domaine de faire progresser les connaissances sur la formation et la destruction des suies et des polluants et d'innover dans les systèmes permettant de réduire les émissions gazeuses ou de particules nanométriques.

E. 5 - Rayonnement international

La communauté française en combustion est de taille relativement réduite si on considère l'importance pratique du sujet et la taille d'autres communautés de recherche qui existent dans des domaines de moindre importance pratique. Cette communauté a appris à travailler d'une façon collective. Sa reconnaissance internationale est établie dans des domaines clés comme ceux de la combustion turbulente, de la dynamique de la combustion et des méthodes de simulation des grandes échelles. Dans le domaine de l'acquisition des connaissances fondamentales, les unités de recherche dans lesquelles le CNRS a un poids important jouent un rôle décisif qu'il convient de conforter et de développer pour (1) permettre à la communauté française en combustion d'assumer sa place au niveau international, (2) faire face aux sollicitations croissantes de l'industrie et prendre part à la résolution de problèmes de plus en plus difficiles.

E. 6 - Conclusion

Bien que le domaine de la combustion ait atteint un bon niveau de maturité, ce domaine pose toujours des défis considérables à forts impacts économiques et sociétaux. Des progrès dans la compréhension des phénomènes, dans leur modélisation et dans leur simulation sont nécessaires. Les problèmes de combustion sont d'autant plus importants qu'ils déterminent pour une bonne part les émissions polluantes. La réduction de consommation est un objectif permanent dans un contexte de raréfaction des ressources fossiles et de lutte contre les gaz à effet de serre. Pour traiter ces problèmes, il faut évidemment consolider l'effort de recherche dans ce domaine, encourager les collaborations entre les unités de recherche et les entreprises, rassembler les chercheurs des différents organismes autour de projets fédérateurs (propulsion, feux et incendies...). Il faut également structurer l'effort de recherche, en liaison avec les partenaires industriels, investir pour l'amélioration des capacités expérimentales en privilégiant les diagnostics optiques et laser, l'imagerie rapide et les moyens de traitement adaptés. Dans le domaine de la simulation, il faut à la fois recruter des chercheurs formés au calcul à haute performance et des ingénieurs pouvant apporter leur concours au développement de logiciels mutualisés d'envergure capitalisant les avancées faites par les unités de recherche. Enfin, l'accès aux moyens de calcul les plus puissants est aussi l'une des conditions de la réussite dans ce domaine.

Glossaire

A

Abaqus, Aster	Programmes de modélisation en mécanique des structures
ANR	Agence nationale de la recherche
ANRT	Association nationale recherche technologie
AVBP	Programme de résolution des équations de Navier-Stokes

C

CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEA-DAM	Direction des applications militaires du CEA
Cetim	Centre technique des industries mécaniques
CFAO	Conception et fabrication assistées par ordinateur
Cifre	Convention industrielle de formation par la recherche
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CNU	Conseil national des universités

E

ETI	Entreprises de taille intermédiaire
ERC	European Research Council

G

Genci	Grand équipement national de calcul intensif
-------	--

I

Ifpen	Institut français du pétrole et des énergies nouvelles
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (ex-Cemagref)
IRT	Institut de recherche technologique

M

MEMS	<i>Micro Electromechanical Systems</i>
------	--

N

NEMS	<i>Nano Electromechanical Systems</i>
------	---------------------------------------

O

Onera	Office national de recherches aérospatiales
-------	---

P

PME Petites et moyennes entreprises
Prace Partnership for the advancement of computing in Europe

R

R&D Recherche et développement

S

Satt Société d'accélération de transfert technologique

Y

Yales2 Programme de résolution des équations de Navier-Stokes

Groupe de travail

Sébastien Candel (AS), Michel Lebouché (HCM), Pierre Suquet (AS), Patrick Huerre (AS), Pierre Perrier (AS), Michel Combarrous (AS)†, Dany Vandromme (HCM), Eric Arquis (AFM-HCM), Mansour Afzali (HCM), Jean-Marie Virely (HCM), Marie-Ange Bueno (AFM), Aziz Hamdouni (AFM), Jacques Magnaudet (IMFT), Djimedo Kondo (Institut Jean Le Rond d'Alembert), Yves Rémond (CNRS), Jean-Paul Chabard (EDF), Jean-François Agassant (HCM).

Sébastien Candel est professeur des universités émérite à CentraleSupélec, université Paris-Saclay (laboratoire EM2C, CNRS). Membre de l'Académie des sciences, il en a été le président en 2017 et 2018.

Michel Lebouché est professeur des universités émérite à l'université de Lorraine. Il préside le Haut Comité Mécanique.

Pierre Suquet est directeur de recherche CNRS émérite au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Marseille. Il est membre de l'Académie des sciences

Patrick Huerre est directeur de recherche CNRS émérite au LadHyx. Il est membre de l'Académie des sciences

Pierre Perrier est membre correspondant de l'Académie des sciences et membre de l'Académie des technologies

Michel Combarrous† était membre correspondant de l'Académie des sciences et membre de l'Académie des technologies. Il avait été notamment directeur du département SPI du CNRS et président de l'université de Bordeaux.

Dany Vandromme est professeur émérite des universités à l'INSA de Rouen, membre du Haut Comité Mécanique.

Eric Arquis professeur des universités à Bordeaux-INP. Il est président de l'Association Française de Mécanique (AFM) et membre du Haut Comité de Mécanique

Mansour Afzali est un ancien conseiller scientifique du Cetim et est membre du Haut Comité Mécanique.

Jean-Marie Virely est professeur émérite à l'ENS Paris-Saclay, université Paris-Saclay, membre du Haut Comité Mécanique.

Marie Ange Bueno est professeur des universités à l'université de Haute Alsace. Elle est présidente du GTT AUM de l'Association Française de Mécanique.

Aziz Hamdouni est professeur à l'université de la Rochelle, élu au CA AFM et responsable de la commission recherche au sein du GTT AUM de l'AFM.

Jacques Magnaudet est directeur de recherche à l'IMFT, CNRS. Il a été président de la section 10 du Comité national de la recherche scientifique.

Djimedo Kondo est professeur des universités à l'UPMC, élu au CA AFM. Il a été président de la section 9 du Comité national de la recherche scientifique.

Yves Rémond est professeur des universités à l'université de Strasbourg. Il a été directeur adjoint de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes du CNRS.

Jean-Paul Chabard est directeur scientifique à EDF.

Jean-François Agassant est professeur émérite à Mines-ParisTech. Il a été directeur du Cemef Sophia Antipolis.

L'Académie des sciences, créée en 1666 par Jean-Baptiste Colbert, se consacre au développement des sciences et conseille les autorités gouvernementales en ce domaine. Indépendante et pérenne, placée sous la protection du Président de la République, elle est l'une des cinq académies siégeant à l'Institut de France. L'une des missions de l'Académie est d'encourager la vie scientifique. Elle le fait en invitant les scientifiques les plus brillants à présenter leurs travaux au cours de ses séances, en attribuant des prix aux meilleurs chercheurs et en élisant de nouveaux membres. L'Académie est engagée dans la promotion de l'éducation scientifique et dans la diffusion de la science et la transmission des connaissances. L'Académie a aussi été impliquée, dès l'origine, au niveau international dans des relations avec d'autres académies, dans les réseaux inter-académiques et elle porte une attention particulière aux pays en développement, notamment en Afrique. Dotée de nombreux comités et groupes de réflexion, l'Académie joue un rôle de conseil et d'expertise qu'elle exerce auprès des décideurs et du public en général.

Le Haut Comité Mécanique (HCM) créé en 1989 sous l'impulsion de Paul Germain, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, pour rapprocher les trois mondes des ingénieurs, des enseignants-chercheurs et des entreprises des industries mécaniques, est actuellement constitué des représentants de ces trois « collèges ». La Fédération des Industries Mécaniques (FIM) est étroitement associée à son fonctionnement. Le HCM est actuellement positionné comme le comité stratégique de l'Association Française de Mécanique (AFM), à la fois force de propositions et d'actions et vecteur de son rayonnement auprès des instances dirigeantes de l'administration et des grandes entreprises. Il se saisit des questions importantes pour la mécanique et établit, en fonction des grands enjeux, des recommandations précédant ou accompagnant les actions conduites par d'autres instances et en particulier par l'AFM. Le HCM a animé la réflexion qui a abouti à la rédaction du dernier livre blanc de la mécanique, en lien étroit avec le comité scientifique et technique de l'AFM. Le HCM cherche à promouvoir le rapprochement entre les industriels et les laboratoires de recherche académiques, s'efforce de contribuer à une meilleure lisibilité de l'offre de formation en mécanique et à son adaptation aux nouveaux enjeux industriels et sociétaux. Il veille également à développer l'existence d'une culture mécanicienne et industrielle au sein de l'enseignement secondaire.