

10

ÉNERGIE, MÉCANIQUE DES MILIEUX FLUIDES ET RÉACTIFS, GÉNIE DES PROCÉDÉS

LUCIEN MASBERNAT
Président de la section

ALAIN STORCK
Rapporteur

Jacques Bousquet
Jean Bretagne
Henri Burnage
Alain Ferriere
Bernard Fontaine
Pascale Gillon
Jean-Pierre Guelfucci
Pierre Joulain
Georges Karadimas
Michel Lance
Jacques Pantaloni
Vincent Pugliesi
Victor Sanchez
Serge Sapin
André Tardieu
Michel Trinité
Bernard Veyssiére

Avec près de 60 laboratoires, dont 45 en rattachement primaire, la section 10 se situe au cœur d'une problématique scientifique centrée sur la maîtrise totale et l'approche intégrée de milieux, de phénomènes, de comportements, d'opérations et de procédés, analysés et étudiés en tant que **systèmes complexes**.

La complexité est inhérente à des états thermodynamiques particuliers (changement de phase, fluides supercritiques, plasmas...), aux phénomènes couplés non linéaires ou hors équilibre induisant des comportements complexes (milieux réactifs, ferro-fluides...), aux lois rhéologiques non newtonniennes (biofluides, polymères, mousses, pâtes, produits alimentaires...), aux hétérogénéités des milieux et des objets considérés (écoulements polyphasiques, dispersés, milieux poreux ou granulaires, solides divisés), aux comportements dynamiques des systèmes et aux multiples interactions (laser-matière, champs électromagnétiques, électriques, ondes ultrasonores...).

Approche intégrée, parce que les phénomènes, processus et opérations mis en jeu concernent une large gamme d'échelles d'espace et de temps : nanoéchelle pour les phénomènes moléculaires, microéchelle pour les particules, gouttes, bulles, tourbillons..., mésoéchelle pour les réacteurs, séparateurs, échangeurs..., macroéchelle pour les unités de production, jusqu'aux mégaechelles de l'atmosphère, des sols, des océans... Ainsi, en

considérant le complexe comme inaccessible par définition à l'approche traditionnelle analytique et détaillée, nous justifions pleinement l'approche multiéchelle et intégrée, qui constitue une spécificité forte de la section 10.

Le problème de l'établissement des lois gouvernant les phénomènes, à un niveau d'organisation donné à partir des niveaux précédents, constitue un enjeu scientifique important, notamment pour les milieux et fluides complexes.

Il serait vain de prétendre dresser un bilan exhaustif des activités relevant de la section dans un document d'une vingtaine de pages, étant donné la **diversité des phénomènes et processus étudiés** (dynamique des fluides, mono ou polyphasiques, turbulence, transferts couplés de matière, chaleur et quantité de mouvement, transformations physiques, chimiques, biochimiques, photochimiques de la matière, combustion, détonation, décharges, phénomènes de mélange, comportement aux interfaces...) ainsi que celle des **objets d'étude naturels ou artificiels** (milieux fluides ionisés, poreux, dispersés, granulaires, milieux naturels, matériaux-solides divisés, organisés, polymères et composites, catalyseurs, membranes, cristaux, couches minces, matière vivante, opérations unitaires, réacteurs, séparateurs, échangeurs, procédés à vocation industrielle). Mais au-delà de cette diversité, qui constitue la richesse de la section et en aucun cas une dispersion thématique, il convient d'insister sur l'**approche méthodologique unitaire** (et tout à la fois complémentaire dans certains cas), dont les **objectifs sont de nature** :

- cognitive (compréhension des phénomènes et des interactions, des comportements dynamiques...),

- théorique et conceptuelle (modélisation, simulation, analyse...),

- instrumentale (expérimentation, maquettes, instrumentation, métrologie, validation),

- opérationnelle (diagnostic, conduite, commande, extrapolation),

- économique (évaluation, optimisation).

L'ensemble des systèmes complexes étudiés mettent en jeu des milieux fluides réactifs ou non, mono- ou polyphasiques, sièges de phénomènes multiéchelles et couplés de transports et de transferts aux interfaces, en écoulement au sein de milieux artificiels (équipement, opérations unitaires, réacteurs, séparateurs...) ou naturels (sols, atmosphère, océan...). Ceci constitue le dénominateur commun de l'ensemble des activités de la section, qui tout en reposant sur une démarche cognitive, trouvent leur motivation dans un certain nombre de domaines d'application ainsi que dans des enjeux socio-économiques importants.

Les enjeux socio-économiques

Très diversifiés, ils peuvent être regroupés en cinq catégories :

Élaboration et traitement de matériaux

Polymères et composites, catalyseurs, diamant, solides divisés et organisés, céramiques, couches minces à très hautes performances (couches ultradures, à propriétés magnétiques ou électriques spécifiques), traitements thermiques de surface ou en profondeur par laser (revêtements, alliages de surface, soudure, découpe et perçage, gravure...), domaines des technologies émergentes (nanotechnologiques, optoélectroniques, microélectroniques). Il s'agit là d'un secteur à fort enjeu industriel, relevant traditionnellement de la chimie et la physique du solide, mais où la démarche méthodologique de la section fondée sur la maîtrise des relations entre structures, propriétés et procédés, et des propriétés d'usage par le procédé, s'avère très prometteuse.

Environnement - Sûreté

Les exigences accrues en matière de protection de l'environnement (zéro déchet) et de sécurité (zéro incident) ont constitué un facteur moteur dans le développement de recherches accentuées sur les techniques de traitement aval de l'air, de l'eau, des sols (restauration des sites pollués), l'amélioration des rendements et de la sélectivité des opérations ou des procédés (chimiques, combustion, brûleurs industriels, ...) ou les procédés intrinsèquement plus propres fondés sur une substitution

des voies d'accès et des produits. À côté des procédés de traitement thermiques des déchets par pyrolyse et gazéification, des recherches actives sur la biodégradation des composés organiques, l'utilisation des techniques à membranes ou électrochimiques (souvent couplées d'ailleurs), des procédés laser, l'adsorption de polluants à l'aide de matériaux performants, l'élimination des déchets et des effluents par utilisation de procédés plasmas, la pré-diction de la formation de suies et polluants dans les flammes... ont été réalisées.

Certaines recherches ont d'ailleurs bénéficié des incitations dans le cadre du programme Ecotech ou de la création récente d'un GDR "Mécanismes de formation des polluants en écoulement" sur la combustion propre et la combustion stationnaire (fours et brûleurs industriels et domestiques).

Durant les dernières années, l'accent a été mis sur des recherches concernant la sûreté des procédés industriels.

Santé - Agroalimentaire

Sont particulièrement concernées ici les applications des biosciences et du génie biochimique, qui se caractérise avant tout par son approche intégrée, à l'interface du génie des procédés et des sciences de la vie. À côté de ses activités traditionnelles visant la conception et la mise en œuvre optimale de procédés de séparation et de réaction, le génie biochimique prend une place de plus en plus importante dans l'élaboration de nouveaux biocatalyseurs plus performants (microorganismes et cellules animales recombinées, enzymes par mutagenèse dirigée), d'antibiotiques, de vaccins, protéines, d'aliments fermentés et d'ingrédients fonctionnels, dans les nouvelles valorisations des productions agricoles ou en ingénierie biomédicale par le développement de systèmes de réacteurs ou de fractionnement destinés à la thérapie humaine (avancées spectaculaires en matière de tissus et d'organes artificiels).

Énergie

Utiliser l'énergie de manière optimale dans les procédés industriels et, plus généralement, propo-

ser une stratégie globale d'utilisation des ressources en énergie et matières premières, constituent des enjeux importants, qui passent par une optimisation intégrée des procédés et l'utilisation de procédés et de machines plus performants. La maîtrise des transferts sélectifs et distribués de manière optimale, l'utilisation d'énergies non classiques (microondes, champ acoustique, photonique et photocatalyse...), les recherches sur de nouveaux équipements et de nouvelles générations de réacteurs multifonctionnels (intégrant réaction et transferts de matière et de chaleur) sont des exemples de voies de recherche visant à parvenir à une maîtrise totale de l'énergie.

Transports

La section trouve un certain nombre de ses motivations scientifiques dans le domaine des transports, qu'il s'agisse de la mécanique des fluides, dont les développements ont souvent été liés à l'aéronautique, ou de la maîtrise des milieux réactifs hors équilibre, dont il sera question au chapitre 3 : combustion propre dans les moteurs automobiles (réduction des pollutions, amélioration des rendements, réduction des consommations), moyens de transport à longue distance (avions supersoniques, fusées, propulsion plasmique...), moyens de propulsions nouveaux (moteurs à détonation pulsée, superstatoréacteurs...).

Les enjeux scientifiques et technologiques

Parmi les tendances d'évolutions les plus significatives et les verrous scientifiques et technologiques les plus marquants, on peut citer :

La maîtrise de la complexité

Dynamique des fluides (compréhension des mécanismes intervenant dans le développement des instabilités, la transition vers la turbulence, des phénomènes de transfert...), description et compréhension des fluides et processus complexes, des fluides en situations extrêmes, formulation des lois phénoménologiques de transport, méthodes de prise d'informations dans les systèmes complexes (capteurs, techniques de visualisation et d'imagerie).

Modélisation, simulation et calcul numérique

Ce domaine est appelé à jouer un rôle de plus en plus important pour l'analyse, la conception et la conduite, l'optimisation de systèmes intégrant plusieurs échelles d'observation dans le temps ou l'espace. Cet objectif est sous-entendu par une triple démarche : technique pour les capteurs, numérique pour la simulation et conceptuelle pour les modélisations, dont les approches complémentaires doivent permettre de réconcilier la démarche systémique globalisante et la démarche analytique détaillée, en fonction des objectifs recherchés. Un enjeu important est également celui de la simulation des régimes transitoires.

Synthèse de propriétés d'usages

Une demande croissante du marché s'effectue pour des produits élaborés combinant plusieurs fonctions d'usage et propriétés (thermiques, électriques, mécaniques, pharmaceutiques ou même organoleptiques). L'objectif général réside dans la maîtrise générale des relations procédés/propriétés d'usages, par exemple dans le domaine de la formulation, où la rhéologie et les phénomènes interfaciaux jouent un rôle primordial. L'appui de la recherche fondamentale est nécessaire pour soutenir l'évolution de cette activité, et la chimie de la formulation constitue d'ailleurs l'un des sept secteurs prioritaires définis récemment par le Comité Interministériel de la Recherche Scientifique et Technique.

Maîtrise des procédés de production et de transformation des solides

Représentant près de 70 % des procédés industriels, les opérations sur les solides (génération de particules solides dans divers milieux ; transformation, formulation et mise en forme) sont encore très mal comprises et insuffisamment maîtrisées. Il y a là un champ de recherche important en vue de développer les théories, outils et modèles nécessaires à la formalisation des connaissances dans ce domaine.

Conception des appareils et des équipements

La France accuse ici un retard important et des efforts d'innovation, visant à la conception d'équi-

gements fondés sur des principes nouveaux dans une démarche plus scientifique, devront être entrepris. Il s'agira aussi de repenser les filières et les modes de production en fonction de contraintes d'environnement, de sécurité et de disponibilité de matières premières.

La richesse thématique de la section l'amène à renforcer une **approche interdisciplinaire**, qui se traduit par l'importation de méthodes, outils, concepts et connaissances provenant d'autres disciplines, notamment :

- chimie, physicochimie, matériaux,
- mécanique,
- sciences de la vie (biochimie, microbiologie...),
- instrumentation physique, analytique,
- informatique et calcul numérique,
- méthodes de pensée et concepts de la physique (matière complexe), de l'automatique (diagnostic, contrôle, analyse de données...), des mathématiques, recouvrant les préoccupations d'autres sections du Comité national ou départements scientifiques du CNRS.

Pour des raisons inhérentes à la cohérence de la présentation, ce rapport de conjoncture comporte trois parties principales concernant : le génie des procédés, la dynamique des fluides, turbulence, transferts et milieux hétérogènes, les milieux réactifs hors équilibre.

Le lecteur ne saurait en conclure à une quelconque indépendance thématique entre ces parties, puisque des liens quasi-organiques existent d'un point de vue méthodologique et sur le plan des objectifs scientifiques.

Organisation et positionnement de la communauté scientifique

• En génie des procédés, les moyens de la recherche publique sont concentrés principalement en huit pôles plus au moins structurés et anciens :

Deux pôles, généralistes et fondateurs de la discipline :

- Nancy (pôle généraliste avec une composante forte en génie des réacteurs),
- Toulouse et réseau Sud-Ouest (pôle généraliste,

avec une composante forte en simulation et modélisation de procédés continus et discontinus,

et six autres centres :

- Compiègne (agroalimentaire, biotechnologies),
 - Grenoble (électrochimie, papier, matériaux),
 - Lyon (catalyse, contrôle des procédés, technologies solide-liquide),
 - Paris (biotechnologies, simulation, capteurs, hautes pressions, procédés plasmas),
 - Pôle Méditerranée (énergétique, céramiques, membranes, procédés photoniques),
- ainsi que l'Ouest de la France (transferts, séparation).

Une photographie récente de la communauté réalisée par l'"Observatoire Français de Génie des Procédés" mis en place en septembre 1994 fait état de près de 800 chercheurs et universitaires permanents concernés par les objets étudiés et les méthodes et concepts utilisés en génie des procédés. Un quart des permanents sont des chercheurs à temps plein du CNRS ou de l'INRA.

- D'un point de vue thématique, les principales forces sont concentrées en modélisation-simulation (16 %), transferts (15 %), réacteurs (11 %), conduite/commande (10 %) et les méthodes de séparation (10 %). Les opérations sur les solides, les milieux complexes, la conception et la technologie des équipements et la thermodynamique sont relativement peu représentées avec des pourcentages inférieurs à 5 %, ainsi que la physicochimie et les interfaces.

- D'un point de vue domaines d'application, le secteur de la chimie au sens large (englobant énergie, pétrole, charbon) représente près de 40 % des actions de recherche en génie des procédés, tandis que 24 % d'entre elles sont orientées vers l'agroalimentaire et les biotechnologies et 19 % vers l'élaboration des matériaux. L'environnement-sûreté atteint un niveau de l'ordre de 15 %. La part des travaux motivés par les économies d'énergie a baissé sensiblement.

Ces observations traduisent l'extension effective de la méthodologie du génie chimique vers d'autres secteurs industriels que la chimie, ce qui a donné naissance au génie des procédés actuel.

• La thématique "Dynamique des fluides, turbulence, milieux hétérogènes et transferts" est représentée par une trentaine de laboratoires associés au CNRS, la grande majorité des formations étant étroitement associées à des écoles d'ingénieurs. Au plan national, il faut souligner le rôle des grands organismes de recherche comme l'ONERA, le CEA, le CNES, l'IFP, ainsi que des centres de recherche de groupes industriels publics ou privés (EDF, SNECMA...) dans les recherches à finalité technologiques et la R & D.

Géographiquement, les **transferts thermiques** se sont développés autour de grands pôles - Lyon, Nantes, Marseille, Nancy, Poitiers, Bordeaux, qui possèdent des laboratoires associés au CNRS -, et un ensemble plus diffus de formations universitaires. La communauté est bien structurée, autour d'une société savante (la Société Française des Thermiciens) et d'un COST "Thermique". Elle dispose d'une revue scientifique nationale (Revue Générale de Thermique). Au plan international, elle possède une bonne visibilité, à égalité avec l'Allemagne et la Grande-Bretagne, derrière les États-Unis et le Japon. La **communauté des mécaniciens des fluides** s'articule également autour de laboratoires CNRS présents dans la plupart des grands centres universitaires français. Elle se structure en sous-ensembles thématiques (mécanique des fluides numérique, turbulence et instabilités, milieux hétérogènes, écoulements polyphasiques, mécanique des fluides active, fluides géophysiques...), le plus souvent autour de GDR CNRS (MFN, GREDIC, MEROPE, TIFAN, SUBMESO, Mécanique des fluides active, Physique des milieux hétérogènes complexes, Turbulence et instabilités, Dynamique des fluides géophysiques et astrophysiques). Ces GDR présentent très fréquemment un caractère pluridisciplinaire bien marqué et favorisent des interactions fortes avec d'autres départements du CNRS, comme SPM et SDU. La mécanique des fluides française possède une très bonne reconnaissance internationale, avec des points forts comme la modélisation de la turbulence, l'étude des instabilités, l'aérodynamique, les écoulements polyphasiques. Elle joue un rôle très actif à l'échelle européenne, au sein d'organisation comme ERCOF-TAC ou du COST européen F1.

• **En ce qui concerne la thématique "Milieux réactifs hors équilibre",** elle bénéficie d'une bonne lisibilité des laboratoires dont les thèmes forts et les compétences sont bien identifiés.

- En combustion, les laboratoires importants - de taille supérieure à 50-60 personnes - sont localisés à Orléans, Poitiers, Rouen. Des laboratoires de taille intermédiaire ou plus limitée, ou des parties de laboratoires importants s'intéressant à la combustion, sont situés à Chatenay-Malabry, Lille, Lyon, Marseille, Saint-Cyr l'Ecole, Toulouse.

- Dans le domaine des plasmas froids et thermiques, les laboratoires de taille supérieure à 70-80 personnes sont localisés à Orsay, Orléans et Toulouse. Des centres ayant des effectifs plus limités sont situés à Limoges, Nancy, Nantes, Palaiseau, Grenoble, Clermont-Ferrand, Villetaneuse. L'activité dans le domaine des lasers est conduite à Marseille, Arcueil, Limoges, Orsay, Orléans.

On observe une bonne situation internationale avec des progrès importants en plasmas et en lasers, dans les dix dernières années, notamment sur les aspects modélisation et des résultats remarqués sur les sources lasers UV. Il s'est, par ailleurs, produit une généralisation dans l'utilisation de méthodes de diagnostic performantes (optiques, laser). La communauté combustion dispose d'une grande réputation internationale, eu égard à son poids numérique avec de bonnes compétences dans le domaine de la propulsion, de la sécurité et des incendies, dans celui de l'amélioration des rendements de combustion et de la protection de l'environnement.

1 - GÉNIE DES PROCÉDÉS

Le génie des procédés rassemble l'ensemble des connaissances et des méthodes nécessaires à la conception, la mise en œuvre et l'optimisation des procédés de transformation de la matière et de l'énergie. Transdisciplinaire, cette discipline s'appuie sur le corpus de disciplines fondamentales, mais a développé ses propres concepts et paradigmes, ainsi que des méthodes originales (approche systémique et

analytique, modélisation et expérimentation...), s'appliquant à des domaines très diversifiés (pétrole, chimie, agroalimentaire, nucléaire, santé, élaboration de matériaux, énergie...) et à des milieux physicochimiques extrêmes (plasma, supercritique...). Intégrant les différents aspects techniques, socio-économiques, environnementaux..., cette véritable science de l'ingénieur a comme objectif l'étude des systèmes complexes industriels et naturels et conduit à un niveau de compréhension supérieur de ces systèmes.

1. 1 LA SITUATION DU GÉNIE DES PROCÉDÉS EN FRANCE ET SA DYNAMIQUE D'ÉVOLUTION

Durant les huit dernières années, un certain nombre d'événements importants ont marqué le développement de la discipline :

- l'organisation en 1987 à Nancy du 1^{er} Congrès Français de Génie des Procédés, qui a rassemblé plus de 500 chercheurs, universitaires et industriels,

- la création, l'année suivante, du Groupe Français de Génie des Procédés (GFGP) associant industriels et universitaires,

- la publication en juin 1991 du rapport de mission Gaillard "Analyse et schéma de développement des pôles de compétence français en génie des procédés".

Ces trois événements ont contribué à créer en France une dynamique d'actions en génie des procédés et une meilleure structuration et organisation de la discipline. Signalons parmi les retombées importantes :

- la mise en place de groupes de travail thématiques chargés d'analyser les évolutions et de réfléchir à la prospective et aux enjeux ;

- l'organisation de nombreuses manifestations scientifiques, dont les congrès biennaux de génie des procédés. Le premier d'entre eux a donné lieu à la publication d'un ouvrage de référence en 1993 ;

- la mise en place de la "Collection Récents Progrès en Génie des Procédés", comportant aujourd'hui près d'une cinquantaine de volumes ;

- la préparation d'un traité français de génie des procédés, qui mobilise la communauté ;

- une position reconnue du GFGP en tant qu'interlocuteur du Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche, qui s'est traduite par un appel d'offres en génie des procédés et la mise en place de Journées Prospectives Cathala-Letort en octobre 1994 et 1996 ;

- une participation accentuée de la communauté française dans d'autres instances européennes ou mondiales, notamment au sein de la Fédération Européenne de Génie Chimique.

On savait que la France accusait il y a une dizaine d'années un important retard, tant sur le plan de l'enseignement que celui de la recherche (retard d'autant plus préoccupant que les pays les plus compétitifs sont précisément ceux où le génie des procédés connaît le plus grand développement). Cette situation s'est indiscutablement améliorée de façon inégale selon les secteurs, mais la position française est encore caractérisée par la faiblesse d'un certain nombre d'indicateurs, tels que le flux annuel d'ingénieurs formés par million d'habitants, le nombre de références dans les Chemical Abstracts par million d'habitants ou le nombre de brevets, par rapport à d'autres pays tels les États-Unis, l'Allemagne ou la Grande-Bretagne.

Au niveau des thématiques, même si certaines d'entre elles ont fait l'objet d'un certain développement en France durant les cinq à dix dernières années (telles l'environnement avec les incitations du programme Ecotech, le génie catalytique à Lyon ou les matériaux à Toulouse, Grenoble...), il convient de souligner la faiblesse relative des recherches sur :

- les procédés gouvernés par les phénomènes interfaciaux (émulsification par exemple),
- le génie des procédés mettant en œuvre des solides pulvérulents ou granulaires,
- le génie des procédés de formulation,
- l'élaboration des matériaux nouveaux ou améliorés,

- la technologie des équipements,

- la microélectronique et les nano- ou microtechnologies.

1. 2 ÉVOLUTION DU GÉNIE DES PROCÉDÉS ENJEUX ET DOMAINES D'ACTION

Présentation générale

Sur le plan des finalités, on peut admettre comme invariant de départ que les besoins scientifiques des activités de transformation de la matière, qui fournissent le substrat de problèmes au génie des procédés, n'iront pas en décroissant dans les années à venir, justifiant ainsi la continuation et le développement de cette discipline. Par contre, on assiste actuellement à des **changements de "forme"** ou de la motivation de ces besoins, par exemple :

- dans la prise en compte de la demande sociale : protection de l'environnement et de la santé, qualité de la vie, création d'emplois...,

- ensuite en terme d'évolutions et de défis industriels : les conditions de l'activité industrielle évoluent et induisent des orientations de fond privilégiant l'innovation de procédé et d'adaptation des produits, plutôt qu'une innovation portant sur la création de molécules nouvelles. Diminuer les coûts, la consommation de matières premières et d'énergie, les effets des procédés sur l'environnement tout en améliorant leur sûreté, augmenter leurs rendements et sélectivités, privilégier de nouveaux modes de production (modularisation, décentralisation...), raccourcir les délais des étapes de l'industrialisation, telles sont quelques évolutions en cours, qui correspondent à des tendances lourdes et non purement conjoncturelles.

Si l'on ajoute à cela que les industries de procédés ne peuvent plus se contenter de fabriquer des tonnes de "commodités" et d'intermédiaires (produites à faible coût dans des pays - Asie notamment - où les matières premières et la main d'œuvre sont bon marché et les contraintes régle-

mentaires et environnementales moins fortes), mais doivent aussi se tourner vers des produits de performance définis par leurs fonctions et leurs propriétés d'usage selon la demande du marché et des consommateurs, il y a tout lieu de penser que la recherche en génie des procédés doive intégrer ces évolutions, s'y adapter, sans remettre en cause ses finalités, ses problématiques scientifiques et ses objectifs purement cognitifs.

Sur le plan strictement scientifique, l'objectif global du génie des procédés pour le futur peut être résumé ainsi : **maîtrise totale et approche intégrée des procédés de transformation de la matière en tant que systèmes complexes**.

La maîtrise totale du procédé peut se décliner selon cinq rubriques :

- **Maîtrise des processus et phénomènes** : transferts et réactions couplés en milieux complexes, dispersés, polyphasiques, multicomposants ; intensification des transferts ; pilotage local des transformations ; apports d'énergie sélectifs et dirigés...

- **Maîtrise de l'information** : modélisation systémique ou analytique, simulation numérique, capteurs complexes et pour milieux complexes, méthodes de l'informatique avancée, optimisation, traitement du signal.

- **Maîtrise des produits et de la matière** : élaboration de matériaux divisés, organisés, polymères..., synthèse de propriétés d'usage, adéquation formulation-propriétés d'usage...

- **Maîtrise de l'environnement** : procédés intrinsèquement sûrs et propres, analyse des risques, traitements avals air, eau, sols, optimisation des recyclages, ergonomie.

- **Maîtrise des équipements** : utilisation de matériaux nouveaux, amélioration des connaissances des opérations unitaires, nouveaux types d'équipements adaptés à la maîtrise des processus et des propriétés.

L'approche du complexe fait donc partie intégrante de la discipline du génie des procédés et ne doit pas être abandonnée à la physique, la méca-

nique, l'automatique, la biologie ou la chimie ; il est cependant nécessaire de mieux définir la propre typologie du génie des procédés, qui se définit surtout par les milieux, les phénomènes, les comportements et les systèmes et objets complexes auxquels il s'intéresse.

La maîtrise totale du procédé est un objectif idéal sans doute difficile à atteindre, mais qui doit constituer l'enjeu principal du génie des procédés pour l'avenir.

Traduction en termes d'orientations pour la recherche en génie des procédés

Il est hors de question de recenser ici de manière détaillée tous les thèmes de recherche qui constitueront l'activité des laboratoires dans les années à venir, mais plutôt de définir quelques grandes orientations à forts enjeux scientifiques, technologiques et industriels.

Elles résultent pour la plupart de travaux de réflexion du Groupe Français de Génie des Procédés dans le cadre de ses manifestations biennales ou thématiques, ses groupes de travail, ses journées thématiques de prospective en partenariat avec le Ministère de la recherche, mais aussi de la profession industrielle (rapports de l'Union des Industries Chimiques) ou de la Fédération Européenne de Génie Chimique, aux travaux de laquelle le GFGP participe activement.

Mise en œuvre et analyse des milieux à structure ou à rhéologie complexe

De tels milieux se rencontrent dans de nombreuses industries sous la forme de pâtes, mousses, suspensions, émulsions, dispersions, gels, polymères..., systèmes dont les propriétés sont souvent contrôlées par des phénomènes interfaciaux.

Un cas particulièrement difficile est celui des milieux évolutifs, où les propriétés se modifient fortement en cours d'élaboration : polymérisation, fermentation, cuisson-extrusion, extrusion réactive, émulsification, etc. Une grande question consiste à savoir dans quelle mesure les méthodes classiques du génie des procédés, développées pour les

milieux physiquement conventionnels, sont encore applicables. Jusqu'où peut-on utiliser les corrélations classiques pour le choix, le dimensionnement et l'extrapolation des équipements ? Peut-on s'appuyer sur des propriétés effectives comme la viscosité de procédé ? Les objectifs scientifiques résident dans le développement de nouveaux concepts spécifiques à ces milieux complexes et de nouvelles méthodologies d'analyse systémique des comportements rhéologiques fondées sur la mise en corrélation entre les propriétés physiques objectives des produits et leur réponse en contrôle-qualité et analyse sensorielle subjectives. Un effort particulier doit être fait aussi en étroite collaboration avec les constructeurs pour améliorer les équipements existants et concevoir de nouveaux équipements et, pourquoi pas, des machines intelligentes.

Maîtrise des procédés de production et/ou de transformation des solides

On estime à environ 70 % la part des procédés industriels mettant en jeu des solides divisés, qui interviennent en tant que véhicules ou supports de substances actives ou consommables, précurseurs de matériaux plus élaborés ou encore en tant que charges. On cherche en général à obtenir des propriétés macroscopiques données telles que filtrabilité, coulabilité, coloration, aptitude au frittage, solubilité, cohésion etc., lesquelles sont gouvernées par des propriétés microscopiques : répartition granulométrique, morphologie des particules, cristallinité, teneur en humidité... Le développement de technologies propres tend par ailleurs à privilégier les réactions en phase solide par rapport aux réactions dans les solvants. Or, il faut bien reconnaître que les opérations unitaires sur les solides (cristallisation et précipitation, fabrication d'aérosols ou de nanoparticules, procédés sol-gel, agglomération, mélange, broyage, frittage calcination, compactage...) sont encore mal comprises et insuffisamment maîtrisées. En particulier, il importe de maîtriser les opérations de création de particules solides, comme la précipitation et la cristallisation ou leur transformation. Un autre problème est ensuite de mettre en forme les solides en vue d'une utilisation donnée. Les problèmes liés à l'extrapolation sûre et rapide du laboratoire à l'usine, à la conception des équipements ou à la maîtrise des propriétés d'usage comme la couleur, l'odeur, la frittabilité, la biodisponibilité..., sont également posés.

Il y a là un champ de recherche important, justifiable d'une collaboration avec les physiciens en vue de formaliser les connaissances sur les mécanismes physiques et physicochimiques des opérations et de développer les théories, outils et modèles nécessaires.

Développement du génie des procédés appliqués à la formulation

On assiste actuellement à une demande croissante de la part du marché pour des produits élaborés combinant plusieurs fonctions d'usage et propriétés, dont la synthèse nécessite de recourir à des formules appropriées associant plusieurs produits (cinq à dix typiquement dans le cas de concentrés dispersables contenant une ou plusieurs molécules actives). Or, aujourd'hui, la formulation, où la rhéologie et les phénomènes interfaciaux jouent un rôle primordial, repose encore sur une approche très largement expérimentale et empirique, alors que le poids économique des activités de formulation est proche de la moitié de celui de l'ensemble des activités de l'industrie chimique par exemple.

Au-delà de la maîtrise de la physicochimie, des phénomènes d'adhésion, de mouillage, de collage, des phénomènes aux interfaces et des interactions moléculaires et solides/liquides, il est indispensable de développer un "génie de la formulation", notamment absent de la recherche publique française aujourd'hui, reposant sur une approche transversale des problèmes favorables à la créativité. D'un point de vue génie des procédés, les domaines concernés sont, à titre d'exemple :

- le broyage et la cristallisation en relation avec la structure cristalline,
- la rhéologie des milieux complexes et des poudres,
- la modélisation et la mécanique des mélanges de poudres,
- l'agitation des milieux complexes,
- les transferts à travers les membranes.

Il s'agit là d'un domaine difficile, à forts enjeux scientifiques et industriels, où une forte incorporation de physique et de physicochimie est indispensable et l'appui de la recherche fondamentale nécessaire pour soutenir l'évolution de cette activité.

Maîtrise de l'information - Modélisation - Simulation

La maîtrise totale des procédés en terme d'information repose sur celle de la chaîne : capteur complexe représentation de l'état du système modélisation automatique, de tendance, adaptative simulation conception, dimensionnement, conduite, optimisation, commande. Cet objectif global est donc sous-tendu par une triple démarche : technique pour les capteurs, numérique pour la simulation, conceptuelle pour la systémique et la modélisation.

L'atteinte des objectifs traditionnels de sécurité, d'optimisation, de coûts de fabrication, de rendements et de sélectivité, mais aussi de nouveaux objectifs de flexibilité et d'ajustement de qualité de production à des demandes multiformes et évolutives est très largement conditionnée par un développement des recherches dans ce secteur. Par ailleurs, le spectaculaire accroissement de la puissance des ordinateurs ouvre la voie à des méthodes de simulation numérique capables de traiter des modèles mettant en jeu des centaines de milliers de variables et d'équations, et la modélisation des propriétés physiques et moléculaires utilisant des banques de données devient une réalité tangible.

Les orientations de recherche à privilégier sont les suivantes :

- développement de nouveaux modes de prise d'information notamment à travers les capteurs complexes (multicapteurs, capteurs logiciels), les capteurs en milieux complexes et les techniques de visualisation et d'imagerie,

- développement de modèles systémiques fondés sur une approche intégrée, qui considère globalement le comportement des systèmes complexes, en complément de l'approche analytique détaillée,

- développement et acquisition des outils et méthodes de l'intelligence artificielle, les réseaux neuronaux, la logique floue....,

- techniques modernes de commande avancée des systèmes non linéaires,

- logiciels de calculs et simulations statique et dynamique (trouver des niches où notre pays a des atouts pour réussir, par exemple dans le domaine des réacteurs),

- pilotage local des procédés : ce volet concerne typiquement des recherches à fort enjeu, encore en amont des applications. Il s'agit d'un concept relativement nouveau, qui consiste à accroître, par l'intermédiaire de capteurs et d'actionneurs, le flux d'information entre l'homme et le procédé – et donc le contrôle de l'opérateur sur la transformation qui s'y opère – alors que la conduite traditionnelle agit aux bornes du procédé et laisse les transformations se dérouler spontanément. La communauté française semble ici en avance dans ses réflexions sur ses homologues étrangers.

La conception des équipements

La France accuse dans ce domaine un retard certain, notamment par rapport à l'Allemagne, au Japon et quelquefois à l'Italie, et si des évolutions techniques ont amélioré l'efficacité et la fiabilité des équipements utilisés dans les industries de procédé, il faut bien reconnaître que leur principe et leur conception (colonnes à distiller, réacteurs, mélangeurs...) ont peu évolué, alors que dans d'autres domaines, tel l'aéronautique, des progrès considérables ont été effectués au cours du siècle. Il y a donc là un champ d'action important pour le génie des procédés, à fort enjeu économique et scientifique, en vue de concevoir des équipements fondés sur des principes nouveaux dans une démarche plus scientifique et d'envisager de nouveaux modes de production industriels.

Un tel objectif passe bien entendu par une collaboration avec les équipementiers et les fabricants.

Parmi les voies de recherche envisageables, on peut mentionner :

- l'amélioration des connaissances des opérations unitaires - équipements pour de nouvelles opérations,
- utilisation de matériaux nouveaux,
- équipements pour les conditions extrêmes, les milieux complexes et dispersés, vivants,
- équipements spécifiques ou polyvalents, à fonc-

tions séparées ou intégrées (transfert – réaction – séparation),

- nouveaux types d'équipements adaptés à la maîtrise des processus et des propriétés,
- nouveaux modes de production : régimes cycliques, transitoires, miniaturisation, modularisation, décentralisation des fabrications...

Recherche sur des applications potentielles de nouvelles technologies : plasma, laser, ultrasons, conditions extrêmes, supraconductivité, bioélectrochimie...

Les six orientations précédentes constituent des voies nouvelles ou insuffisamment développées en France, mais il n'en reste pas moins que les secteurs plus traditionnels, où les équipes françaises sont bien positionnées, continueront à faire l'objet de recherches actives, notamment dans les champs suivants :

- réactions et réacteurs, séparations et séparateurs : on mentionnera, en particulier, le domaine de la catalyse, pour laquelle la recherche française qui a été en pointe, a vu sa position s'effriter progressivement. L'effort de recherche devra porter sur le génie de l'élaboration des catalyseurs industriels et le génie des réacteurs catalytiques, selon une approche pluridisciplinaire associant des chimistes et des spécialistes du génie des procédés ;

- transferts-transports, notamment dans les milieux hétérogènes et dispersés, en milieux complexes et polyphasiques... ;

- thermodynamique et utilisation rationnelle de l'énergie : analyse exergétique des procédés, développement de nouvelles sources et de nouvelles technologies, intégration thermique des procédés ;

- génie de l'élaboration des matériaux (céramiques, composites, couches minces, polymères, cristaux fins...) ;

- simulation, automatisation, mesure, contrôle, commande ;

- génie biochimique, à l'interface du génie des

procédés et des Sciences de la Vie et qui se caractérise par son approche intégrée : bioprocédés industriels, ingénierie biomédicale, maîtrise intégrée des systèmes biologiques.

2 - DYNAMIQUE DES FLUIDES, TURBULENCE, MILIEUX HÉTÉROGÈNES ET TRANSFERTS

2. 1 SITUATION DE LA THÉMATIQUE ET RÉSULTATS MARQUANTS

Le thème "Dynamique des fluides, turbulence, milieux hétérogènes et transferts" est très vaste et recouvre une grande diversité de problèmes scientifiques. Il implique également des communautés qui ont longtemps évolué séparément. Il s'avère cependant que beaucoup de laboratoires mènent maintenant des activités de recherche à la fois en mécanique des fluides, en transferts thermiques et en milieux hétérogènes. Cette interpénétration des disciplines a largement contribué à abaisser les barrières et à promouvoir la diffusion des méthodes et outils (simulations numériques, approches multi-échelles, techniques de diagnostics, par exemple), même si l'effort en ce sens doit encore être poursuivi.

Évolution de la thématique

Après un développement rapide lié à l'essor de l'industrie aéronautique, la mécanique des fluides connaît actuellement une période de mutation. Elle se tourne en effet de plus en plus vers les problèmes scientifiques posés par de nouveaux défis socio-économiques. Parmi ceux-ci, on peut citer le contrôle de l'environnement, qui passe entre autre par la prédition de la dispersion de polluants dans l'atmosphère, à l'échelle de la source de pollution, de la ville, voire à une échelle plus large,

ou encore la pollution hydrologique. On peut encore évoquer le développement des transports terrestres, pour lesquels les problèmes d'aérodynamique se posent tant au niveau du dessin des véhicules, que de la conception de moteurs performants et propres, qui s'appuie de plus en plus sur le calcul des écoulements dans la chambre de combustion. La maîtrise des procédés industriels offre également un champ de problèmes très vaste pour la dynamique des fluides : prévision de l'hydrodynamique des réacteurs chimiques, contrôle des instabilités. L'industrie aérospatiale, enfin, génère également de nombreux problèmes originaux. Les champs d'application de la thermique sont très voisins et concernent à peu près tous les secteurs de l'activité humaine. La discipline a évolué vers une approche plus locale des phénomènes intervenant dans les systèmes thermiques, et s'appuie de plus en plus sur la modélisation numérique. C'est également le domaine privilégié des couplages entre phénomènes physiques : changement de phases, convection-rayonnement, conduction-convection... Les milieux hétérogènes se rencontrent également dans d'innombrables situations, depuis la circulation des eaux dans les sols, jusqu'aux écoulements de gaz et de particules solides dans les procédés de raffinage catalytiques. Là encore se développe une tendance vers une description macroscopique locale, qui s'ouvre vers la modélisation numérique multidimensionnelle des écoulements.

Résultats marquants

Parmi les développements récents les plus marquants de la thématique, on peut noter l'étude systématique des instabilités hydrodynamiques et thermoconvectives, à partir des méthodes de la physique non linéaire, de la théorie des instabilités globales, d'expériences de laboratoire très fines, ou encore de simulations numériques très précises. Ces études ont permis de mieux comprendre les mécanismes non linéaires gouvernant l'évolution des instabilités, ce qui est un premier pas vers leur contrôle (contrôle actif). Il faut à ce titre souligner le rôle de plus en plus important de la mécanique des fluides numérique, ou CFD chez les Anglo-Saxons, et sa percée dans le milieu industriel. Outre les méthodes de modélisation statistique des écoulements turbulents, la simulation des grandes

échelles (LES), qui consiste à ne calculer que les plus grandes structures cinématiques apparaissant dans les écoulements turbulents, a pris un essor important, qui n'est plus limité par les moyens de calcul. Elle permet d'ores et déjà d'aborder certains problèmes industriels. Des progrès notables ont été accomplis dans le domaine des écoulements hétérogènes, des écoulements polyphasiques, tant au niveau des instabilités liées à ces situations (fluidisation, instabilités d'interface), que de leur comportement à l'échelle des hétérogénéités ou à l'échelle macroscopique. Un élément marquant est aussi l'avènement des techniques de diagnostic non intrusives permettant une appréhension globale des champs cinématiques ou thermiques : méthode de détermination du champ instantané de vitesse dans un fluide fondée sur l'imagerie de petites particules (PIV), méthodes utilisant les propriétés spectroscopiques du milieu (DRASC), imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRMN), et plus généralement les techniques d'imagerie optiques ou acoustiques.

2. 2 ENJEUX SCIENTIFIQUES

Les problèmes soulevés par les nouveaux défis technologiques appellent à une maîtrise de la complexité. Il s'agit avant tout de mieux comprendre, pour prédirer et agir sur la dynamique de systèmes complexes. Cette appellation un peu vague recouvre un grand nombre de situations diverses, la complexité pouvant provenir d'états thermodynamiques particuliers (changements de phase, fluides supercritiques...), de phénomènes couplés induisant un comportement thermomécanique complexe (milieux chimiquement réactifs, ferro-fluides...), de lois rhéologiques ou de propriétés thermodiffusives non classiques (bio-fluides, polymères, agro-alimentaire...), d'hétérogénéités du milieu à l'échelle d'observation considérée (écoulements polyphasiques dispersés, milieux poreux ou granulaires...), ou enfin de fortes non linéarités conduisant à une évolution spatio-temporelle complexe ou chaotique (turbulence, mélange, instabilités, grands systèmes thermiques...). Malgré cette diversité, on peut identifier quelques grands problèmes fédérateurs, qui se rencontrent dans d'autres domaines des sciences : dynamique des phénomènes non linéaires, systèmes à grand nombre de

degrés de liberté, "homogénéisation" des milieux hétérogènes et passage micro-macro, description méso-échelle et simulation des grandes échelles, problèmes inverses. Le développement de méthodologies nouvelles pour aborder ces problèmes généraux est sans doute une priorité, pour laquelle l'interdisciplinarité est essentielle.

Sur le plan de la problématique scientifique, les enjeux se situent au niveau de la **dynamique des fluides fondamentale, de la physique des fluides complexes ou hétérogènes et des fluides en situations extrêmes, des phénomènes couplés**.

Une des questions fondamentales en **dynamique des fluides et turbulence** reste la compréhension des mécanismes physiques intervenant dans le développement des instabilités, la transition vers la turbulence et son évolution spatiale et temporelle. Une amélioration des connaissances est essentielle pour atteindre des objectifs industriels comme le contrôle des écoulements en aérodynamique, dans les chambres de combustion de moteurs d'avions ou de voiture, ainsi que pour améliorer l'impact de certains procédés sur l'environnement. Plus précisément, il est important de soutenir l'effort dans le domaine des instabilités hydrodynamiques, thermoconvectives, interfaciales, les mécanismes de transition vers la turbulence et le chaos, les processus de mélange. Le domaine de la turbulence développée, qui touche d'innombrables applications, évolue vers la prise en compte des sollicitations externes, comme la rotation, la compression (chambres de moteurs), la gravité (écoulements à densité variable dans l'atmosphère...), le confinement et l'instationnarité (géométries complexes), le champ magnétique (magnétohydrodynamique). L'interaction des écoulements avec les parois solides ou déformables (couplage fluide-structure) reste un domaine mal maîtrisé essentiel pour les applications aéronautiques et le transport terrestre. Un des défis technologiques pour l'avenir est le contrôle actif des écoulements : contrôle des décollements, des instationnarités en aérodynamique et en turbomachine, contrôle des processus de mélange dans les réacteurs chimiques, contrôle des processus de combustion... Cette évolution conceptuelle très importante, qui revient à agir sur le phénomène (à l'aide d'actuateurs, par

exemple) afin de lui assigner une fonction particulière, nécessite une approche pluridisciplinaire dans ses interactions avec la mécanique, l'électronique, l'automatique. La thématique fait largement appel à la modélisation et la simulation numérique. L'approche statistique et le développement de modèles de fermeture restent un point fort en France, et trouvent de nombreuses applications industrielles. La simulation numérique directe des équations de Navier-Stokes est devenue un outil privilégié d'analyse des écoulements turbulents, ainsi que la simulation des grandes échelles (LES). La prise en compte des échelles non résolues par modélisation de sous-maille reste un problème actuel pour les géométries industrielles.

Les **fluides complexes** de par leur structure moléculaire, comme les biofluides, les polymères, les ferro-fluides, les milieux chimiquement réactifs, possèdent des lois de comportement macroscopiques souvent mal connues. Notre maîtrise de la dynamique de tels fluides est loin d'atteindre celle des fluides newtoniens classiques. Les fluides en **situation extrême** se rencontrent dans les écoulements hypersoniques (avion à grande vitesse, aéronautique...), les écoulements au voisinage du point critique (injection haute pression en moteur automobile ou moteur fusée), les écoulements réactifs, les plasmas, et sont à la base de nombreuses innovations technologiques. Les **milieux hétérogènes**, par leur structure spatiale, demandent une approche multiéchelle, depuis les écoulements et transferts à l'échelle des hétérogénéités elles-mêmes et les interfaces (échelle qualifiée de microscopique, par abus de langage), jusqu'à la description macroscopique, du type milieux continus, utilisée dans les modélisations. Ceci implique des recherches au niveau de la dynamique des interfaces fluide-fluide, fondamentale tant dans les applications du génie chimique (coalescence, par exemple) que de la combustion (formations de gouttelettes lors de l'injection de carburant...). La dynamique des particules solides, bulles, gouttes, les forces associées à l'écoulement du fluide porteur, les interactions hydrodynamiques, sont autant de questions à approfondir afin de comprendre la physique des écoulements polyphasiques. Les transferts thermiques aux interfaces fluide-fluide avec ou sans changement de phase (ébullition, condensation, cryoconcentration, solidification,

fusion, sublimation, ablation), ou aux interfaces couches minces-substrats, les interfaces soumises à des conditions extrêmes (impact laser), représentent un thème de recherche très porteur pour les applications énergétiques, agro-alimentaires et l'élaboration de nouveaux matériaux. La microhydrodynamique, ou hydrodynamique à l'échelle du pore (milieux poreux, milieu osseux), du capillaire (hématorhéologie), des microorganismes, est une ouverture vers la biomécanique qui n'a pas la place qu'elle mérite en France.

Le passage de l'échelle microscopique à la description macroscopique a pour objectif l'établissement de lois de comportement macroscopiques pour les milieux hétérogènes. Outre les méthodes d'homogénéisation, qui bénéficieraient d'une interaction plus forte avec les mathématiciens, les modèles statistiques (eulériens, lagrangiens, densités de probabilités) restent une voie d'avenir pour la modélisation des écoulements polyphasiques. Le couplage avec les méthodes de la dynamique moléculaire et de la théorie cinétique est particulièrement intéressant pour les milieux dispersés (lits fluidisés, milieux granulaires, brouillards de gouttelettes, suspensions...). Le comportement macroscopique des écoulements hétérogènes pose lui-même des problèmes spécifiques : formations d'agrégats, instabilités à grande échelle, fluidisation, turbulence, pour les écoulements à phase dispersée ; transitions de régimes dans les écoulements diphasiques confinés ; transferts thermiques dans les milieux polyphasiques ou poreux.

La compréhension et la modélisation des phénomènes couplés est sans aucun doute un des défis importants pour la discipline. Les procédés industriels utilisent de plus en plus de fluides complexes soumis à des champs électromagnétiques. Les phénomènes radiatifs dans les milieux semi-transparents tridimensionnels, les écoulements turbulents, ont des implications aussi bien en énergétique qu'en environnement. L'étude des transferts thermiques convectifs en situations instationnaires, dans les milieux à propriétés physiques variables (métaux liquides, fluides agro-alimentaires...) est à soutenir, de même que tous les phénomènes de couplages thermomécaniques intermodes : conduction-convection, conduction-rayonnement, etc., ou avec d'autres phénomènes physiques de nature

massique (diffusion), chimique, électrique (micro-ondes, effets Joule), ou biologique. La modélisation et l'optimisation des systèmes complexes constituent un thème pluridisciplinaire encore peu abordé dont les applications sont nombreuses : électronique de puissance, habitat, automobile, centrale nucléaire, etc. L'approche intégrée des grands systèmes thermiques offre des perspectives très intéressantes et une interaction forte avec le génie des procédés.

La problématique scientifique décrite – incomplètement par nécessité – plus haut nécessite des outils d'investigation et de modélisation. Les besoins en moyens de diagnostics expérimentaux restent cruciaux. Si les techniques non ou peu intrusives d'imagerie ont révolutionné le domaine de la mécanique des fluides durant la dernière décennie, la métrologie thermique, l'instrumentation en milieux hétérogènes ou en situation extrême conditionne les progrès à attendre dans ces disciplines. La simulation numérique a permis de réaliser des expériences numériques, dans des situations simplifiées, qui constituent une aide indéniable à la compréhension des mécanismes physiques. La confiance à apporter à cette démarche passe par le développement de méthodes numériques de haute précision, adaptées aux nouvelles possibilités offertes par la formidable explosion des moyens de calculs.

3 - MILIEUX RÉACTIFS HORS ÉQUILIBRE (COMBUSTION, PLASMAS, LASERS)

3. 1 LES GRANDS PROBLÈMES DE LA THÉMATIQUE, LES GRANDES TENDANCES

La thématique couvre les domaines de la combustion, des plasmas à basse température et thermiques, de la physique des lasers à gaz et de l'utilisation des lasers. Elle trouve ses motivations dans un large éventail de problèmes industriels et socio-

économiques dans des domaines aussi variés que les moteurs propres, la propulsion et les transports à longue distance, la propulsion ionique, l'élaboration de matériaux ou la modification de leurs propriétés de surfaces, le contrôle de la production d'effluents gazeux et leur traitement et, plus généralement, les procédés propres, la sécurité incendie et explosions, ...

Si les situations étudiées sont diverses, les problèmes scientifiques sont communs, par exemple, en terme de **forte réactivité des milieux étudiés, de complexité des processus mis en jeu, de non équilibre thermodynamique et/ou chimique et, souvent, d'instationnarité**. La nature de ces problèmes conduit à des méthodologies associant étroitement diagnostics et modélisations d'une part, dynamique des fluides et génie des procédés d'autre part.

Au cours des dernières années, des tendances communes aux domaines de la combustion et des plasmas se sont affirmées autour :

- de l'étude expérimentale et la modélisation des milieux diphasiques (combustion diphasique, poudres dans les plasmas thermiques, formation d'aérosols),

- de la dépollution et des procédés propres : prédiction de la formation des effluents (suius et polluants dans les flammes), dispersion des effluents au voisinage des sources, traitement des effluents gazeux....,

- de la prise en compte des cinétiques de paroi (interactions flammes-parois et plasmas-surfaces),

- de la généralisation de méthodes de diagnostics (en particulier, différentes techniques de diagnostics optiques et laser).

Plus spécifiquement, on retrouve dans le domaine de la combustion des problèmes de dynamique des fluides tels que la prise en compte des grandes échelles dans les écoulements réactifs turbulents et instationnaires. À ce niveau, les modèles évoluent vers une extension des méthodes dites LES. Les problèmes liés à la modélisation des couplages entre chimie et écoulement prennent en

compte des schémas représentatifs de cinétique chimique et à la nécessaire réduction des schémas cinétiques complexes sont particulièrement importants et, en partie, communs avec les plasmas. Il devient par ailleurs important de considérer la présence de particules chargées notamment pour les modélisations, et donc de rapprocher les communautés de combustion et plasmas.

Le domaine des plasmas a subi une évolution rapide au cours des dernières années. Un effort continu est effectué pour la mise au point de nouveaux réacteurs ayant de meilleures performances en terme de vitesses de procédés, de capacités de traitement (réacteurs de grande surface ou grand volume). Cette tendance s'accompagne du développement de modèles couplant écoulements et cinétique chimique. Contrairement aux États-Unis et au Japon, la situation de l'industrie micro-électronique en Europe a conduit à une réduction de l'effort de recherche sur les matériaux pour l'électronique, ce qui s'est traduit par un mouvement d'équipes vers d'autres applications et/ou matériaux d'intérêt industriel ou vers d'autres technologies (nanotechnologies par exemple). À l'interface entre plasmas chauds et plasmas froids, des évolutions sur des échelles de temps assez courtes se sont traduites par un mouvement très marqué, notamment aux États-Unis et en Allemagne, des physiciens des plasmas chauds vers les plasmas froids. Ce mouvement est en France de moindre ampleur mais significatif. Enfin, ces dernières années ont été marquées par une réduction des activités relatives aux plasmas de rentrée atmosphérique suite à l'abandon, en France, du projet de véhicule spatial Hermès.

Dans le domaine des lasers, l'amélioration très rapide des performances a conduit à réduire l'effort sur l'étude des sources (sauf systèmes particuliers d'intérêt militaire ou relatifs au domaine des rayons X) pour mettre l'accent sur l'utilisation des lasers et leurs applications tout particulièrement au traitement de matériaux. Des travaux expérimentaux et de modélisation sont en développement rapide pour les études de l'interaction laser-matériau à densités de flux moyennes et élevées. La communauté se préoccupe des aspects procédés (mise en forme et transport de faisceaux, adaptation de la source au procédé, contrôle actif des traitements, ...). La disponibilité récente au laboratoire de lasers femtose-

condes permet d'aborder, sous des aspects nouveaux, la physique de l'interaction laser-matériaux.

Dans les deux domaines des plasmas et des lasers, on observe un intérêt croissant pour les études relatives aux surfaces : modification des états de surface, des propriétés tribologiques, mécaniques, thermiques, ...

3. 2 LES ENJEUX SOCIO-ÉCONOMIQUES

La thématique est, d'abord, directement concernée par la production d'énergie, et donc la maîtrise ou l'utilisation rationnelle de sources traditionnelles ou nouvelles (hydrogène et moteurs cryogéniques, carburants liquides d'origine agricole, utilisation de charbons pauvres pulvérisés...). Elle est également intéressée (dans un contexte international) par les études relatives à la fusion thermo-nucléaire contrôlée (fusion par ions lourds, fusion indirecte, plasmas denses), par les études de matériaux résistant aux hautes températures, et par le développement et l'utilisation des lasers de grande puissance moyenne.

Une part importante des travaux a trait aux problèmes liés à la ville (environnement et pollution, procédés propres, transport, industrie). Ces problèmes portent, pour la combustion, sur le moteur à combustion propre, l'efficacité de la combustion, les bruits et les instabilités de la combustion et, plus généralement, sur l'élimination des déchets et des effluents, notamment par utilisation des procédés plasmas (substitution de voies sèches aux voies humides) et laser. Ils concernent également les aspects de sécurité contre les incendies et les explosions.

Un des problèmes rencontrés par les laboratoires est la définition des normes, les laboratoires devant être capables d'anticiper sur l'évolution des normes relatives aux différents polluants ainsi que sur celle des normes de tenue au feu des matériaux.

Une motivation importante des travaux réside dans les transports du futur et les moyens de transport à longue distance (avions supersoniques,

fusées, propulsion plasmique, ...) mais aussi dans des études prospectives relatives à des moyens de propulsion nouveaux (moteurs à détonation pulsée, superstatoréacteurs, ...).

La plupart des laboratoires de plasmas et lasers sont concernés par la définition et mise en œuvre de nouveaux matériaux ou la modification des propriétés de surface des matériaux (revêtements durs et anticorrosion, ...) par traitements en plasmas réactifs, par dépôts de films minces (pulvérisation cathodique réactive ou non, projection par arc, dépôt par laser) ou par procédés laser (gravure, ablation, ablation réactive). Ils s'intéressent également à la mise au point de procédés pour la fabrication de matériaux grand public, la définition et l'optimisation de réacteurs adaptés et le passage du réacteur de laboratoire au réacteur industriel. Le génie des procédés est directement concerné par ce champ d'application.

3. 3 LES ENJEUX SCIENTIFIQUES

Un certain nombre d'enjeux scientifiques concernant les milieux réactifs sont communs à l'ensemble des laboratoires de la section tels, par exemple, la prédiction des écoulements réactifs industriels du point de vue des **grandes échelles**, les études relevant des milieux polyphasiques (combustion de gouttes et de particules solides, formation de particules, de poudres, d'aérosols, ...), celles concernant les **phénomènes couplés** ou la nécessité de prendre en compte les phénomènes aux parois.

Cependant, ils se particularisent par la **complexité** liée à la **réactivité chimique** des milieux et leurs **aspects hors équilibre**. Leur caractère spécifique tient à la nécessité de traiter simultanément les aspects hors équilibre de la cinétique chimique et des processus physiques, de l'hydrodynamique, du transport et des échanges de matière et de tenir compte de conditions aux limites et/ou de conditions physico-chimiques aux parois qui peuvent être instationnaires. Une approche de type fluide est très souvent inadaptée, et il est nécessaire d'utiliser des approches alternatives (Monte-Carlo, ...) et de repartir des processus ou des réactions élémentaires.

Il est en pratique exclu de traiter simultanément l'ensemble de ces aspects pour des conditions "industrielles" ; il est donc nécessaire de concevoir des expériences "modèles" utilisant par exemple des géométries simples ou des milieux chimiquement moins complexes. Par ailleurs, la nécessité d'interactions fortes avec le génie des procédés est maintenant évidente.

En modélisation plasma, il est fréquemment nécessaire de tenir compte du couplage de l'électromagnétisme à l'hydrodynamique et aux cinétiques chimiques hors équilibre. Pour l'ensemble des milieux réactifs, le couplage rayonnement-chimie reste un problème difficile à traiter. En combustion, la modélisation fine des fronts de flamme reste à faire. On attend beaucoup du développement de méthodes basées sur la modélisation des petites échelles et la simulation directe des grandes échelles.

Une des difficultés rencontrées tient à un **manque important de données de base** (sections efficaces, constantes de réactions, propriétés radiatives) en physique atomique et moléculaire pour l'élaboration de modèles physiques plus fiables (combustion de molécules complexes, plasmas moléculaires). Les chercheurs ne doivent et ne peuvent s'interdire d'aborder les problèmes de physique de base : les études fines de cinétiques physico-chimiques sont essentielles pour la modélisation de la combustion et des décharges électriques, pour la prédiction de la formation des polluants et pour les études relatives à la dépollution. Pour les milieux réactifs, la modélisation des couplages entre chimie et écoulement passe par la mise au point de schémas de cinétique chimique ou physicochimique représentatifs, validés et si possible réduits.

Des résultats scientifiques importants sont attendus des études en conditions extrêmes, relatives ici à la combustion et aux cinétiques chimiques en conditions supercritiques, à la combustion en microgravité. L'utilisation des hautes et très basses pressions à très basse ou à très haute température dans les réacteurs plasma, outre leur intérêt applicatif, permet d'accéder à des données spécifiques (réactions aux parois, collisions à trois corps).

3. 4 LES OUTILS

Une méthodologie commune à l'ensemble "milieux réactifs" est le **fort couplage modélisation-études expérimentales**, lié à la coexistence et la compétition d'un nombre important de processus, pas toujours connus, ou phénomènes complexes. Cette nécessité impose une double évolution des techniques de diagnostics et des éléments pris en compte dans les modèles. Il est important de favoriser des approches expérimentales et numériques multi-échelles des systèmes étudiés. Toutes les méthodes dites par tranches laser sont à développer.

Pour les diagnostics de pointe, les communautés françaises de combustion et de plasmas sont bien placées : il est nécessaire de maintenir ce bon niveau et l'avance relative, notamment dans le domaine de l'optique, en anticipant les besoins (humains et matériels).

En raison, en particulier de la complexité des situations abordées, il est primordial de veiller à conserver un couplage fort entre le développement de codes numériques, la modélisation physique, les diagnostics et l'instrumentation des expériences et les développements spécifiques en physique fondamentale.

En modélisation, il faut favoriser l'échange de codes numériques et la complémentarité des approches. La coexistence de divers niveaux de modélisation (modèles détaillés, modèles globaux) et des compétences (hydrodynamique, physico-chimie hors équilibre, électromagnétisme) sont également à sauvegarder.

3. 5 QUELQUES RECOMMANDATIONS

Partant de l'analyse de la situation et des besoins, quelques recommandations peuvent être faites :

- Mieux profiter des compétences de la communauté et assurer une meilleure interdiffusion du savoir-faire et de l'utilisation de méthodes de diagnostic performantes, ainsi que dans le domaine

de la modélisation et des codes numériques. La recommandation faite en 1992 de réunir les communautés de la combustion et des plasmas au sein d'une structure de recherches coordonnées sur les "Diagnostics des milieux complexes" reste d'actualité. De gros efforts restent à faire dans le domaine de l'analyse et de la modélisation des écoulements réactifs polyphasiques.

- Les échanges organisés à l'intérieur de la communauté devraient être renforcés. Une meilleure structuration, notamment sous la forme de GDR ou d'ARC accompagnés d'un minimum de moyens, apparaît comme nécessaire notamment – mais pas exclusivement – dans les domaines en émergence (polluants, environnement par exemple).

- Préciser la définition des pôles de recherche couvrant les actions de la communauté afin d'améliorer l'identification des diverses compétences.

Plus spécifiquement, il est nécessaire :

- d'approfondir une réflexion dans le domaine des plasmas et de la combustion pour répondre aux besoins des PME-PMI. Les collaborations avec les physiciens des plasmas et les spécialistes de génie des procédés dans des domaines d'applications, notamment matériaux, en liaison avec d'autres secteurs (chimie par exemple), méritent d'être renforcées. Les initiatives de type Centre de Ressources Technologiques (CRT) Plasmas-Laser, Centre Laser Franco-Allemand prévu à Palaiseau et club CRIN-PISE restent sans doute insuffisantes ;

- que les travaux autour du programme Hermès qui ont mobilisé des moyens humains et matériels importants et ont introduit une dynamique importante en Europe dans le domaine des plasmas

de rentrée et du génie des matériaux à haute température puissent avoir une suite ;

- de définir une politique française et européenne des grandes installations plasma et leur utilisation pour des objectifs de recherche fondamentale et de mieux coordonner les programmes européens dans le domaine des lasers ;

- d'être très attentif aux conséquences, sur la recherche fondamentale et son financement, des changements profonds qui interviennent dans les grands organismes publics (réforme de la DGA et disparition de la DRET, redéploiement du CEA, ...).

Plus généralement :

- En ce qui concerne les politiques régionales de recherche, il est souhaitable d'associer les régions au développement et à l'évolution des recherches et des laboratoires en prenant en compte les besoins socio-économiques tout en veillant à une cohérence nationale scrupuleuse des actions régionales.

- Il est nécessaire d'assurer au CNRS l'identification et la maîtrise des programmes fondamentaux en amont de l'intérêt industriel et des politiques régionales et de promouvoir une coordination des travaux. La collaboration et l'information mutuelle entre EPST et EPIC apparaissent comme tout à fait indispensables.

- Il est souhaitable d'avoir une large réflexion sur l'articulation entre politiques nationale et européenne de recherche. Du point de vue opérationnel et pour une meilleure participation des laboratoires aux actions européennes, cette réflexion doit inclure le problème de la fragilité de la structure laboratoires face à la lourdeur des programmes européens.

Bibliographie

- Gaillard, G. Analyse et schéma de développement des pôles français de compétence en Génie des Procédés. Rapport de mission, 1991.
- Derez, C. Rapport de l'Observatoire Français de Génie des Procédés. 1994.
- Rapport "Génie des Procédés" de l'Union des Industries Chimiques. Novembre 1995.
- Compte-rendu "Proposition pour la recherche en Génie des Procédés" des journées Thématisques MESR-GFGP. Paris, octobre 1994.
- Villermaux, J. Nouvelles orientations pour la recherche en Génie des Procédés. Mars 1996.
- New horizon in chemical engineering. Conférence plénière au 5^e Congrès Mondial de Génie Chimique, San Diego, juillet 1996.