

# 10

---

## MILIEUX FLUIDES ET RÉACTIFS : TRANSPORTS, TRANSFERTS, PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION

*Président de la section*

Joël BERTRAND

*Membres de la section*

Pascal BAUER

Anne BOURDON

Patrick CARRÉ

Cathy CASTELAIN

Virginie DARU

Olivier DAUBE

Hervé DOREAU

Danièle ESCUDIÉ

Alix GICQUEL

Dominique GOBIN

Bernard LABEGORRE

Fabrice LATURELLE

Sylvie LORTHOIS

Leanne PITCHFORD

Olivier RAZAKARISOA

Pierre SAGAUT

Michel SARDIN

Alex TAYLOR

Bernard VEYSSIÈRE

La section a rédigé un document de travail en cinq parties correspondant à ses cinq disciplines majeures. Comme cela est devenu un objectif central du département Sciences et Technologies de l'Information et de l'Ingénierie, la section s'est attachée à dégager des champs prometteurs d'avancées aux inter-sections.

### 1 – MÉCANIQUE DES FLUIDES

#### 1.1 AXES DE DÉVELOPPEMENT

- La mécanique des fluides est une discipline présente au cœur des évolutions technologiques dans la plupart des grands secteurs économiques (transports, énergie, chimie, élaboration des matériaux, bio-médical). Elle joue aussi un rôle central dans le domaine des sciences de l'univers (météorologie, chimie atmosphérique, climatologie, océanographie, etc.). C'est d'ailleurs pour ces raisons qu'au sein du CNRS et du Comité National de la recherche Scientifique, elle est répartie dans deux départe-

tements scientifiques d'une part, dans plusieurs sections d'autre part.

Un certain nombre de sujets restent au cœur de la discipline. C'est le cas notamment de la turbulence, un problème d'importance fondamentale. Cette dernière est désormais étudiée avec des moyens de diagnostic et des outils de simulation multidimensionnels permettant d'accéder à une connaissance très fine de la structure des écoulements et des mécanismes physiques mis en jeu. Les développements de méthodes de simulation des grandes échelles constituent dans ce domaine un enjeu stratégique pour les applications industrielles actuelles et futures.

• Les thèmes majeurs qui se sont dégagés au cours des dernières années sont :

– **l'étude de la transition laminaire-turbulent et de la turbulence développée**, avec l'appui d'outils expérimentaux et de simulation numérique sophistiqués, avec comme thèmes connexes le **contrôle des écoulements** ;

– **la microfluidique** pour les questions fondamentales posées par des écoulements dans des systèmes de taille très réduite et pour les nombreuses applications actuelles dans le domaine ;

– **la biomécanique des fluides**, qui porte aussi bien sur l'étude des fluides pour la physiologie humaine que sur la mise au point de systèmes biomimétiques inspirés de l'observation des êtres vivants ;

– **la dynamique des fluides complexes**, qui vise à décrire et expliquer la dynamique des écoulements des fluides à loi de comportement non-newtonienne (écoulements polyphasiques, polymères, suspensions, milieux granulaires, milieux poreux) ; cet aspect a fait des avancées très significatives dans la dernière période, inventant des modèles de viscosité et d'élasticité les plus pertinents quant aux réalités physiques. À cet égard, des rapprochements avec des équipes évaluées par la section 09 sont souhaitables ;

– **la dynamique des fluides réactifs**, qui introduit le couplage supplémentaire entre l'hydrodynamique et la cinétique chimique ;

au moins trois unités relevant de cette thématique ont produit des connaissances nouvelles (Nancy, Orléans, Lille) ;

– **l'aéroacoustique**, qui étudie la génération des ondes acoustiques par les écoulements, les interactions des écoulements avec les parois et les machines ainsi que leur propagation au sein des écoulements ;

– **la mécanique des fluides numérique**, qui traite de l'élaboration de modèles physiques et de méthodes numériques nécessaires à la simulation des écoulements. Il s'agit là d'une approche qui a explosé dans les quatre dernières années et pas seulement dans nos unités. D'énormes progrès ont été accomplis, tant par la finesse, la rapidité et la fiabilité des modèles. Toutefois, il nous faut relever un léger inconvénient. Cette approche se fait parfois au détriment d'approches expérimentales, ces dernières étant réduites à des recherches de données, des validations ponctuelles ou simplement des mini-démonstrateurs. Le risque serait double : perdre contact avec la réalité physique et ne se cantonner qu'à des approches descriptives et non pas de conception (donc comprendre pour comprendre et non pas comprendre pour créer). Nous nous éloignerions de la ligne scientifique du département ST2I.

## 1.2 MOYENS D'ACTION ET D'ORGANISATION

Ces différentes thématiques connaissent des degrés de développement très divers dans les laboratoires français, ceux-ci étant dans certains domaines en très bonne place au niveau mondial. Les grands points sensibles sur le plan organisationnel sont la relative **dispersion des forces** inhérente à la structure même de l'organisation du CNRS. Certains thèmes sont abordés par un trop grand nombre de laboratoires, alors que d'autres thèmes sont moins bien traités. La définition d'une **politique** dynamique **vis-à-vis des autres organismes de recherche ou établissements faisant de la recherche**

consistant à développer des actions de recherche coopératives avec notamment les leaders sur certains secteurs applicatifs : ONERA, CEA, EDF, IFP, en privilégiant les partenariats entre les laboratoires et les équipes des organismes extérieurs ou le redéploiement vers d'autres secteurs. Enfin, il faut noter la **situation stratégique de la simulation numérique**, qui constitue désormais un moyen incontournable au niveau des applications et de la recherche. Des développements remarquables ont été réalisés dans ce domaine mais il faut cependant constater une faiblesse en terme d'effectifs des équipes impliquées. Cette situation résulte au moins en partie de niveaux de recrutement trop réduits dans cette spécialité. L'autre difficulté importante rencontrée au cours des années récentes est associée au retard pris dans le renouvellement des grands moyens dédiés au calcul intensif et à la difficulté rencontrée par les laboratoires pour financer les développements de moyens de calcul propres mi-lourds nécessaires pour mener à bien des recherches du meilleur niveau international, à l'instar de leur homologues étrangers. Ces moyens devraient être soutenus de façon décisive pour permettre le développement des simulations extrêmes. Il faudrait aussi créer des postes d'Ingénieur de Recherche pour appuyer cet effort et recruter de façon plus significative dans le domaine de la simulation. Enfin, il faut noter les difficultés passées du CNRS dans le domaine du développement et du maintien de plateformes de recherche numériques à vocation généraliste mutualisées à l'échelle nationale. Les plateformes émergentes sont principalement le fruit des efforts d'autres établissements de recherches : ONERA (ElsA), EDF (Saturne, Mercure), CEA (TRIO), IFP/CERFACS (AVBP). Cette situation interdit aujourd'hui la pérennisation et la valorisation de la plupart des travaux conduits dans les laboratoires. Une politique volontariste d'association avec les autres établissements en vue du développement de plateformes de recherche nationales co-développées devrait être engagée.

À moyens constants, la section pourrait suggérer qu'un effort soit fait dans ce domaine, en appuyant moins (du moins pour notre section) la physique des fluides qui elle se can-

tonne à des aspects uniquement descriptifs. Cette phrase est lapidaire, il ne faut pas y voir un jugement de valeur ou une hiérarchie, simplement un rééquilibrage momentané permettant des efforts un peu plus orientés vers le secteur applicatif.

## 2 – GÉNIE DES PROCÉDÉS

### 2.1 AXES DE DÉVELOPPEMENT

La discipline Génie des procédés regroupe l'ensemble des connaissances scientifiques et technologiques nécessaires à l'étude, la conception et l'optimisation des procédés de transformations physico-chimiques et biologiques de la matière et de l'énergie pour l'obtention de produit d'usage, et de traitement des pollutions ou de réduction des risques pour l'homme et pour l'environnement.

Toutes les activités industrielles sont concernées et la discipline recouvre des filières de production multiples. La discipline se situe au cœur du concept de développement durable qui doit concilier le développement de nouveaux produits et procédés pour la satisfaction des besoins actuels de nos sociétés avec la protection de l'environnement, l'utilisation rationnelle de l'énergie, la santé et la sécurité des installations et des produits.

La science du génie des procédés se caractérise par le lien qu'elle établit entre la démarche analytique et la démarche synthétique qui conduit à la **vision systémique** des problèmes. Le génie des procédés est par définition une science qui a vocation à intégrer une approche multi échelle, allant du processus au procédé, sous des contraintes techniques, économiques et environnementales.

Si la thermodynamique et les cinétiques physiques, chimiques et biochimiques restent à la base de la discipline, les développements récents en mécanique des fluides numériques,

en automatique, en méthodes de simulation, en analyse numérique, mais aussi dans la mise au point de microsystèmes fiables ont ouvert de nouvelles voies d'approche de la complexité qui permet d'envisager une meilleure intégration des processus à des échelles multiples. Comme indiqué dans le paragraphe 1.1, dernier item, les progrès en mécanique des fluides numérique ont été spectaculaires et naturellement, le génie des procédés s'en est emparé et a ouvert de nouvelles pistes de recherche, notamment pour l'étude des réacteurs chimiques.

Le domaine de la méso échelle, du micro-métrique et millimétrique, échelle des interfaces et des processus de transfert, reste un domaine privilégié de la discipline. Ainsi la compréhension et la quantification des processus physico-chimique à cette échelle reste l'un des éléments prépondérants dans la conception et l'optimisation des procédés conduisant à l'élaboration de produits ou de matériaux à qualité contrôlée. La simulation moléculaire est de plus en plus utilisée dans la prévision des propriétés thermodynamiques des corps purs et des mélanges et ouvre des portes sur l'optimisation des catalyseurs et des adsorbants. Sur ce point particulier, des approches collectives avec les départements MPPU et Chimie se révéleraient souhaitables.

À l'échelle du procédé, l'introduction des outils numériques de simulation en mécaniques des fluides a ouvert un nouveau champ d'exploration des opérations unitaires du génie chimique. Le lien avec la réaction chimique ou la réaction biochimique en termes de mélange et de micromélange (le terme micromélange est pris ici dans un sens très restrictif puisqu'il suppose obligatoirement une réaction chimique ou biochimique et donc fait intervenir l'échelle moléculaire et non pas seulement micrométrique) reste un fort enjeu dans la maîtrise de la qualité des produits.

Le génie des transferts et des séparations a à résoudre des problèmes complexes, en particulier dans le domaine des biotechnologies et le traitement des effluents. Les enjeux sont énormes dans la purification des biomolécules et la préparation de produits phar-

maceutiques ultra purs à l'échelle semi-industrielle.

Les pistes de recherche sont les suivantes :

– **l'intensification des procédés.** Il s'agit d'une problématique qui a pour but la recherche d'un meilleur contrôle et d'une meilleure maîtrise de la réaction chimique, par une action locale soit par une micro- ou meso- structuration des réacteurs et séparateurs chimiques, soit par l'introduction d'une commande et d'un contrôle local, soit enfin par l'utilisation de matériaux nouveaux nano- ou micro-structurés à propriétés non isomorphes, et de microsystèmes intégrés. Ce domaine monte en puissance parallèlement aux travaux des mécaniciens des fluides sur la microfluidique. Il se traduit souvent par une concentration d'opérations dans un même équipement et une miniaturisation de ces mêmes équipements. Les conceptions qui de ce fait sont nécessaires reposent sur des modélisations beaucoup plus proches de la physique et de la chimie et des simulations numériques plus complexes et enfin des opérations d'optimisation faisant appel à des modèles de mathématiques appliquées performants ;

– **les nouvelles techniques et méthodes de séparations.** Les travaux sur l'architecture des procédés de séparations, le couplage des différentes méthodes, leur intégration au sein même des unités de production, sont à privilégier. Adsorption et séparation sur membranes sont au cœur du développement de techniques originales en séparation et purification des gaz (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, etc.). Ces études sont indifféremment dans le département ST2I et dans le département Chimie ;

– **la compréhension des écoulements polyphasiques dans les réacteurs et séparateurs.** Cela reste un très grand enjeu pour la mise au point d'appareillages optimisés et pour la compréhension des transferts entre phase en situation réelle (mouvement de bulles, coalescence, rupture, etc.). L'utilisation de l'hydrodynamique expérimentale et des méthodes de la mécanique des fluides numériques est en cours d'assimilation et adaptée à ses préoccupations par la discipline ;

– **les phénomènes interfaciaux et transferts aux interfaces.** Le génie des Interfaces et des milieux divisés devient une préoccupation forte pour le développement des cosmétiques et des produits pharmaceutiques ciblés. Les solides divisés qui ont fait une irruption récente dans le génie des procédés restent au cœur d'étude fondamentales sur leur génération (relations propriétés d'usage et procédés), la technologie des poudres et nanopoudres : agglomération, compactage, transport de solides pulvérulents, et ses liens avec la sécurité et la santé. L'insertion par exemple de nanotubes de carbone dans des nouveaux matériaux pourrait conférer à ces derniers des propriétés recherchées. Il demeure toutefois difficile, et en tout cas totalement hors du champ de la section de définir ces propriétés intrinsèques, la section 15 s'occupant de ces thématiques ;

– **la protection de l'environnement.** Le génie des procédés est questionné à la fois sur la mise au point de procédés propres et sûrs, et par le traitement des effluents, déchets, et sols pollués. Il s'agit d'un problème bien trop général pour supporter une approche scientifique rigoureuse et qui donc nécessairement doit être traité de manière pluridisciplinaire (nous ne discuterons pas ici des termes pluridisciplinaires ou interdisciplinaires).

## 2.2 MOYENS D'ACTION ET D'ORGANISATION

Les moyens d'action et d'organisation doivent être les suivants :

– s'appuyer sur les centres généralistes de Génie Chimique et Génie des procédés (Nancy, Toulouse), pour poursuivre la structuration méthodologique de la discipline ;

– développer les centres spécialisés s'appuyant sur une interaction spécifique avec une discipline connexe ou une filière industrielle particulière ;

– organiser le Génie des Procédés en collaboration avec les universités dans les centres où il est déjà bien implanté ;

– profiter des liens avec la chimie et les sciences de la vie, mais aussi avec les domaines touchant à l'élaboration des matériaux (céramiques, polymères, matériaux métalliques), la mécanique et l'énergie ;

– poursuivre les programmes et plateformes autour des grandes problématiques environnementales et autour de l'énergie : capture de CO<sub>2</sub>, production H<sub>2</sub>, Pile à combustible, Utilisation énergétique de la biomasse ;

– mettre en place une démarche de prospective sur les procédés du futur. Orienter les découvertes de chimie/physique vers de nouveaux procédés.

## 3 – PLASMAS FROIDS/LASER

### 3.1 DESCRIPTION DE LA THÉMATIQUE

Les plasmas froids sont des gaz ionisés, obtenus à des pressions de gaz allant du microbar à plusieurs bars, dans lesquels l'énergie électrique peut être couplée de façon continue, impulsionnelle, radiofréquence, microonde, laser etc. Le couplage fort et non-linéaire entre un plasma et les champs électromagnétiques nécessaires à son entretien engendre une riche variété de phénomènes, intéressants d'un point de vue physique, mais également à la base de nombreuses applications technologiques. La thématique « plasma » de la section 10 concerne l'étude des plasmas froids dans le contexte d'une très vaste gamme d'applications. La grande diversité des applications des plasmas froids fait à la fois la force de ce domaine mais peut également en être la faiblesse ; l'unité du domaine réside dans la physique de base mais également dans les méthodes de diagnostics et la simulation, qui progressent de façon spectaculaire.

Depuis les années 70-80 lorsque les technologies de la microélectronique constituaient

le moteur principal des études finalisées, les études sur les plasmas froids liées à des applications industrielles n'ont cessé de se diversifier. On peut regrouper les enjeux technologiques actuels des plasmas froids en quatre axes principaux :

- **matériaux** : gravure en micro-électronique, dépôt de couches dures, traitement de polymères, nitruration et implantation ionique dans les métaux, soudure et découpe en métallurgie, synthèse de poudres, de nanotubes, et de matériaux micro- et nanostructurés, nettoyage des surfaces ;

- **énergie** : synthèse de l'hydrogène, technologies pour ITER, effets de bord dans ITER, dépôt de couches photovoltaïques, lasers à gaz, sources lumineuses à basse consommation, écrans plasmas, dépôt de couches actives pour membranes de piles à combustible ;

- **environnement** : destruction de polluants atmosphériques ou agents bactériologiques, stérilisation, contrôle de la combustion, vitrification des déchets ;

- **transport** : contrôle d'écoulement et de combustion, propulsion par plasma.

L'objet des études dans ces domaines est le plus souvent l'optimisation des plasmas pour ces applications, qui met en jeu des moyens de modélisation/simulation, de diagnostics optiques et de caractérisations fines des matériaux.

### 3.2 LABORATOIRES ET MOYENS HUMAINS

La communauté plasma/laser en France est de taille modérée et répartie sur l'ensemble du territoire français. On peut identifier 18 laboratoires CNRS avec au moins un chercheur « plasma » ou « laser » de la section 10 et 2 laboratoires CNRS avec une composante plasma mais sans chercheur de la section 10. Sur l'ensemble des laboratoires, on compte plus de 70 chercheurs CNRS et au moins autant d'enseignants/chercheurs.

Les laboratoires de taille supérieure à 70-80 personnes, entièrement focalisés sur l'étude et les applications des plasmas, sont localisés à Orsay, Orléans et Toulouse. Des centres ayant des effectifs plus limités mais également focalisés sur ces thématiques sont situés à Limoges, Nancy, Nantes, Palaiseau, Grenoble, Villetaneuse. L'activité dans le domaine des lasers est conduite à Marseille, Arcueil, Limoges, Orléans et Villetaneuse. Les chercheurs plasma/laser font partie de différentes fédérations.

Quatre GDR du CNRS, dont trois en collaboration avec d'autres départements (SC, MPPU) structurent les activités de la communauté sur les objectifs suivants : la propulsion spatiale, les sources de photons, la dépollution associant plasmas et catalyseurs, les piles à combustible.

Le Réseau Plasma a été créé en 2002 avec pour but de favoriser les échanges de savoirs, savoir-faire et moyens au sein de la communauté plasma froids/laser en France.

### 3.3 VALORISATION

Au plan national, il faut souligner le rôle des grands organismes de recherche tels que l'ONERA, le CEA, le CNES ainsi que des centres de recherche de groupes industriels publics ou privés (Schneider, EADS, SNECMA, etc.) dans les recherches à finalité. Les chercheurs sont sollicités par les PME/PMI pour des collaborations, souvent ponctuelles et ciblées. On remarque aussi une forte implication dans des programmes ANR blanches ou thématiques. La communauté plasma froid/laser maintient des liens forts avec la communauté internationale.

### 3.4 FORCES ET FAIBLESSES

Presque la moitié des activités plasma et la plupart des activités laser dans les laboratoires cités ci-dessus sont liées à l'élaboration

ou au traitement des matériaux. On note les procédés utilisant des plasmas non-thermiques, les procédés utilisant des plasmas thermiques, enfin les procédés utilisant les lasers. Bien que certains des procédés concernés soient déjà utilisés dans le monde industriel, la maîtrise de ces procédés à des fins d'optimisation est loin d'être totale, et la conception de nouveaux procédés est un aspect important de la recherche. Les chercheurs appartenant à des disciplines différentes travaillent ensemble à l'interface plasmas/matériaux/génie des procédés et thermique, ce qui donne une certaine dynamique à ce domaine thématique.

Un autre domaine d'activité important en France est le développement des sources de plasmas. Environ un quart des chercheurs travaillent au moins à temps partiel sur cette thématique. On note les activités autour du développement : de sources plasmas homogènes sur des grands volumes pour les applications en microélectronique ou pour le traitement des matériaux, de sources plasmas quelques fois de petites tailles mais de densité d'énergie très élevée, de sources plasmas non-thermiques fonctionnant à la pression atmosphérique, de sources impulsives pour mieux contrôler la chimie des plasmas ou pour générer des photons énergétiques, par exemple ou encore les sources de plasmas magnétisés pour la propulsion plasma ou traitement des matériaux.

Dans de nombreuses applications (destruction de polluants atmosphériques ou agents bactériologiques, stérilisation, contrôle de combustion par plasma), les plasmas ont pour but de générer des chimies réactives. L'enjeu est de maîtriser la chimie, souvent très complexe, et de créer les radicaux à coût énergétique réduit. Cette thématique implique une dizaine de chercheurs et autant d'enseignants chercheurs.

Pour tous les objectifs cités ci-dessus, la nécessité de disposer de diagnostics nouveaux adaptés et de méthodes de simulation et de modélisation numérique correspondantes est évidente. Il faut cependant souligner l'énorme besoin en données de base, qui constitue trop

souvent le facteur limitant des modèles, notamment obtenues dans des conditions extrêmes.

Les sujets en émergence sont nombreux :

- **côté laser** : création de nano-agrégats ou nanoclusters fonctionnalisés, remplacement des procédés de photolithographie par gravure laser directe, inscription et nano-usinage 3D, micro et nano-structuration de surface, ultraproté, etc. ;

- **côté plasma** : les thèmes en émergence se situent souvent aux interfaces avec d'autres domaines scientifiques (biologie, médecine, chimie, génie des procédés, science des matériaux, mécanique des fluides, électronique, etc.) : contrôle d'écoulement par plasmas, écoulements réactifs et contrôle de combustion ; stérilisation par plasma, dépôt de couches à grand gap pour des applications en électronique.

Finalement, il faut mentionner l'impact anticipé du projet ITER sur le domaine de plasmas froids, avec le recrutement de deux chercheurs en 4 ans, et au moins autant d'enseignants chercheurs. Dans la perspective du projet ITER, la création d'une structure fédérative des laboratoires CNRS a été décidée. Dans un premier temps, la fédération rassemblera les activités dépendant essentiellement de la section 4 pour les thématiques de physique des plasmas chauds. La fédération s'élargira au fur et à mesure que d'autres laboratoires s'engageront dans la Recherche et Développement associée à des thématiques technologiques impliquant les laboratoires plasmas de la section 10.

### 3.5 PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

La communauté des plasmas froids française est caractérisée par une longue tradition d'études fondamentales mais aussi par des acquis technologiques réels et son implication dans une large gamme d'applications industrielles. Toutefois, cette communauté est de

taille modérée, répartie sur l'ensemble du territoire français et souvent sollicitée pour travailler sur des applications très variées. L'existence même de cette communauté ne pourra être assurée que si le CNRS réussit à :

- reconnaître la spécificité de la communauté plasmas froids qui est souvent à l'interface avec d'autres disciplines et éviter sa fragilisation par des actions trop fortement guidées par les applications ;

- éviter de couper la communauté en morceaux au niveau du département ST2I sur le prétexte que les gros laboratoires doivent être supervisés par un seul DSA. La découpe actuelle risque de fragiliser et de fragmenter encore la communauté ;

- continuer à fédérer la communauté « plasmas » dans l'esprit du réseau national « plasmas froids » mis en place en 2002, ainsi que dans la structuration de la communauté en continuant une politique renforcée de GDR ;

- mutualiser les équipements pouvant l'être ;

- réfléchir aux moyens à mettre en œuvre pour développer les synergies notamment entre les sections 8 et 10 et également entre les sections 4 et 10.

## 4 – COMBUSTION

### 4.1 AXES DE DÉVELOPPEMENT

Dans le domaine de la combustion, les analyses et propositions contenues dans le Rapport de conjoncture et de prospective du CNRS de 2004, et décrits dans les chapitres « Sciences pour l'ingénieur » et « Section 10 – Énergie, Mécanique des milieux fluides et réactifs, Génie des procédés » du tome I, restent, pour l'essentiel, valables et d'une grande actualité.

La modélisation des phénomènes de combustion doit prendre en compte des méca-

nismes complexes régis par les interactions entre la mécanique des fluides, la thermodynamique, les phénomènes de transport et la cinétique chimique. Une des principales difficultés de la combustion est associée à la variation fortement non linéaire des vitesses de réaction en fonction de la température. Les problèmes sont de ce fait « raides » et cela donne des configurations comportant une grande variété d'échelles spatiales et temporelles. De plus, les phénomènes doivent être envisagés en configuration géométrique tridimensionnelle, en conditions instationnaires et, dans beaucoup de cas dans des milieux hétérogènes ou en présence de plusieurs phases. Une telle complexité nécessite de mener de pair des études sur des problèmes très fondamentaux dans des configurations simples et d'autres plus appliquées sur des systèmes plus proches de la réalité industrielle. Les domaines d'application concernent les moteurs automobiles, les foyers aéronautiques, les chambres de combustion des lanceurs spatiaux ; les systèmes de production d'énergie, tels que foyers industriels et turbines ; les explosions (accidents industriels ou applications militaires) et la sécurité (conception de procédés chimiques) ; les incendies et feux (en milieu industriel ou forestier) ; la production, l'élimination et la dispersion de polluants.

Ces enjeux nécessitent le développement en parallèle, d'expérimentations, de modélisations et de simulations numériques. Les expériences de laboratoire nécessitent la mise au point de diagnostics performants permettant d'effectuer des mesures non intrusives, ponctuelles ou multidimensionnelles et en temps réel. Les simulations numériques de plus en plus complètes permettent de représenter des systèmes de complexité croissante en profitant des possibilités nouvelles offertes par les méthodes numériques et par l'augmentation des puissances de calcul.

Les thèmes à développer concernent la modélisation de la dynamique de la combustion ; les instabilités, les couplages et les régimes transitoires (allumage, extinction) ; le contrôle de la combustion ; les systèmes d'injection diphasiques ; les systèmes de combus-



tion avancée ; les nouveaux carburants (utilisation de l'hydrogène et de la biomasse) ; la mise au point de schémas cinétiques pour des espèces de plus en plus complexes, les effets mécaniques et acoustiques générés par les flammes ; le traitement des déchets, etc.

Il semblerait pertinent d'accorder une plus grande attention au développement de travaux dans le domaine de la combustion pour les actions interdisciplinaires du ch. 5 du tome II « Environnement, risques, sécurité ». On peut évoquer notamment le problème central pour l'environnement des rejets de CO<sub>2</sub> et autres gaz à effets de serre ainsi que celui de l'ensemble des polluants dus à la combustion. Beaucoup de concepts technologiques sont actuellement envisagés pour permettre la séquestration du CO<sub>2</sub> dès sa production dans les centrales fossiles. Ces concepts posent des questions fondamentales qui pourraient être prises en charge par les laboratoires.

Un autre thème majeur avec des besoins sociétaux significatifs est celui de la sécurité des installations industrielles contre les accidents de type explosions ou incendies.

## **4.2 MOYENS D' ACTIONS ET D' ORGANISATION**

La communauté française en combustion est de taille modeste, mais bien identifiée, et sa reconnaissance internationale fortement établie dans plusieurs domaines, avec des équipes réputées en raison de leurs contributions aux progrès récents dans le domaine. Les interactions avec les autres organismes de recherche tant français qu'européens, ainsi qu'avec les grandes entreprises industrielles sont nombreuses. À cet égard, les quelques unités de recherche dans lesquelles le CNRS a un poids important (UPR ou UMR) jouent un rôle décisif qu'il convient absolument de préserver et de développer. Le CNRS a dans le domaine de la combustion une responsabilité stratégique particulièrement importante.

Le renforcement significatif de la communauté en moyens humains est probablement l'objectif prioritaire. Il est motivé par trois raisons principales : permettre à la communauté française en combustion d'assumer sa place dans la communauté internationale, car le nombre de ses chercheurs est déséquilibré par rapport à sa reconnaissance et ses potentialités ; faire face aux demandes croissantes de l'industrie dont la résolution des problèmes pratiques nécessite d'importantes recherches fondamentales en amont ; traiter suffisamment à l'avance le problème du renouvellement des cadres, car la pyramide des âges laisse présager des situations difficiles qui, dans le cadre d'une communauté à effectifs réduits, peuvent conduire à l'arrêt de thématiques d'importance si ces situations n'étaient pas traitées à temps. En conséquence, le CNRS doit privilégier une politique de recrutement de chercheurs et d'ingénieurs permanents.

Par ailleurs, une politique soutenue de dotation des laboratoires en matière de fonctionnement et d'investissements doit être mise en œuvre. Les actions permettant la fédération et la structuration de la communauté en combustion, en liaison avec les partenaires industriels et institutionnels doivent être poursuivies. C'est réellement pour cette communauté à effectifs réduits que des instruments tels que GDR ou autres doivent être mis en œuvre.

# **5 – TRANSFERTS THERMIQUES**

## **5.1 AXES DE DÉVELOPPEMENT**

La thermique – ou plus généralement la science des transferts de chaleur et de masse – intervient dans la plupart des procédés industriels et des phénomènes naturels, au travers des processus de conversion de l'énergie. En tant que discipline scientifique, elle s'intéresse à la compréhension et à la description des

mécanismes de base liés au transfert d'énergie. Elle intervient très souvent associée à d'autres champs de compétence (mécanique des fluides, combustion, procédés, voire sciences de la terre, biologie, médecine ou science des matériaux) et de ce point de vue, peut se définir comme la science des couplages, entre différents modes de transferts, entre différentes échelles spatiales et temporelles.

La communauté est bien structurée et une réflexion de longue haleine sur les enjeux et les perspectives dans ce domaine a abouti à la rédaction d'un document, toujours susceptible d'évoluer, mais qui décrit en détail les grands axes de la discipline (« Livre Blanc » : [http://www.sft.asso.fr/DOCUMENTS/journees\\_SFT/livre\\_blanc/livre\\_blanc\\_V3-12avril05-Final.pdf](http://www.sft.asso.fr/DOCUMENTS/journees_SFT/livre_blanc/livre_blanc_V3-12avril05-Final.pdf)).

Pour dégager les grandes lignes de recherche actuelle, au-delà de la diversité des domaines d'applications, on peut identifier plusieurs axes :

– **les transferts couplés.** L'importance croissante des procédés à haute température impose de plus en plus de prendre en compte le couplage avec le rayonnement, y compris dans des milieux fluides non transparents. Ceci conduit aussi bien à développer de nouveaux types de modèles qu'à caractériser de façon prédictive les propriétés radiatives de milieux de plus en plus complexes ;

– **les transferts dans les milieux complexes.** Un grand nombre de situations pratiques où se posent des problèmes de transferts concernent des milieux complexes : milieux poreux, divisés, granulaires, etc. Du point de vue de la modélisation cela conduit à développer des méthodes de changement d'échelle élaborées permettant de conserver des informations sur la physique fine lors du passage à un niveau plus macroscopique. Du point de vue expérimental, il faut développer le recours à des méthodes globales et non intrusives ;

– **les transferts à échelles multiples.** Au-delà des approches de « scaling-up » consistant à fournir une description macroscopique d'un milieu continu équivalent, une nouvelle approche de modélisation se développe qui fait intervenir des aller-retour entre des descrip-

tions des transferts à différentes échelles. Cette approche micro-macro permet de prendre en compte selon les étapes de phénomènes physiques différents et fait appel à des descriptions appropriées à chacune des échelles spatiales ou temporelles concernées ;

– **les transferts à micro- et nano-échelle.** En parallèle aux développements de la micro-fluidique s'ouvre tout un domaine impliquant les transferts à petite échelle : micro-mélange, micro-caloducs, micro-échangeurs de chaleur, impliquant en particulier de revisiter les transferts avec changement de phase dans un contexte où les phénomènes surfaciques peuvent dominer les phénomènes volumiques. À l'échelle nanométrique, de nouveaux concepts sont à développer pour être en mesure de modéliser les transferts dans des systèmes dont la taille caractéristique rend inopérants les modèles de milieu continu. Le développement d'études à l'interface avec la physique de la matière condensée ouvre de nouvelles perspectives à l'approche des phénomènes de transfert.

Dans l'ensemble de ces nouveaux développements se pose à la fois le problème de la mise en œuvre de modèles – et donc d'outils de simulation – de plus en plus prédictifs, et de méthodes d'observation de plus en plus fines. Derrière ces travaux en effet se profilent les enjeux du contrôle des procédés thermiques qui impose d'accéder à des sorties mesurables du système comme entrée des boucles de rétro-action.

## 5.2 MOYENS D'ACTION ET D'ORGANISATION

Les laboratoires de la section dans le domaine des Transferts sont fortement organisés et ont développé depuis quelques années une structure collaborative, soit en réseaux (en particulier le réseau AmETH, ou le METTI sur le développement des techniques inverses), soit sous forme de GdR (Micro et Nanothermique

entre autres), ou à travers des programmes interdisciplinaires (Énergie et Matériaux).

Cette structuration interne, qui permet de cultiver des relations fortes entre laboratoires du domaine, s'accompagne désormais d'une ouverture qu'il convient d'encourager vers d'autres disciplines (physique pour les transferts aux petites échelles, science des matériaux, biologie).

La collaboration avec les acteurs industriels ou institutionnels est avérée par une activité contractuelle traditionnellement importante dans nos laboratoires. Comme il a été dit, les champs d'application de la maîtrise des transferts sont de plus en plus larges. L'attention portée aux problématiques de développement durable dans le domaine de la production, du stockage et du transport de l'énergie impose des contraintes croissantes sur les systèmes mis en jeu, aussi bien en termes de performance, de coût que de

sûreté. La demande est croissante dans les applications au domaine médical et les possibilités d'intervention de plus en plus localisées (biocryogénie, traitement anti-cancéreux) donnent de nouvelles perspectives à l'étude des phénomènes de transport dans des milieux présentant de nouvelles complexités.

Un domaine où il semble que la communauté française de la discipline pourrait avoir un rôle moteur est celui des collaborations internationales, en particulier au niveau européen.

S'il existe une possibilité à travers le Comité Eurotherm d'organiser des séminaires thématiques ciblés et un congrès quadriennal, les structures collaboratives et les réseaux européens sont encore peu nombreux. Des programmes de recherche de base au niveau européen sont à promouvoir pour permettre de développer à une échelle pertinente les méthodes et les outils du futur.

