

# **SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR**

Jean-Pierre BERTOGLIO

Jacques Bittoun  
Philippe Bompard  
Sébastien Candel  
Bernard Fontaine  
Daniel Juve  
Jean Kergomard  
Jean-Pierre Lefebvre  
Gérard Maugin  
Arnold Migus  
Antoine Rousseau  
Victor Sanchez  
Jean-Bernard Saulnier  
Daniel Tondeur

Le département des Sciences pour l'Ingénieur, SPI, est né en 1975 pour répondre aux nouvelles attentes de la société et plus particulièrement du monde industriel. Il remplit ses missions en développant des recherches essentiellement pluridisciplinaires. Il agit et réagit avec un large ensemble de disciplines : mathématiques, physique, biologie, chimie, économie, sociologie.

Ses chercheurs adaptent, assemblent, transposent les savoirs et bâtiennent de nouveaux concepts. La recherche en Sciences pour l'Ingénieur part de problèmes concrets qui correspondent le plus souvent à des besoins de société. En retour, les solutions à ces problèmes font progresser la connaissance fondamentale, contribuent à l'accroissement des savoirs et des richesses dans le respect de l'Homme et de son environnement. La recherche en SPI est sous-tendue par l'ouverture de verrous technologiques et l'élaboration de produits qui doivent avoir des propriétés, des caractéristiques et des fonctions précises. Il s'agit alors d'imaginer, de caractériser et de comprendre tous les processus intervenant dans cette élaboration. Améliorer le procédé ou le produit demande de mener des recherches génériques pour accroître la pertinence des modèles et décrire la physique de manière plus fine. Cette méthodologie, commune à l'ensemble des chercheurs du département, s'applique à tous les systèmes réels complexes

pour atteindre, à travers la modélisation et la simulation, des capacités prédictives quantitatives permettant l'optimisation et le contrôle. Les objectifs de cette recherche, établis en relation étroite avec le monde socio-économique, ne peuvent être atteints que par la compréhension des mécanismes élémentaires et de leurs interactions, éléments clés de l'élaboration de modèles pertinents à la base de simulations efficaces.

Dans les domaines couverts par les Sciences pour l'Ingénieur, la recherche fait régulièrement progresser les capacités de prévision des modèles tant par la taille des problèmes traités que par la complexité des situations abordées. À côté des grands progrès obtenus dans une logique de rupture ou de révolution technologique, notamment dans les domaines biomédicaux, les avancées s'inscrivent souvent dans une logique continue d'amélioration. Cette amélioration est indispensable et c'est elle qui permet en grande partie de progresser vers une utilisation plus rationnelle des ressources naturelles et vers un plus grand respect de notre patrimoine environnemental. Elle est à la clé du « plus efficace », du « plus sûr », du « plus économique », du « plus propre », et du « plus durable ».

Les orientations scientifiques des Sciences pour l'Ingénieur se déclinent autour d'axes disciplinaires qui constituent les vecteurs de l'avancée scientifique. Cette avancée est aussi le fruit d'un partenariat fort : partenariat avec les autres départements scientifiques du CNRS, partenariat avec les autres organismes de recherche scientifique, les universités et les grandes écoles, partenariat avec les industriels, partenariat régional, européen et international. En se tournant vers l'extérieur et en s'associant aux meilleures compétences tant scientifiques qu'industrielles, le département SPI devient un espace privilégié de réflexion et de concertation.

## 1 – LES ÉVOLUTIONS

Les évolutions actuelles des thèmes de recherche font, plus que jamais, apparaître la spécificité SPI comme le développement d'une science des couplages, des approches multi-phérique et multi-échelle. De manière croissante, la science des matériaux fait appel à l'enrichissement de la modélisation physique aux échelles micro, voire nano et à l'intégration de ces modèles dans des techniques de prévision à grande échelle. Les simulations d'écoulements de fluides intègrent maintenant des modèles de cinétique chimique qui leur permettent de reproduire le comportement de flammes turbulentes ou des modèles d'interface qui les conduisent à prédire des phénomènes complexes tels que l'atomisation d'un jet ou la vaporisation d'un nuage de gouttelettes. L'imagerie médicale utilise maintenant le rayonnement ultrasonore et toutes les gammes du spectre électromagnétique pour mesurer de manière atraumatique à l'intérieur du corps humain plusieurs dizaines de paramètres d'intérêt biologique ou médical. L'approche de la non-linéarité, traditionnellement présente dans des disciplines telles que la mécanique des fluides, irrigue maintenant d'autres domaines comme la mécanique des solides. L'approche de l'hétérogénéité est également un facteur essentiel. On s'oriente vers une approche globale des systèmes en remplaçant progressivement l'empirisme pour atteindre, à travers la simulation et le couplage de modèles à différentes échelles, une description permettant d'optimiser ces systèmes et d'envisager leur contrôle.

Dans le domaine de la fabrication et du procédé, c'est aujourd'hui toute la chaîne de vie du produit qui doit être prise en compte, depuis l'élaboration du matériau jusqu'à son vieillissement et son impact sur l'environnement en passant par ses propriétés d'usage et de structure et ses fonctions.

Dans tous les champs de recherche en Sciences pour l'Ingénieur, il faut aujourd'hui souligner l'importance quasi-universelle de la

simulation numérique et du calcul intensif. Une des spécificités des Sciences pour l'Ingénieur est aussi la validation de ces outils de modélisation à partir d'expériences clés. On assiste ainsi au développement d'actions expérimentales sophistiquées, à l'extension de méthodes de mesures, notamment optiques, et au développement d'outils de caractérisation et d'analyse, en particulier pour les matériaux (visualisation maintenant tri-dimensionnelle des microstructures) et les surfaces. Du dialogue entre simulation, expérience et théorie naissent les avancées.

Parmi les domaines d'application des recherches en Sciences pour l'Ingénieur, qui couvrent les transports, la santé, les sports et la société, l'environnement, les matériaux, la sûreté et la sécurité, ce rapport de conjoncture met particulièrement en relief<sup>1</sup> le secteur de l'énergie. Il s'agit en effet d'un domaine où les enjeux pour l'avenir sont importants et qui nécessite la convergence de plusieurs disciplines présentes dans le département ou, plus globalement, au sein du CNRS.

Les paragraphes qui suivent mettent en perspective les éléments de prospective en Sciences pour l'Ingénieur sur chacun des axes disciplinaires du département. L'ensemble brosse un panorama relatif aux thèmes traités, de manière plus détaillée, dans les rapports des sections 09 et 10 ainsi que, pour partie, des sections 04 et 22.

développement durable et de la sécurité dans les industries des transports, du nucléaire, et du génie civil. Elles sont également indispensables en génie biomédical ou pour la prise en compte des risques à une échelle « locale » : en génie parasismique, stabilité des pentes ou en environnement urbain. En ce qui concerne la durabilité et la sécurité, il s'agit de prendre en compte le vieillissement des matériaux et des structures et les évolutions en dynamique rapide ou à très longues durées.

Afin de simuler la fabrication et le comportement des structures, il faut disposer de lois de comportement thermomécanique des matériaux validés en sollicitations statiques, cycliques et dynamiques. Les méthodes de changement d'échelle intégrant la prise en compte simultanée de plusieurs échelles emboîtées et des approches non locales doivent être privilégiées. À l'échelle d'éléments de structure ou de maquettes, il s'agit de valider les conclusions de la simulation numérique. Dans le cas des travaux sur éléments à échelle réduite, la capacité à étendre les résultats à la structure réelle dépend de progrès dans la prise en compte des effets d'échelle. La conception et le comportement des assemblages et des liaisons restent un point crucial qui conditionne la durabilité des performances des structures. Ces zones sont le lieu de phénomènes complexes : tridimensionnalité des contraintes, couplage entre endommagement et comportement, frottement-usure. Ces phénomènes doivent faire l'objet d'efforts accrus de compréhension et de modélisation.

De nombreux secteurs industriels, voire médicaux, demandent de plus en plus de nouveaux matériaux à propriétés particulières qu'il convient d'élaborer et de caractériser. Plusieurs types sont envisagés : céramiques, mousses, polysaccharides, composites. Si l'on prend l'exemple des matériaux composites, ils peuvent être obtenus par renforcement de matrices polymères grâce à des nanoparticules (argiles) ou des nanotubes de carbone. Un effort important concerne aussi l'intégration

## 2 – MÉCANIQUE ET INGÉNIERIE DES MÉTIÉRIAUX ET DES STRUCTURES

Les sciences des matériaux et du génie mécanique connaissent aujourd'hui d'importantes applications dans le contexte du

1. dans son tome 2.

de capteurs dans les structures composites afin de mesurer *in situ* les contraintes et détecter l'endommagement.

L'industrie du transport est très intéressée par les alliages à haute performance. L'étude sous déformation de mise en forme (laminage, forgeage) montre l'apparition d'orientations communes, donc une anisotropie induite. L'énergie stockée et les désorientations locales conduisent à la germination de nouvelles phases cristallines. Il est possible de modéliser les relations entre orientation des grains et amorçage de fissures sous changements cycliques (aéronautique) ou monotones (emboutissage, crash). Enfin d'autres travaux concernent l'élaboration de barrières thermiques pour aubes monocristallines, le soudage et le frittage (par exemple prévision et optimisation de la tenue aux vibrations de plaques pour piles à combustible).

Les évolutions actuelles relatives à la mécanique et à l'ingénierie des matériaux et des structures mettent en relief les points clés que sont les extensions d'échelles et de modèles, les couplages forts, le développement de la simulation directe à base physique et la prise en compte de l'incertain. Ces tendances sont présentes dans plusieurs domaines.

On les trouve dans les aspects multi-échelles et multi-modèles dont l'éventail est large : modélisation ab-initio à l'échelle atomique, dynamique des dislocations discrètes, FEM à l'échelle du grain, déchirures ductiles, non-linéarités de contact, jusqu'au calcul de structures en dynamique ; ou dans les aspects multi-physiques et couplages (élaboration, matériaux à gradients de propriétés, matériaux fonctionnels, matériaux « intelligents », milieux poreux et géomatériaux, couplages magnéto-mécaniques, etc.), échelles nanométriques (mems, nanotubes, semi-conducteurs, etc.).

On retrouve également cette problématique dans le développement des matériaux et structures du vivant : biomatériaux (os, tissus mous, cellules), biomécanique (prothèses, accidentologie), structures (bois, produits dérivés, arbres), adaptativité du vivant (croissance sous contrainte, etc.), interactions (os-muscles,

aspects psycho-musculaires, psycho-acoustiques, etc.), variabilités individuelles et adaptation des modèles.

La même démarche est enfin suivie dans le domaine des problèmes inverses et de l'identification à partir de mesures de champs, de l'assimilation de données, de l'adaptativité en maillage et en modèles (aspects locaux 3D, non linéaires, etc.), avec prise en compte des aspects stochastiques, incertitudes, fiabilité, optimisation de formes, contrôle « intelligent » des structures.

## 3 – BIO-INGÉNIERIE

La bio-ingénierie regroupe tous les aspects technologiques de la biologie, que ce soit pour l'exploration et la compréhension des phénomènes biologiques ou pour agir sur leur déroulement. Elle est donc, par nature, un vaste champ interdisciplinaire. Cet axe de recherche, développé en lien étroit avec le département SDV, regroupe l'imagerie médicale, les biomatériaux et l'ingénierie tissulaire, la biomécanique et les bioprocédés.

L'exploration des phénomènes biologiques s'appuie de manière croissante sur toutes les méthodes d'imagerie biologique, mais aussi médicale (en ce que l'imagerie médicale participe de plus en plus à la recherche en biologie). L'interaction de champs de natures diverses (électrique, magnétique, mécanique, ondes électromagnétiques, électrodynamiques, acoustiques, etc.) avec les tissus permet d'effectuer leur analyse (cas des ultrasons ou de la RMN par exemple) et de comprendre et de modéliser les mécanismes de couplage de ces champs avec la matière vivante pour en extraire des informations de nature structurelle, fonctionnelle ou métabolique. Les recherches en imagerie conduisent au développement de nouvelles instrumentations ainsi qu'à l'élaboration de nouvelles techniques de marquage dans le but d'approfondir l'exploration des fonctions

des tissus et des organes, dans une perspective physio-pathologique. Les microscopies permettent bien sûr de visualiser les structures qui approchent l'échelle moléculaire, mais aussi de localiser les molécules elles-mêmes, leurs récepteurs et leurs interactions chimiques par les méthodes de fluorescence. Un effort particulier doit être porté sur le développement de l'imagerie moléculaire où imagerie biologique et médicale se rejoignent pour suivre, grâce à ses propriétés radioactives, magnétiques ou autres, une molécule (médicament ou effecteur physiologique) administrée chez l'Homme ou l'animal. À côté de ces méthodes d'exploration *in vivo*, les recherches en micro et nanotechnologies apportent des méthodes de plus en plus performantes pour l'exploration *in vitro* des phénomènes biologiques à l'exemple des puces à ADN ou de micro-laboratoires utilisant la micro-fluidique pour contrôler des réactions.

Un autre domaine important de la bio-ingénierie est celui des biomatériaux. Ceux-ci doivent être explorés au plan fondamental pour leurs propriétés tant biologiques que mécaniques. Ces recherches produiront dans les années à venir un nombre croissant de nouveaux matériaux biologiques de substitution utilisés par exemple pour le traitement du cartilage arthrosique, mais aussi de matériaux artificiels pour la fabrication de prothèses dont la fonctionnalité et la tolérance doivent être améliorées par la recherche en biomatériaux.

Un aspect essentiel des Sciences pour l'Ingénieur concerne la biomécanique. À l'échelle microscopique, les recherches ont pour objectif de caractériser la mécanique des cellules et de leurs mouvements. À l'échelle macroscopique, il s'agit d'étudier les mouvements humains ainsi que la biomécanique des chocs en accidentologie. Le tissu osseux revêt une importance particulière en tant que tissu vivant en perpétuel remaniement (remodelage, mais aussi micro-fissures, vieillissement, etc.) en fonction des contraintes mécaniques. La compréhension de ses propriétés biomécaniques aboutit également à l'amélioration des prothèses articulaires. La description des écoulements diphasiques (plasma, hématies, globules blancs, plaquettes) permet des avancées en microcirculation sanguine en apportant une

meilleure connaissance de l'oxygénation des tissus et de l'influence de certaines pathologies sur ce processus.

L'ingénierie tissulaire peut être définie comme l'application des principes et des méthodes de l'ingénierie et de la biologie dans le but de comprendre les relations fondamentales entre la structure et la fonction des tissus normaux et pathologiques. Les recherches dans ces domaines se traduisent par le développement de substituts biologiques qui restaurent, maintiennent ou améliorent la fonction de ces tissus. Il existe néanmoins de nombreux aspects mécaniques à résoudre pour réaliser une bonne adaptation du tissu transplanté : l'écoulement sanguin a une incidence sur la fixation et la croissance des endothéliums vasculaires, les contraintes mécaniques ont des conséquences sur la structuration de la peau, des ligaments artificiels, du cartilage ou de l'architecture osseuse. Une bonne synergie est donc nécessaire entre mécaniciens, médecins, chirurgiens et biologistes afin d'optimiser et d'utiliser une ingénierie tissulaire efficace sur le plan médical et économique.

Le développement des connaissances en biologie cellulaire et moléculaire, notamment en partenariat avec les géno-pôles, a entraîné des progrès considérables dans le domaine des bioprocédés avec des applications importantes en pharmacie, agro-alimentaire et en traitement des eaux. Le domaine des « biotechnologies appliquées au médicament » devra être élargi. Il concerne des techniques particulières comme l'élaboration et les tests de produits de contraste ou de marqueurs de l'imagerie. Les bioprocédés établissent un lien entre génie des procédés, biologie et biochimie.

## 4 - MÉCANIQUE DES FLUIDES ET TRANSFERTS

La mécanique des fluides est une discipline présente au cœur des évolutions technologiques dans la plupart des grands secteurs économiques : transports, énergie, chimie, élaboration de matériaux, bio-médical. Ses applications aux milieux naturels voient leur importance s'accroître en raison des préoccupations grandissantes de la société face aux modifications de son environnement. Les laboratoires français, de taille le plus souvent importante, sont largement reconnus au plan international et jouent un rôle important dans la spécialité.

Ces dernières années des progrès considérables ont été réalisés dans l'étude de la stabilité des écoulements. Des concepts tels que l'instabilité convective ou les modes globaux permettent une compréhension nouvelle des mécanismes de transition entre les régimes laminaire et turbulent. L'étude de la turbulence forte, ou turbulence pleinement développée, a largement bénéficié du fort développement d'outils de simulation numérique et de techniques expérimentales nouvelles : les simulations directes ou les techniques optiques telles que la PIV (qui tend à devenir holographique) fournissent désormais d'abondantes quantités d'informations instantanées, tridimensionnelles et multi-échelles. Même si des concepts nouveaux restent à élaborer en matière d'une réelle théorie de la turbulence, la simulation des grandes échelles qui repousse le problème de fermeture à une échelle où seuls les petits tourbillons (dont le comportement est plus universel que celui de l'ensemble du champ) sont à prendre en compte à travers des hypothèses de modélisation, a conduit à des progrès importants. Cette approche, largement développée dans les laboratoires français, ouvre aujourd'hui la voie à des prédictions fiables dans des situations de plus en plus nombreuses et proches de celles rencontrées dans l'industrie. Il devient par exemple possible de prédire l'évolution

détaillée des grands tourbillons autour d'un véhicule automobile ou d'un aéronef. Les interfaces de la mécanique des fluides avec ses domaines connexes, comme la combustion ou l'aéro-acoustique, se révèlent également fertiles lorsqu'elles sont abordées par simulation des grandes échelles : on note en particulier de beaux exemples de calculs de flammes turbulentes ou de prédiction du bruit rayonné par un écoulement.

La mécanique des fluides numérique, articulée notamment autour d'un GDR Franco-allemand, est un domaine qui connaît des progrès importants et dont les évolutions futures nécessitent l'utilisation de moyens de calculs lourds. Ces dernières années, des progrès importants ont été réalisés avec la mise au point et l'utilisation de schémas adaptés aux écoulements compressibles à fort nombre de Mach ainsi qu'avec le développement de méthodes numériques originales permettant de prendre en compte des interfaces et donc de traiter des problèmes de surfaces libres dont les applications sont nombreuses. La qualité et la finesse de description maintenant atteintes en mécanique des fluides permettent d'envisager d'agir de manière efficace sur un écoulement pour en contrôler les propriétés. Dans ce domaine en plein essor les avancées reposent sur l'expérience et la nécessaire intégration d'outils théoriques provenant de travaux de mathématiques appliquées.

Ces dernières années ont vu l'émergence d'un champ disciplinaire nouveau : la microfluidique. Aux échelles concernées des forces, négligeables à plus grande échelle, introduisent une physique nouvelle qu'il convient de décrire afin de développer des modèles nécessaires à un vaste champ d'applications qui concerne des domaines comme la biologie.

Les approches de l'hétérogénéité sont, en mécanique des fluides comme dans beaucoup d'autres spécialités des Sciences pour l'Ingénieur, le champ de développement privilégié des méthodes multi-échelles. Ces approches conduisent à des avancées importantes lorsqu'il s'agit de décrire la dynamique des écoulements diphasiques, des polymères, des suspensions, des milieux poreux ou granulaires ou des lits

fluidisés. Les progrès réalisés dans la description des écoulements ces dernières années ont encore renforcé les ouvertures de la spécialité et ses interactions avec d'autres domaines dans lesquels la mécanique des fluides demeure un point de passage obligé : génie des procédés, combustion, aéroacoustique, bio-ingénierie.

Sollicitée par l'augmentation de la compacité (transports) voire de la miniaturisation (microélectronique) pour évacuer des flux de chaleur de plus en plus intenses, la thermique l'est aussi par les nouvelles technologies de l'énergie : cœur de pile, reformeur d'hydrogène, isolation mais aussi intégration et gestion de multi sources dans l'habitat, ou encore les mécanismes d'évacuation de la chaleur du cœur des nouveaux projets de la fusion nucléaire. Dans ce contexte, des voies de progrès proviendront de l'approfondissement de quelques phénomènes relevant de la physique des transferts, avec notamment une percée vers les micro et nanoéchelles.

Mentionnons pour le rayonnement, des besoins de modèles de gaz simplifiés et fiables, et la nécessité de maîtriser le couplage rayonnement/turbulence (combustion, transfert dans les fours verriers). Les mécanismes de transfert en présence de suspensions, la thermomécanique des interfaces statiques ou dynamiques, et les couplages qui s'opèrent au sein des milieux poreux conditionnent les progrès en thermique des milieux hétérogènes. À titre d'exemple d'enjeu relatif aux transferts avec changement de phase, citons le cas solide/liquide où la modélisation multiphysique et multiéchelle de la solidification d'alliages doit permettre d'aller vers la capture de la microstructure, ou encore celui du couplage thermique, mécanique et cinétique chimique en plasturgie. La maîtrise des instabilités et du chaos spatial devrait autoriser prochainement la manipulation des structures themoconvectives pour mettre en œuvre un contrôle actif des transferts. Une avancée est indispensable pour revoir les bases physiques en vue de contrôler les flux et les températures dans le domaine des micro et nano échelles et ce autant en conduction (dynamique moléculaire pour décrire la thermique dans les super

réseaux et les nanofils de la microélectronique par exemple), qu'en convection (thermique des microcanaux mono ou di phasiques des échangeurs pour le cœur de pile) ou rayonnement (aux dimensions qui mettent en jeu la description par champ proche). Ces nouvelles approches devraient permettre de comprendre les mécanismes dans les transferts entre nanoparticules intervenant dans les nouvelles générations de superisolants.

Des progrès substantiels sont attendus pour aller vers des modélisations couplées et rapides en machine adaptées à la phénoménologie multi échelle (de la dynamique moléculaire vers le macroscopique et le système) et multiphysique (transferts de chaleur, de masse et de charge dans un cœur de pile). En particulier, un besoin se fait sentir d'une méthodologie de réduction de modèle en non linéaire (rayonnement, convection). La métrologie thermique doit être en particulier adaptée à la descente vers les micro et nano échelles (microscopie en champ proche), dans le domaine spatial et temporel.

## 5 – ACOUSTIQUE ET DYNAMIQUE DES SYSTÈMES

Science classique, l'acoustique est en plein essor avec l'apparition d'une gamme de spécialités du domaine de l'ingénieur : vibro-acoustique, aéroacoustique, contrôle non-destructif, imagerie ultrasonore, acoustique non-linéaire, propagation aérienne, acoustique sous-marine, acoustique musicale, perception auditive, acoustique des salles, analyse et synthèse des sons et de la parole, bruit, contrôle passif et actif. Aujourd'hui, tant en acoustique de l'audible que ultrasonore, les aspects non linéaires, aléatoires ou incertains, les couplages multiphysiques, la complexité des milieux prennent de plus en plus d'importance. L'acoustique rejoint beaucoup d'autres spécialités par ces aspects ainsi que dans ses moyens

et dans ses méthodes. Elle associe largement les techniques de traitement numérique du signal. Une spécificité de l'acoustique reste la dimension humaine, présente aussi bien dans le confort (par exemple pour le transport ou le bâtiment), la communication et la restitution de champs sonores, la parole et la musique. La nouvelle sensibilité aux problèmes d'environnement donne désormais une importance considérable aux problèmes de bruit. Cette préoccupation est stratégique dans des secteurs variés comme l'automobile, l'aéronautique ou le matériel ferroviaire. L'amélioration du confort interne des véhicules et la réduction de l'impact sur l'environnement sont devenus des facteurs de conception. La réduction du bruit rayonné par les avions est un objectif essentiel pour l'avenir du transport aérien car les zones aéroportuaires sont largement urbanisées. Les résultats des recherches en aéroacoustique ont déjà conduit à des réductions substantielles de l'émission sonore des avions. Des améliorations supplémentaires peuvent notamment venir des avancées faites dans les méthodes de prévision numérique (« Computational Aeroacoustics »). Les développements dans ce secteur ont porté sur les méthodes temporelles à très haute précision permettant par exemple de simuler le rayonnement acoustique de jets turbulents à grands nombres de Reynolds. Il faut pour cela développer des méthodes de calcul précises et disposer de ressources informatiques considérables. On peut espérer une compréhension fondamentale des mécanismes générateurs de bruit, ouvrant ainsi des possibilités de contrôle des phénomènes. Ces méthodologies ont aussi le potentiel de se substituer pour partie aux approximations classiques (rayons, équation parabolique) pour les calculs de propagation à grande distance. Des progrès ont également été faits dans les méthodes de localisation des sources de bruit en vol réel (imagerie des sources par traitement de réseau réalisées par l'Onera) ou encore pour analyser les sources aérodynamiques sur automobiles au moyen de souffleries anéchoïques. Les progrès concernent aussi le domaine du contrôle passif ou actif ou le contrôle actif hybride avec le développement de systèmes optimisés pour les nacelles de moteurs d'avions. Dans le domaine

de l'imagerie, des développements originaux sont fondés sur le retournement temporel et la combinaison de cette méthode avec des excitations non linéaires pourrait déboucher sur des applications biomédicales intéressantes. Les équipes françaises sont largement reconnues au niveau international dans les domaines de l'aéroacoustique, de l'aéroacoustique numérique, du contrôle actif et dans le secteur original du retournement temporel. Ces équipes sont aussi largement impliquées dans l'analyse des problèmes de propagation du bang sonique et des effets d'écoulement sur les absorbants acoustiques. Un réseau franco-allemand regroupe des équipes des deux pays autour de la simulation numérique en aéroacoustique, un thème qui est aussi bien abordé au niveau européen. L'acoustique, largement incluse dans la mécanique, rejoint des disciplines très variées : physique des ondes, sciences de l'univers (acoustique sous-marine et océanographie ; ondes élastiques et géophysique), sciences de la vie (imagerie médicale et audition), sciences humaines et sociales et sciences de l'information et de la communication (bruit, parole, traitement du signal, qualité sonore).

## 6 – GÉNIE DES PROCÉDÉS

Des avancées scientifiques importantes du Génie des Procédés se sont produites dans deux domaines qui lui sont relativement spécifiques :

– le génie des réacteurs chimiques, notamment pour l'élaboration de produits à propriétés d'usage, matière molle, mélanges, suspensions, poudres, pâtes, etc. ;

– le génie des séparations, par exemple pour la préparation de molécules de haute pureté pour applications pharmaceutiques.

Ces domaines mettent en jeu des milieux et des phénomènes complexes au sens de la physico-chimie (multi-composants, multi-

phasiques, réactifs). Des méthodes spécifiques sont développées et mises en œuvre, tout en intégrant par ailleurs les connaissances de disciplines connexes (chimie, biologie, thermique, mécanique des fluides, etc.). Un exemple-type est le génie de la polymérisation, où l'objectif est de réaliser le lien scientifique et opérationnel entre les propriétés recherchées (mécaniques, texturales, rhéologiques, chimiques, sensorielles, de transport), la composition du polymère, et son procédé d'élaboration. Au niveau local, l'analyse et la maîtrise des couplages entre réaction chimique, phénomènes diffusionnels, rhéologie, thermique, jouent un rôle central. Aux niveaux plus globaux, la modélisation systémique du réacteur, permettant la conduite optimale et la commande, et la modélisation systémique du produit (lien structure/propriétés) sont les ingrédients essentiels. En génie de la séparation, des avancées théoriques à retombées pratiques sont à signaler dans le domaine des opérations chromatographiques industrielles, où la France à une position de leader industriel (par l'IFP et Novasep) : l'optimisation de séquences asynchrones de commutation de colonnes multiples dans des procédés de type Lit Mobile Simulé ou Varicol, basée sur des modèles avancés d'adsorption multi-composant, est un produit de la recherche de base. La recherche sur les procédés à membranes est très active, en collaboration avec les chimistes des matériaux, centrée sur la modélisation des transferts, l'effet des conditions thermodynamiques et hydrodynamiques, les politiques opératoires et l'évaluation des performances.

Par ailleurs, le génie des procédés intègre de plus en plus les connaissances provenant de la chimie des matériaux, par exemple en catalyse et dans le domaine des membranes, et de la biologie pour la conception, la modélisation et la conduite de procédés biotechnologiques, utilisant pour cela des approches issues de l'informatique et de l'automatique. Il est aussi partie prenante de thèmes scientifiques pluri-disciplinaires dans et hors les sciences de l'ingénieur : la microfluidique est l'un d'eux.

Une autre tendance lourde du génie des procédés est de s'impliquer dans les thèmes de

société que sont l'énergie, l'environnement, la santé, la sûreté. Dans ces domaines, le génie des procédés a pour tâche à la fois de décliner les enjeux en termes de recherche scientifique, et d'intégrer dans une approche globale les résultats de recherches pluridisciplinaires où il a sa part. Par exemple dans la période, le génie des procédés s'implique dans des recherches sur des nouvelles techniques énergétiques (pile à combustible, biocarburants, cycles thermiques avancés) intégrant les aspects environnementaux et de sûreté, et cherchant à relier les phénomènes locaux aux comportements globaux par la modélisation.

## 7 – PLASMAS, MILIEUX RÉACTIFS ET HORS ÉQUILIBRE

Une des technologies les plus anciennes connues de l'homme (la maîtrise du feu date d'environ un demi-million d'années et celle de l'allumage date de 30000 ans), la combustion, a été l'objet de développements scientifiques remarquables au cours des années récentes. Ses applications ont un impact considérable sur de nombreux aspects de la vie actuelle (transport automobile, aéronautique et spatial, procédés, etc.). La combustion intervient pour 85 % des besoins en énergie primaire (9.3 Gtep des 10.6 Gtep consommés dans le monde en 2000). Principale source de problèmes d'environnement par les rejets de CO<sub>2</sub> et de polluants qui l'accompagnent, la combustion est aussi un facteur de risque pour l'industrie et la société (explosions, détonations accidentelles, feux de forêt, incendies, etc.). La combustion occupe ainsi une place centrale dans l'activité humaine mais la recherche en combustion est loin d'être à la mesure de l'importance du sujet : quelques milliers de chercheurs dans le monde travaillent dans ce secteur, essentiellement regroupés dans le « Combustion Institute », l'effort principal étant réalisé par cinq grands

pays avec dans l'ordre les États-Unis, le Japon, l'Allemagne, le Royaume Uni et la France. Les progrès réalisés dans ce domaine sont néanmoins substantiels. La communauté française et notamment les laboratoires CNRS ont joué un rôle significatif dans ces développements avec des apports reconnus au niveau international en théorie de la combustion, dans l'analyse et la modélisation des mécanismes de la combustion turbulente, dans la représentation de la cinétique chimique et des phénomènes de transport au niveau moléculaire, dans le domaine des instabilités et du contrôle de la combustion, et dans l'étude des mécanismes de la détonation. Les développements en simulation directe de la combustion initiés au niveau mondial par des chercheurs français ont eu un impact considérable sur la compréhension des mécanismes de la combustion turbulente. L'effort actuel dans le domaine des méthodes de simulation des grandes échelles pour la combustion mené par le Cefracs, quelques laboratoires CNRS, et l'IFP place également notre pays en excellente position. Des avancées ont aussi été réalisées au niveau des applications avec le développement de méthodes de modélisation pour les foyers de turbines à gaz, pour les moteurs automobiles, pour les statoréacteurs et les moteurs fusée. Plusieurs groupements de recherche ont joué un rôle fédérateur puissant, conduisant à des percées scientifiques dans des domaines difficiles comme celui de la combustion cryotechnique dans des conditions transcritiques (Groupement de Recherche Combustion dans les moteurs fusée) ou encore dans le domaine des foyers aéronautiques et spatiaux (Réseau de recherche aéronautique sur le supersonique, Initiative sur la Combustion Avancée). Le programme de recherche sur les instabilités haute-fréquence regroupant CNES, Onera, CNRS, Snecma, DLR et EADS fédère actuellement les efforts français et allemands sur un sujet difficile mais qui constitue un problème incontournable dans le domaine des lanceurs. Un PNIR regroupe les recherches sur les moteurs automobiles. Le sujet des instabilités de combustion et de leur contrôle passif ou actif est tout aussi important pour la poursuite du développement des turbines à gaz. Les perspectives de recherche sont dans ce contexte très

ouvertes avec des besoins d'études fondamentales pour comprendre des mécanismes élémentaires mais aussi pour analyser les couplages, les problèmes multi-échelles inhérents à la combustion, les flammes dans des conditions extrêmes par exemple dans des situations transcritiques ou encore dans des micro-systèmes. La communauté française est bien organisée et elle a appris à travailler sur des projets fédérateurs, à former ses doctorants au moyen d'écoles, à se regrouper autour de bancs d'essais communs mais sa taille est réduite. Le nombre de chercheurs impliqués dans le secteur stratégique de la modélisation et de la simulation numérique de la combustion est relativement faible si on prend en compte les enjeux du secteur. Les contributions françaises dans les domaines de la simulation directe et de la simulation des grandes échelles en combustion ont été remarquables mais c'est maintenant le Japon qui réalise les simulations les plus lourdes tandis que les États-Unis ont engagé des programmes ambitieux dans ce secteur (les centres ASCI de Stanford et de l'Université d'Illinois travaillent sur des projets d'envergure qui ont peu d'équivalents au niveau européen).

Les plasmas sont le siège de phénomènes complexes et sont à l'interface de nombreuses disciplines (physique, chimie, biologie, génie des procédés, science des matériaux, etc.). Les plasmas froids, gaz faiblement ionisés, ont des champs d'applications très variés qui recouvrent des axes forts du département :

- matériaux (gravure en micro-électro-nique, dépôt de couches dures ou protectrices, traitement de polymères, nitruration et implantation ionique dans les métaux, soudure et découpe en métallurgie, synthèse de poudres et de nanotubes, etc.) ;

- énergie (dépôt de couches photo-voltaïques, synthèse de l'hydrogène, contrôle de la combustion, laser à gaz, sources lumineuses à basse consommation, écrans plasma, propulsions par plasmas, etc.) ;

- environnement (destruction de polluants atmosphériques, stérilisation, contrôle de la combustion, vitrification des déchets, synthèse d'hydrogène, etc.).

Les recherches couplent expérience, théorie, modélisation et simulation ; l'approche est multiphysiques et multiéchelles, couplant champ électromagnétique, chimie en phase gazeuse et des surfaces, phénomènes de transport, transferts thermiques et rayonnement.

## 8 – PLASMAS CHAUDS

La maîtrise de la fusion thermonucléaire est une étape indispensable avant la conception de réacteurs à fusion, qui constituent l'une des clés des problèmes énergétiques du siècle qui commence. Deux grandes voies sont explorées activement, la fusion par confinement magnétique, et la fusion par confinement inertiel. Les Sciences pour l'Ingénieur ont des programmes de recherche dans ces deux voies, en relation avec les programmes du Commissariat à l'énergie atomique et avec les programmes internationaux, avec un rôle particulier pour la simulation numérique, qui y est devenue l'outil complémentaire indispensable à l'expérience.

Les grandes machines à confinement magnétique (Tore-Supra à Cadarache ou JET à Oxford) ont un fonctionnement complexe dont la compréhension nécessite diagnostics performants, modélisation, simulations numériques et, une certaine dose d'empirisme. En parallèle, des expériences en laboratoire à petite échelle, domaine spécifique du CNRS, permettent à moindre coût la mise au point de diagnostics ou l'exploration de nouveaux concepts. Les principaux efforts concernant la fusion par confinement magnétique portent sur les interactions plasma-paroi, la turbulence et le transport associé et la dynamique des populations suprathermiques en régime thermonucléaire. L'actualité est cependant pour le moment liée au sort du projet international ITER, qui devrait mobiliser les énergies dans les 30 années à venir. ITER est prévu pour donner l'accès à un régime de combustion thermonucléaire quasi-continu.

Dans la filière inertielle, le plasma chaud est comprimé à l'aide de faisceaux laser ou de faisceaux de particules. Les principaux défis scientifiques à relever, sur lesquels les Sciences pour l'Ingénieur ont porté un effort particulier, sont la stabilité de la propagation des faisceaux lasers, la maîtrise des instabilités hydrodynamiques et de la symétrie de l'implosion des cibles, et leur allumage thermonucléaire. Le programme du laser Mégajoule à Bordeaux couvre ces aspects. Deux types principaux d'installations laser sont utilisés : haute énergie (impulsions nanosecondes) ou haute puissance (impulsions sub-picosecondes). Les verrous technologiques de cette filière, qui se situent notamment autour du concept d'allumeur rapide, concernent la mise au point de sources d'énergie initiales efficaces, qui mettent le plasma en condition avec une bonne cadence, et la résolution des problèmes liés à la fabrication des cibles, contrainte par le critère d'homogénéité.

On doit aussi noter que le domaine nouveau de l'interaction des lasers ultra-intenses de la dernière génération avec les plasmas chauds ouvre des perspectives innovantes d'applications, la moindre n'étant pas la production de particules ou photons de haute énergie. De multiples applications sont désormais ouvertes pour les sous-produits de cette interaction : accélération de particules chargées, allumage rapide des cibles de fusion inertielle, radiographie ultra-rapide, diffraction ultra-rapide, protonthérapie, etc.

## 9 – ORIENTATIONS

Les grands objectifs actuels des Sciences pour l'Ingénieur sont de maîtriser et d'optimiser les systèmes mécaniques, les procédés, l'énergie, la bio-ingénierie et l'action de l'homme sur l'environnement. Sur le plan de la méthodologie, ces objectifs nécessitent le renforcement d'actions expérimentales, l'extension de

méthodes de mesures, notamment optiques, et le développement d'outils de caractérisation. Atteindre ces objectifs requiert également de poursuivre intensément le développement de la modélisation et de la simulation numérique, le plus souvent multi-échelle. Mener à bien cette démarche demande de conduire des recherches génériques, enfin d'améliorer la pertinence des modèles en prenant en compte des descriptions toujours plus fines des mécanismes élémentaires. Il s'agit aussi de se donner les moyens d'aborder des phénomènes complexes impliquant une physique multiple, des gammes très larges d'échelles et des couplages. Il faudra pour cela renforcer l'interaction entre théorie, simulation et expérimentation. La simulation est devenue au cours des années récentes un outil de conception et d'optimisation largement utilisé dans la majorité des applications de l'ingénieur. L'effort de recherche dans ce domaine doit suivre cette tendance lourde et il devra être intensifié. Il faudra mettre l'accent sur les sujets porteurs pour l'avenir comme l'aéroacoustique numérique, la simulation des grandes échelles en mécanique des fluides ou en combustion, le contrôle actif des écoulements. La recherche devra s'orienter vers des simulations extrêmes nécessitant des ressources informatiques les plus importantes. Il faudra encourager des développements autour d'outils communs et des projets fédérant des équipes autour de réalisations concrètes.

Il sera parallèlement nécessaire de conforter les recherches au cœur de la discipline, c'est à dire en mécanique des fluides et transferts, en plasmas, combustion, milieux réactifs et hors équilibre, en génie des procédés, en matériaux de structure et fonctionnels, en génie mécanique et systèmes mécaniques, en acoustique et dynamique des systèmes et en ingénierie pour la santé, mais sans négliger les actions transversales regroupant plusieurs spécialités où les thématiques transversales comme la simulation ou les diagnostics. Il faudra aussi faire favoriser l'apparition de nouveaux sujets et faire émerger des thèmes porteurs d'avenir au carrefour des disciplines et pour cela favoriser les projets interdisciplinaires avec les autres départe-

ments du CNRS, les EPST et EPIC et les laboratoires européens. Il sera possible dans ces projets de conforter la spécificité des Sciences pour l'Ingénieur en matière d'intégration de nouvelles connaissances pour l'élaboration de produits.

Afin de poursuivre et développer cette politique de recherche, le département aura pour objectif le renforcement de la structuration des acteurs de la recherche (développement des groupements de recherche et des réseaux au sein du département ou en association avec d'autres départements, initiatives de recherche rassemblant plusieurs organismes et des partenaires industriels, réseaux multinationaux, programmes de recherche européens). La structuration des acteurs de la recherche s'appuiera sur le partenariat avec les Universités ou les Écoles, les Régions et le monde socio-économique. Le département a engagé et poursuivra une action de structuration des laboratoires en région afin de faire émerger des pôles régionaux à vocation nationale et européenne. En partenariat avec les entreprises des programmes de recherche à moyen terme (5 à 10 ans) seront mis en place pour répondre à des enjeux majeurs. La mutualisation des moyens, notamment expérimentaux, sera réalisée à travers la mise en place de plate-formes de recherche rassemblant une communauté autour de moyens spécifiques. La création de ces plates-formes sera réalisée en partenariat avec les Universités et les Régions.

L'ampleur des problèmes qu'il faudra envisager dans l'avenir est croissante. La société aura à faire face à des sujets toujours plus complexes dans une situation internationale très compétitive. Pour répondre à ces problèmes, la recherche SPI devra faire un effort continu d'organisation, de structuration et d'unification, de développement des partenariats autour d'objectifs partagés avec un souci de concrétisation des travaux et une volonté de faire progresser les connaissances en ciblant les applications.

## ANNEXE

### LISTE DES ACRONYMES

- ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor.
- JET : Joint European Torus.
- ASCI : Accelerated Strategic Computing Initiative.
- PNIR : Pôle National à Implantation Régionale.
- RMN : Résonance Magnétique Nucléaire.
- PIV : Particle Image Velocimetry.
- Gtep : Giga-tonne d'équivalent pétrole.
- Cerfacs : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique.
- Onera : Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales.
- DLR : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

