

10

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

Yvan SEGUI

Président

Denis Ablitzer

Joël Bertrand

Jacques Bousquet

Pascal Brault

Cathy Castelain

Georges Charnay

Hervé Doreau

Pascal Floquet

Khaled Hassouni

Patrick Huerre

Michel Lance

Roger Martin

Jérôme Perrin

Alain Pocheau

Vincent Pugliesi

Olivier Razakarisoa

Jean-François Sacadura

Michel Sardin

Jean-Charles Sautet

Stéphane Zaleski

La section 10 du comité national de la recherche scientifique est, par essence, une section pluridisciplinaire qui couvre un large champ scientifique allant de l'étude fondamentale du comportement mécanique des fluides jusqu'aux procédés de transformations de la matière et prenant en compte les transferts d'énergie que ce soit l'énergie thermique ou l'énergie électrique comme dans l'étude des plasmas froids.

Elle représente une communauté scientifique au cœur de nombreux développements industriels, notamment l'aéronautique et l'espace mais aussi les industries de transformation et agroalimentaires, et est pleinement concernée par quelques uns des grands problèmes sociétaux liés à la maîtrise de l'énergie tant dans sa production que dans son utilisation, le traitements des sources de nuisances via le développement des procédés propres et le traitement des effluents.

Une démarche scientifique largement répandue dans cette communauté consiste à traduire en termes scientifiques une problématique liée à des objets industriels, à trouver les solutions de ce problème scientifique et enfin de traduire en sens inverse pour exprimer ces solutions en termes industriels.

La section 10 est pleinement concernée aussi bien par des travaux expérimentaux que

par des travaux théoriques ou de modélisation et simulation numérique.

Ses principales thématiques sont au nombre de cinq : Combustion, Génie des Procédés, Mécanique des fluides, Plasmas froids, Thermique. Il est évident que les thèmes de recherche font intervenir, dans la quasi-totalité des cas, plusieurs de ces champs thématiques.

1 – COMBUSTION

1.1 ÉTATS DES LIEUX

Description générale de la thématique

La combustion reste au cœur des systèmes de production d'énergie à partir de tous les combustibles, qu'ils soient d'origine fossile, biomasse ou qu'il s'agisse du vecteur hydrogène.

La thématique combustion s'appuie à l'origine sur deux communautés : celle de la cinétique chimique et celle de la mécanique des fluides. La synergie entre ces deux communautés a donné naissance à la communauté combustion. L'École Française de Combustion est bien identifiée et bien positionnée au niveau international.

Typiquement SPI, le domaine de la combustion s'identifie à partir de ses champs d'application qui sont :

- les moteurs dans les domaines de l'automobile, de l'aéronautique et du spatial ;
- les foyers industriels, turbines ;
- la combustion des déchets et de la biomasse ;
- les feux et incendies ;
- les explosions et la sécurité ;

– la production, l'élimination et la dispersion des polluants.

Les études en combustion ont pour objectif général : l'augmentation de l'efficacité énergétique, la limitation de la consommation de carburants (limitation des rejets de CO₂), la diminution des rejets de polluants gazeux et particulaires.

Elles supposent le développement en parallèle d'expériences de laboratoire pour les études des phénomènes en situations simplifiées, de diagnostics pour acquérir des données et augmenter la compréhension physique des phénomènes et de modélisations et simulations pour la prévision des dispositifs appliqués.

Les grands thèmes de la combustion concernent les phénomènes avant (Pulvérisation/Atomisation/Vaporisation/Préparation du mélange), pendant (combustion partiellement prémélangée, combustion stratifiée et combustion en régime pauvre, Cinétique chimique et réduction de schémas) et après (élimination des polluants).

La simulation numérique occupe une position privilégiée dans les préoccupations des combustionnistes car les conceptions des nouveaux moteurs ou foyers par les industriels passent nécessairement d'abord par cette phase afin de réduire les essais réels très coûteux.

Laboratoires, moyens humains

- Une douzaine de laboratoires sont concernés par le thème combustion. Pour 6 d'entre eux, cela représente l'activité majoritaire.

Les laboratoires sont majoritairement implantés en province (Centre, Haute Normandie, Nord Pas de Calais, Poitou Charente, Alsace, Provence, Midi Pyrénées), un est en région parisienne. 10 sont des UMR et 2 sont des UPR.

Cette forte implantation régionale a une conséquence très positive au niveau du financement des équipements des laboratoires par les collectivités.

• De nombreuses actions en cours fédèrent la communauté combustion :

- GDR Combustion industrielle ;
- programme R&T Supersonique ;
- programme R&T Instabilités H.F dans les moteurs fusées ;
- 4 A.R.C Combustion dans les moteurs à pistons (cinétique chimique, mélange et aérodynamique, combustion stratifiée, diphasique) ;
- programme I.N.C.A avec l'ONERA (évolution du GDR Moteurs fusées).

Du point de vue du personnel attaché à ce thème, 55 chercheurs CNRS sont concernés directement ainsi que qu'une centaine d'enseignants chercheurs. 120 étudiants sont actuellement en thèse.

Valorisation

Les collaborations industrielles sont nombreuses, en général avec des grands groupes :

- automobile : PSA, Renault, équipementiers, IFP, Total Fina Elf ;
- aéronautique : SNECMA, EADS ;
- spatial : CNES, ONERA, SNECMA, DLR, ASTRIUM (ex DASA) ;
- foyers : Air liquide, EDF, GDF, St Gobain ;
- chimie de la combustion : IFP.

Cela a conduit à la mise en place de plusieurs cellules de transfert ou de plateformes (par exemple la plate-forme moteurs CERTAM à Rouen).

Le regroupement des laboratoires, en train de se constituer, (par exemple PNIR « Carburants et moteurs ») favorisera les relations avec les industriels et les transferts.

1.2 FORCES, FAIBLESSES, SUJETS À DÉVELOPPER

Forces et faiblesses

Au niveau des forces, il faut souligner la bonne structuration de la communauté ainsi que sa reconnaissance au niveau international. Les laboratoires sont aussi très présents dans les contrats européens. La simulation numérique est particulièrement bien positionnée, elle bénéficie de la présence des Centres Nationaux de calcul. Les diagnostics par laser ont fait l'objet de gros investissements dans les régions et les savoir-faire des laboratoires dans ce domaine sont assez remarquables.

Pour ce qui concerne les faiblesses on peut noter une communication encore difficile entre les expérimentateurs et les modélisateurs ainsi qu'une synergie à renforcer entre les cinétiens (plus chimistes) et les spécialistes de la combustion turbulente (plus mécaniciens des fluides).

Des liens avec d'autres communautés connexes sont probablement possibles pour tirer parti des compétences mutuelles. On peut citer Chimie atmosphérique/Environnement (liens SPI/SDU), Génie des procédés (réacteurs chimiques), contrôle (STIC).

Thèmes à développer

Les grands thèmes suivants font partie des préoccupations de la communauté. Il serait souhaitable de les développer :

- **diphasique** : pulvérisation – atomisation – vaporisation pour la combustion diphasique ;
- **combustion instationnaire ou en régime transitoire** : problèmes d'allumage, de stabilisation et de contrôle de flamme ;
- **contrôle de flamme avec une approche « systèmes »** en relation avec le département STIC ;

– **systèmes de combustion avancée** : haute pression, haute température, combustion à richesse variable, combustion à charge stratifiée, cinétique chimique pour les hautes pressions et hautes températures, allumage par compression (H.C.C.I), combustion catalytique ;

– **schémas cinétiques** : pour de nouveaux carburants (exemple les carburants issus de la biomasse), à développer en vue de la réduction des émissions de polluants gazeux ou particuliers ;

– **combustion des déchets et traitement des effluents** : à développer en relation avec les plasmas ;

– **sécurité** : interaction combustion/ rayonnement pour les incendies et les explosions.

Pour tous ces domaines, il apparaît un fort besoin de codes de calculs qui intègrent les différents aspects (turbulence, réactif, diphasique, instationnaire, compressible, etc.) et un renforcement des collaborations entre expérimentateurs et modélisateurs.

1.3 AUTRES PROBLÈMES RESTANT PRÉOCCUPANTS

Il serait important que le CRNS ait une action structurante sur les points suivants :

– mise en place de GDR Européens (pour alléger les procédures PCRD) ;

– généralisation des Accords Cadres pour faciliter le passage de contrats ;

– clarifier la limite d'intervention des laboratoires vis-à-vis de la recherche industrielle et vis-à-vis de la valorisation de la recherche sur contrats industriels.

2 – GÉNIE DES PROCÉDÉS

2.1 ÉTATS DES LIEUX

Description générale de la thématique

Le génie des procédés regroupe l'ensemble des connaissances scientifiques et technologiques nécessaires à la transformation de la matière et de l'énergie en produits de consommation. Toutes les activités industrielles sont concernées. Objectif : produire mieux, plus vite, moins cher, plus propre. Le génie des procédés est pluriculturel.

Il a aspiré ses fondements scientifiques de la thermodynamique et de la cinétique chimique. Peu à peu, il a absorbé des connaissances issues de la mécanique des fluides, de l'analyse numérique, des sciences liées au contrôle et à la commande, de la description physico-chimique des phénomènes, et même pour la dernière période de la productique. Ainsi se développe un corpus original.

La communauté scientifique française s'est développée autour des deux grands centres historiques que sont le LSGC à Nancy et le LGC à Toulouse. Ces deux laboratoires sont « généralistes » dans cette discipline. Les autres unités de recherche, plus récentes, se concentrent sur certains aspects du génie des procédés ou sont liées à d'autres disciplines scientifiques, permettant ainsi de combler les frontières entre disciplines.

Le terme « génie des procédés » est apparu en France en 1980, lorsque la communauté scientifique a observé que les méthodes « génie chimique » s'appliquaient à d'autres industries que l'industrie chimique.

Laboratoires, moyens humains

19 laboratoires sont dédiés aux recherches en génie des procédés. Leur lien majeur est la Société Française de Génie des Procédés créée en 1987.

Du point de vue du personnel attaché à ce thème, on compte 80 chercheurs CNRS environ qui relèvent principalement de la section 10, secondairement de la 19 ou de la 22. 450 enseignants chercheurs sont impliqués : ils relèvent principalement de la section 62 du CNU. Ce nombre peut paraître important, mais il faut souligner l'actuel besoin en enseignement dans les Écoles d'Ingénieurs, les Universités, les IUT. Malheureusement tous ces enseignants-chercheurs ne sont pas publiants. Il y a actuellement 430 doctorants dans les laboratoires correspondants, dont plus de 100 sont liés au monde des entreprises par des conventions CIFRE ou des BDI cofinancés. Environ 45 ITA accompagnent la recherche dans ces laboratoires. Le nombre d'IATOS est équivalent, mais ces derniers sont souvent assujettis à d'autres tâches (assistance à l'enseignement, services généraux) sans que les laboratoires de recherche aient le pilotage complet de leurs activités. Du point de vue de la répartition géographique, cinq zones regroupent l'essentiel des forces : Toulouse-Albi-Pau, Nancy, Lyon-Grenoble, Paris-Compiègne, Saint-Nazaire.

Dans certains cas, l'activité génie des procédés est revendiquée, mais elle est secondaire, n'étant qu'un outil (Limoges, Marseille)

Valorisation

L'activité de valorisation a toujours été l'une des préoccupations majeures des laboratoires concernés. Environ une dizaine de brevets est issue chaque année de ces laboratoires, les industriels partenaires étant les détenteurs de ces brevets. Par construction même, le génie des procédés est très lié au mondes des entreprises et les laboratoires ont cherché les outils les plus performants, centres techniques spécialisés, CRITT adossés au laboratoires, entreprises créés par des ex-doctorants (la loi sur l'innovation a permis la création de trois entreprises encore vivantes). Cette valorisation a aussi pris des formes d'enseignements techniques spécialisés.

2.2 FORCES, FAIBLESSES, SUJETS FORTEMENT ACTIFS ET OUVERTS, SUJETS EN ÉMERGENCE

Le champ disciplinaire pourrait être divisé en trois parties :

Réaction, mélange, séparation

Ce thème est très actif et se développe vers certaines frontières du génie des procédés :

– hydrodynamique expérimentale et mécanique des fluides numérique :

Un besoin capital en méthodes inverses est ressenti. Un besoin également de transfert de la MFN vers les applications du génie des procédés. La communauté française en génie des procédés est encore trop utilisatrice de codes de calculs non complètement maîtrisés. Les méthodes expérimentales sont fortement développées et performantes ;

– **micromélange physique** : La communauté s'ouvre à des approches micro fluidique et micro systèmes fluidiques. Un grand espoir de renouveau du génie chimique est né de ces nouvelles approches qui traiteront de problèmes liés à la sécurité des procédés, à la non-pollution.

– **modèles cinétiques** : Le génie des procédés a besoin de modèles cinétiques toujours renouvelés, dans des conditions géométriques changeantes. Il faut dans ce cas particulier associer encore davantage la chimie à la conception du procédé ;

– **séparations** : L'étude des séparations (classiques comme la distillation où il n'existe plus de recherche en France ou moins classiques comme les séparations membranaires en plein essor) continuera à se développer. Des méthodes de choix des techniques séparatives doivent être disséminées dans l'ensemble de la communauté scientifique.

Matériaux et systèmes dispersés

Si le thème précédent traite principalement d'un équipement ou d'un micro équipement, celui-ci traite des phénomènes locaux à l'intérieur des équipements. On vise ici une conception d'équipement avec performance. Cette approche locale peut étudier des matériaux traditionnels (papier, polymères, céramiques, émulsions, mousses) ou des nouveaux systèmes (par exemple dépôts de couches pour l'électronique et l'optique, émulsions foisonnées).

Toutefois, bien que toutes les recherches menées ici soient de qualité et publiées dans les meilleures revues de génie des procédés, il faut passer à l'étape de conception. Là est le nœud d'une approche multiéchelle, condition nécessaire à un développement de qualité de la science génie des procédés, qui sera encore illustré dans le paragraphe suivant. Non seulement, des études fondamentales à plusieurs échelles (molécules, bulles, gouttes ou particules d'une part, équipements d'autre part, ensemble du procédé enfin) sont nécessaires, mais les intersections entre ces études doivent être maîtrisées.

Systémique

Ce thème pourrait regrouper l'observation du procédé, sa modélisation, la simulation, la modification ou la création d'un nouveau procédé, la commande et la supervision, les impacts de sécurité et d'environnement, la prise en compte du développement durable.

Des outils performants existent déjà, mais l'amalgame n'est pas fait entre les codes de calcul concernés ici et les méthodes expérimentales ou numériques utilisées ci-dessus. Il n'existe pas assez d'intersections entre l'activité Systémique et les activités précédentes, les recherches correspondantes étant ainsi appauvries.

2.3 RECOMMANDATIONS

La communauté a probablement une taille d'équilibre, la rendant performante et visible au niveau Européen. Il n'apparaît plus nécessaire de créer des UMR généralistes. Par contre, des UMR qui iraient vers des rapprochements avec d'autres départements scientifiques seraient bienvenues. La politique programmatique du CNRS, Programme Microfluidique, Programme Énergie, a largement contribué à la cohésion de cette communauté scientifique : elle doit continuer.

3 – MÉCANIQUE DES FLUIDES

- Au cours des 20 ou 30 dernières années, un des enjeux majeurs de la recherche fondamentale en mécanique des fluides a été l'étude de la **transition laminaire-turbulent** et de la **turbulence**. Pour les mécaniciens, ces recherches ont été de tout temps encouragées par le secteur industriel, la majorité des écoulements intervenant dans les applications étant de facto turbulents. Pour les physiciens du macroscopique, les écoulements en transition ou pleinement turbulents ont constitué un terrain de prédilection particulièrement bien adapté pour évaluer la pertinence des concepts issus de la théorie des systèmes dynamiques, de la dynamique des textures spatio-temporelles, et plus généralement du corpus de connaissances habituellement regroupé de façon très approximative sous le nom de **théorie(s) du chaos**. Des progrès considérables ont été réalisés dans la compréhension de la turbulence dite « faible » accessible à une formulation déterministe. En revanche, les écoulements pleinement turbulents (turbulence « de boîte » à la physicienne, ou turbulence dans les écoulements cisailés à la mécanicienne) présentent un défi majeur et ils demeurent à ce jour mal compris.

Il est donc probable que l'étude de la turbulence « dure » fera l'objet dans les prochaines années de recherches très actives, nécessitant la découverte de nouveaux concepts s'appuyant sur des outils d'investigation et de modélisation de plus en plus sophistiqués (**PIV, simulation numérique directe, simulation des grandes échelles**).

Se greffent sur cette problématique, les efforts récemment déployés pour concevoir des méthodes de **contrôle actif** ou **passif** des écoulements en transition ou pleinement turbulents. Ce domaine connaît actuellement un essor considérable aux États-Unis où il est stimulé par un soutien financier important de la part des agences gouvernementales américaines. Il s'agit essentiellement d'appliquer ou d'adapter à la mécanique des fluides les stratégies et les théories élaborées par les mathématiciens appliqués (contrôle optimal, contrôle robuste, méthodes adjointes, formulations variationnelles, etc.). Les apports de mathématiciens appliqués français à la théorie du contrôle ont été considérables, mais il semble que peu de mécaniciens aient relevé le défi d'appliquer ce formalisme théorique au contrôle en boucle fermée des écoulements turbulents, sans mettre de côté pour autant toute l'expérience acquise dans la compréhension physique des phénomènes. Une immersion dans les théories dites modernes du contrôle paraît nécessaire pour que le dynamicien des fluides bénéficie pleinement des apports de cette discipline. Le GDR de Mécanique des Fluides Active a joué un rôle très positif pour sensibiliser la communauté des chercheurs.

Ces 10 dernières années ont vu l'émergence, principalement aux États-Unis d'un nouveau champ disciplinaire : celui des **MEMS** (Micro-Electro-Mechanical Systems) ou **systèmes microfluidiques**. Ces dispositifs dont l'échelle caractéristique est de l'ordre de quelques microns, sont réalisés en ayant recours aux mêmes techniques de lithographie que dans la fabrication des circuits intégrés. Leur utilisation est actuellement envisagée pour de nombreuses applications en génie mécanique (micro-moteurs, micro-pompes, etc.), en aérodynamique (contrôle actif de la transition,

de la turbulence, du décollement, aile « intelligente », etc) et en biologie (« lab on a chip »). La microdynamique de ces écoulements met en jeu des forces de surface importantes, à la limite du milieu continu et pour des nombres de Reynolds très faibles. De nombreuses études expérimentales ont déjà été effectuées, principalement par « trial and error », pour concevoir des dispositifs très divers. Peu d'études fondamentales ont été menées jusqu'à présent sur la dynamique très particulière de ces écoulements. Les efforts à l'échelle nationale semblent se faire en ordre dispersé et ne pas impliquer de façon majeure les mécaniciens, notamment des fluides. Par contre, aux USA, la communauté s'est fortement engagée sur cette nouvelle thématique, comme d'habitude sous l'incitation des grands organismes (DARPA, AFOSR, ONR, etc.). Le projet « Microfluidique » soutenu par le département SPI constitue à cet égard une initiative importante.

- La **biomécanique des fluides** est un autre secteur où les contributions des chercheurs français semblent être trop dispersées en regard de celles d'autres pays. Là encore, les recherches sont en plein essor aux États-Unis, comme le démontre la multiplication des sessions consacrées à cette thématique au congrès annuel de la Division of Fluid Dynamics de l'American Physical Society. Elles ont trait aussi bien aux systèmes biologiques de l'homme (systèmes cardio-vasculaire, respiratoire, micro-vasculaire, lymphatique, digestif, oculaire, auditif, etc.) qu'à la mécanique du vol des oiseaux, aux modes de locomotion des reptiles, des poissons, etc. avec des applications potentielles civiles, etc. aussi bien que militaires. Ces recherches se situent souvent à l'interface entre la mécanique des fluides, la mécanique des solides et l'interaction fluide structure. Des simulations numériques de plus en plus « réalistes » sont en cours de développement qui permettent de reproduire toute la complexité de ces systèmes. (Simulation des mouvements du cœur et de sa dynamique interne par exemple). Pour être pertinentes, il semble que ces recherches doivent être menées en étroite collaboration avec le milieu biomédical, sans éluder les aspects biologiques et physiologiques.

• Les thèmes précédents entrent tous dans un cadre relativement classique dans la mesure où des fluides usuels sont impliqués. L'étude de la **dynamique des fluides complexes** a également connu un développement spectaculaire et il est souhaitable que cette diversification se poursuive d'autant plus que des progrès importants ont été réalisés. Par « fluide complexe », on entend habituellement un milieu fluide ou des milieux fluides dotés d'une loi de comportement non-newtonienne comme dans le cas des écoulements polyphasiques, des polymères, des suspensions, des milieux granulaires, des milieux poreux, des lits fluidisés, etc. Ces milieux, qui sont souvent décrits à l'échelle macroscopiques comme des milieux continus équivalents, présentent des hétérogénéités à une échelle micro ou mésoscopique, et représentent un champ d'application privilégié pour les approches multiéchelles. La dynamique d'inclusions (bulles, gouttes, particules, etc.), la dynamique des interfaces fluides-fluides (ondes, déferlement, pulvérisation de jets et de nappes liquides, etc.), les interactions entre inclusions (clustering), les phénomènes de coalescence et de fragmentation d'interfaces, à une échelle dite « microscopique », les instabilités propres aux milieux diphasiques (convection intrinsèque, turbulence, etc.) à l'échelle « macroscopique », sont autant de phénomènes encore mal connus. Ce vaste domaine, à la frontière de la mécanique des fluides et du génie des procédés, se situe de ce fait pleinement dans le champ disciplinaire couvert par la section 10. Les débouchés industriels sont considérables (génie chimique, mécanique, industries agroalimentaires, pharmacie, etc) et les aspects fondamentaux constituent un véritable défi. La communauté française se montre très active dans ce domaine.

• La compréhension de la **dynamique des fluides réactifs** introduit un élément de complexité supplémentaire : celui de l'interaction entre l'hydrodynamique et la cinétique chimique, des lois de bilan supplémentaires devant être prises en compte par les espèces chimiques. L'École Française de combustion est très bien reconnue sur la scène internationale, tant en ce qui concerne les aspects de physique

fondamentale (dynamique des flammes laminaires et instabilités associées, détonations, etc.) que des problématiques plus proches des préoccupations industrielles (résonances acoustiques, contrôle de la combustion, etc.). Les progrès dans ce secteur devraient venir en partie du développement d'expériences numériques performantes (Simulation Numérique Directe, Simulation des Grandes Échelles, etc. qui prennent en considération toute la complexité de la cinétique chimique ou qui la représentent par un modèle réduit adapté).

• Les contraintes de plus en plus strictes imposées au bruit rayonné par les avions de ligne, les études en cours sur le projet d'avion de transport supersonique du futur et l'avènement de moyens de calcul de plus en plus puissants ont récemment conduit au renouveau de l'**aéroacoustique**. Les simulations numériques permettent par exemple d'appréhender simultanément la dynamique tourbillonnaire d'un jet et le champ acoustique rayonné par ce jet, bien que les échelles caractéristiques relatives à l'hydrodynamique et à l'acoustique soient très différentes. Elles ont déjà suscité de nombreuses études fondamentales qui permettent d'améliorer notre compréhension des mécanismes de production des ondes sonores, notamment à travers une meilleure prise en compte des effets liés à la compressibilité et aux transferts thermiques. Le thème aéroacoustique est par essence interdisciplinaire et constitue un pont entre les Mécaniciens des Fluides de la section 10 et les Acousticiens de la section 09.

• La **Mécanique des Fluides Numérique** a connu un développement très rapide ces 10 dernières années, et a d'ores et déjà permis d'élaborer des outils de dimensionnement et de conception utilisés par l'industrie. 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 diffusion large des codes commerciaux ne doit cependant pas cacher les nombreux défis qui restent à relever, en particulier dans le traitement des phénomènes couplés ou encore de géomé-

tries complexes. Les progrès dans ce domaine requièrent bien sûr des modélisations physiques avancées, mais également la recherche de méthodes numériques de haute précision, ainsi que de techniques de résolution rapides, voire d'architecture dédiées. Le renforcement des interactions avec les Mathématiques Appliquées est fortement souhaitable à cet égard. Les énormes quantités d'informations fournies par les calculs numériques posent des problèmes de post-traitement qui bénéficieraient également d'une meilleure collaboration avec les STIC. Des résultats spectaculaires ont déjà été obtenus à propos des visualisations de champs 3D. Depuis plusieurs années, la communauté française s'est bien fédérée autour d'un GDR, qui a pris une dimension européenne.

4 – PLASMAS FROIDS

4.1 ÉTATS DES LIEUX

Description générale de la thématique

Une source d'énergie électromagnétique est couplée à un gaz ; ce transfert d'énergie conduit à la génération de photons, d'espèces chargées (électrons, ions), d'états atomiques ou moléculaires excités et de radicaux résultant de la dissociation de molécules. Ces espèces sont transportées dans des flux de gaz, éventuellement en réagissant au sein de cette phase puis interagissent avec les parois du réacteur ou avec des surfaces intentionnellement placées dans le réacteur. Entrent dans ce schéma général les activités centrées sur les lasers pour lesquelles la physique des plasmas est un élément clé des sources et qui s'intéresse de plus en plus à l'interaction laser-matière avec des finalités identiques à celles de la communauté plasma froid. Les différents problèmes abordés par la communauté peuvent donc se décliner de la façon suivante :

- couplage de la source d'énergie au plasma ;
- mesure et modélisation de la création des espèces afin d'en connaître la nature, la densité et l'énergie ;
- analyse et modélisation du transport réactif de ces espèces ;
- interactions de ces espèces avec les surfaces prenant en compte les domaines tels que traitements de surface ou dépôt de couches minces.

Dans chacun de ces problèmes la communauté française développe des études à caractère expérimental, des études théoriques, des études de simulation et de modélisation. Il faut souligner une forte activité dans le développement des diagnostics que se soit du plasma lui-même ou des surfaces en interactions avec le plasma. Pour la totalité des laboratoires l'aspect finalisé des recherches est indissociable des aspects académiques. Si dans les années 70-80 les technologies de la microélectronique constituaient le moteur principal des études finalisées, les domaines où aujourd'hui les plasmas sont utilisés ou en passe de l'être sont extrêmement variés comme nous le verrons plus loin.

Laboratoires, moyens humains

18 laboratoires sont en tout (6 laboratoires) ou partie (12 laboratoires) dédiés aux recherches plasma froid ou lasers. Ils ont des liens souvent formalisés ou au sein de structures fédératrices de type GDR avec de nombreux laboratoires dépendant d'autres départements (STIC, SC, SPM) qui ont une activité plasma. Plus de vingt autres laboratoires ont de ce point de vue, une partie concernée par les activités plasma et/ou laser. Un réseau Plasma a été créé en 2002. Malgré sa relative jeunesse on a pu constater sa vigueur et son efficacité dans la communication des résultats et dans les essais de structuration de la communauté.

Du point de vue du personnel attaché à ce thème, 65 chercheurs CNRS environ et 85 enseignants chercheurs sont impliqués. Il est

beaucoup plus difficile de donner une évaluation de ce type pour les laboratoires rattachés à un département autre que SPI et dont la section n'évalue pas l'activité plasma qui assez souvent (mais pas toujours) est relativement marginale. Probablement autour de 30 chercheurs CNRS et autant d'enseignants chercheurs sont impliqués. L'évaluation pour le personnel ITA et encore plus IATOS est quasiment impossible à réaliser car une large majorité de ces personnels ne sont pas uniquement impliqués dans leurs laboratoires sur les activités touchant aux plasmas.

Du point de vue de la répartition géographique, trois zones regroupent l'essentiel des forces :

- la région parisienne (Orléans inclus), la région toulousaine et la région de Nancy. Il existe, bien sur, d'excellents laboratoires et équipes hors de ces régions (Nantes, Grenoble, Perpignan, Marseille, Limoges etc.) mais leur poids est quantitativement largement inférieur ;

- la communauté actuelle a deux origines relativement distinctes, l'une vient de la physique des gaz ionisés et c'est le plasma en tant que tel qui constitue l'objet d'étude ; l'autre vient du domaine des matériaux et, pour elle le plasma est considéré comme un outil de synthèse ou de transformation des matériaux. Cet outil est cependant suffisamment compliqué pour que des études spécifiques sur l'outil lui-même soient développées. Au cours de la dernière décennie on a constaté un évident mouvement de ces deux communautés l'une vers l'autre. Ce mouvement a sans doute été accentué par le rattachement en 1991 de la communauté « plasmas froids » à la section 10 du Comité national où elle a subi de fortes influences notamment de la part du génie des procédés ;

- à une exception près tous les laboratoires impliqués sont des UMR ; le couplage avec l'enseignement supérieur est donc permanent. Il faut toutefois signaler que contrairement aux grandes disciplines traditionnelles, la physique et les applications des plasmas sont peu enseignées. Lorsqu'ils le sont c'est au niveau troisième cycle. Il y a donc une difficulté réelle pour les MCF à trouver une cohé-

rence entre recherche et enseignement. Cette question ressurgit lors de la définition de profils de postes pour le recrutement des MCF. Cela explique le ratio chercheurs CNRS/enseignants chercheurs qui est plus fort que dans beaucoup d'autres domaines du SPI. En d'autres termes, le CNRS est l'organisme indispensable au développement de cette discipline. Les applications des plasmas sont, on l'a déjà dit, dans des domaines très divers allant de la microélectronique aux sciences de la vie en passant par la métallurgie, le textile, la plasturgie, etc. Une des conséquences est la part que prend cette communauté dans les programmes interdisciplinaires tels que Matériaux, ECODEV, Énergie ou encore REACTIF ou PREDIT. Quatre GDR du CNRS, tous en collaborations avec d'autres départements (STIC, SDU, SPM, SC) fédèrent les activités de la communauté sur des objectifs tels que : la propulsion spatiale, les sources de photons, la dépollution associant plasmas et catalyseurs, l'ingénierie des réacteurs.

Valorisation

On peut chiffrer à six ou sept le nombre de créations d'entreprises issues des laboratoires de recherche de cette communauté dans les quatre dernières années. Il faudrait aussi inclure, bien qu'une évaluation rigoureuse soit difficile à réaliser, les développements industriels dans des sociétés existantes induits par la recherche sur les plasmas. Les prises de brevets posent également un problème de comptabilisation à double titre : la majorité des brevets sont pris par les entreprises avec lesquelles nous collaborons (les chercheurs des UMR étant co-auteurs), les brevets peuvent être pris par les industries où se situent les champs d'applications des plasmas dont on a vu qu'ils étaient extrêmement diversifiés et peuvent ainsi échapper à leur comptabilisation dans le domaine des plasmas. Néanmoins une quinzaine de brevets dans lesquels l'action des UMR de ce domaine est forte peuvent être identifiés.

4.2 FORCES, FAIBLESSES, SUJETS FORTEMENT ACTIFS ET OUVERTS, SUJETS EN ÉMERGENCE

La physique des décharges et les diagnostics de la phase plasma ont longtemps été un des points très forts de la communauté française. Cela reste vrai pour les aspects modélisation des décharges. Cela est beaucoup moins vrai aujourd'hui pour la physique des décharges et pour la mise au point de diagnostics innovants bien que nous conservions une position forte pour les diagnostics plus traditionnels.

Les laboratoires français sont très présents sur le créneau du développement d'applications dans des domaines extrêmement variés (Sciences de la vie avec la stérilisation plasma ou les traitements assurant la biocompatibilité ; Génie Chimique avec la dépollution par plasma, métallurgie avec les nettoyages par plasmas, etc.). Le facteur limitant dans ce secteur est un peu hors d'atteinte pour les laboratoires de recherche, c'est celui des équipementiers où la France est singulièrement faible si l'on compare à des pays comme l'Allemagne.

La transition entre physique des plasmas et Génie des procédés plasma a été un succès assez convaincant de la dernière décennie sauf au niveau de la simulation et de la modélisation où l'effort est disproportionné entre modélisation des décharges et modélisation des procédés.

Les études liées à la génération des espèces et leurs interactions avec les surfaces sont nombreuses et de qualité. La position de la recherche française dans ce domaine est bonne quoiqu'en légère perte de vitesse chaque fois que des outils d'analyse hauts de gamme doivent être réunis autour des réacteurs plasma pour progresser. Par contre les études sur les écoulements réactifs, incontournables dans l'approche des réacteurs de grands volumes devraient être plus fournies spécialement avec des gaz ou des mélanges de gaz complexes. Ce constat vaut aussi bien pour les aspects expérimentaux (incluant les diagnostics) que

pour la modélisation. De même, l'apparition de nouvelles sources plasma pose le problème du couplage Source/Plasma qui ne fait pas vraiment l'objet d'études systématiques.

On ne s'étendra pas sur un manque constant (déjà pointé dans le rapport de conjoncture de 1992) de données de base sans lesquelles les modèles tournent avec trop de paramètres ajustables. Il conviendrait d'avoir une réflexion sur les raisons de cette situation et sur les dispositions à prendre pour y remédier.

Les sujets en émergence se situent sur les zones frontières avec les autres domaines scientifiques et pour la plupart répondent à une demande sociétale :

- plasma et environnement : une activité très bourgeonnante dans le domaine de la dépollution plasma (dissociation des NOx, SOx et autres COV) ainsi que des efforts significatifs pour que les technologies plasma en principe propres en termes d'effluents, se substituent aux technologies traditionnelles par bains dans les nettoyages de surface ;

- plasma et sciences de la vie : de nombreuses équipes ont des activités en stérilisation par plasma et un secteur, encore mal couvert en France, concerne la fonctionnalisation des surfaces pour contrôler ou optimiser des bio-réactions sur les dites surfaces ;

- les procédés plasmas adaptés au micro-systèmes : la communauté a largement développé avec succès les procédés pour la microélectronique. L'avènement des microsystèmes pose d'autres défis : des facteurs de formes très variés, la nature des matériaux à déposer ou à graver est très différente de celle des matériaux traditionnels de la microélectronique ;

- dans le domaine de la modélisation et de la simulation, les années qui vont venir devraient voir se combler le fossé entre les approches atomiques et moléculaires de type dynamique moléculaire associées ou non à du Monté Carlo, et les approches globales proches du génie des procédés. C'est une manière d'exprimer l'approche multi-échelle d'espace et de temps qui n'est pas une spécificité plasma en SPI mais qui fait partie des défis à relever.

4.3 RECOMMANDATIONS

La taille de la communauté scientifique et les moyens matériels dont elle dispose font que l'efficacité, synonyme d'une présence forte au niveau international, ne pourra être maintenue qu'à travers une cohérence accrue :

- mutualisation des équipements pouvant être mutualisés en se donnant les moyens de les rendre facilement opérationnels pour le plus large ensemble ;

- éviter les redondances entre les laboratoires. Cette dernière recommandation vaut pour les sujets en émergence dont l'attractivité conduit à une certaine arborescence qu'il faudra maîtriser ;

- continuer la politique de GDR qui est un facteur important de la structuration ;

- dès sa première année d'existence, le réseau national « plasmas froids » a montré son efficacité. C'est une expérience à poursuivre, voire à amplifier.

5 – THERMIQUE

5.1. ÉTAT DES LIEUX

Description générale

Aujourd'hui la présentation qui était faite de la thermique sous la forme de phénomènes radiatifs, conductifs et convectifs a évolué du fait des objectifs de connaissance et de la demande industrielle vers l'analyse des phénomènes couplés. Ces couplages intermodes : convection-conduction, convection-rayonnement, etc, interviennent dans des matériaux, des écoulements, des procédés. La thermique qui est la science du couplage des phénomènes de transferts, se situe donc au confluent de la

science des matériaux, de la mécanique et du génie des procédés. De ce fait, elle se trouve au cœur de nombreux problèmes industriels et sociétaux. Ceci se traduit par une forte activité contractuelle des laboratoires que ce soit avec les entreprises ou les grands organismes (CEA, INSERM, ADEME, etc.).

À ce jour l'analyse des activités des différents laboratoires relevant de cette discipline peut se décliner de la façon suivante :

- cinq axes thématiques : le rayonnement thermique, les transferts en milieu hétérogène, le changement de phase, la thermoconvection, les systèmes thermiques ;

- ainsi que deux axes transverses : la micro et nano thermique, la méthodologie spécifique ;

- l'ensemble de ces axes de recherche constitue le cœur de la discipline, certains sont matures, d'autres en émergence (micro et nano thermique) ;

- le champ d'application est très vaste. La thermique joue un rôle important dans des domaines aussi variés que le spatial, l'énergie, l'environnement, la santé, les industries de transformation et agroalimentaires.

Dans tous ces domaines, il existe des verrous technologiques qui proviennent d'une méconnaissance des transferts thermiques (microélectronique, spatial, sûreté nucléaire, traitement de certains cancers etc.).

Laboratoires et moyens humains

Une douzaine de laboratoires mènent des recherches centrées sur les transferts thermiques. Ils ont des liens souvent formalisés ou au sein de structures fédératrices type GDR avec de nombreux laboratoires dépendant d'autres départements. Du point de vue du personnel attaché à ce thème une trentaine de chercheurs CNRS et environ 120 enseignants chercheurs sont impliqués. Du point de vue de la répartition géographique elle est équilibrée sur l'hexagone avec pour principaux centres

Nantes, Poitiers, Paris, Nancy, Belfort, Lyon, Grenoble, Marseille, Limoges, Toulouse, Pau, Bordeaux.

Pratiquement tous les laboratoires impliqués sont des UMR ; le couplage avec l'enseignement supérieur est donc permanent. La communauté est fortement structurée au travers de réseaux (METTI, AMETH, ACRT, Réseau EtherNet), et elle participe aux programmes interdisciplinaires tels que Énergie et Matériaux.

Valorisation

On peut chiffrer à six ou sept le nombre de créations d'entreprises issues des laboratoires de recherche de cette communauté dans les quatre dernières années. Comme dans tout l'enseignement supérieur la comptabilisation de la prise de brevets est difficile : la majorité des brevets sont pris par les entreprises avec lesquelles nous collaborons (les chercheurs des UMR étant co-auteurs), les brevets peuvent être pris par les industries où se situent les champs d'applications des transferts thermiques. On peut chiffrer à une dizaine par an le nombre de brevets où les chercheurs en thermique sont impliqués comme co-auteurs. Quoiqu'il en soit, malgré une évolution positive, la prise de brevet et la création d'entreprises issues de laboratoires de thermique est un point sur lequel des efforts importants restent à faire.

5.2 AXES ACTIFS ET OUVERTS

L'évolution des axes de recherche qui définissent la thématique thermique est identique, il faut aller vers les petites échelles et prendre en compte au travers de couplages de plus en plus complexes les aspects multiphysiques.

- Pour le rayonnement thermique, la problématique scientifique s'oriente vers

les matériaux et les hautes températures. La caractérisation et la modélisation prédictive des propriétés radiatives et optiques dans les solides divisés, les milieux hétérogènes, les gaz et les plasmas apportent des retombées en combustion, astrophysique, spatial. Elle permettra par exemple pour l'habitat le développement de surface à rayonnement exalté. Un effort devra être fait dans le développement de modèles prenant en compte, les couplages avec le rayonnement dans ces mêmes milieux car c'est essentiel pour la conception des fours, des chambres de combustion ainsi que pour la propulsion terrestre et aérospatiale.

- Pour les transferts en milieux hétérogènes, l'état des connaissances permet d'aller vers plus de complexité d'abord sur l'aspect matériaux qu'ils soient milieux poreux, divisés ou granulaires, ensuite sur l'aspect multi-échelles du micro au macro avec une modélisation à l'échelle du milieu continu homogène équivalent, enfin sur l'aspect multiphysique par la prise en compte des bilans de quantité de mouvement, de chaleur et de masse. L'étude de cette complexité se fera par la maîtrise des nouvelles techniques expérimentales qui sont : les ultrasons, le rayonnement gamma, les scanners X, et l'imagerie par RMN, etc.

- Les transferts avec changement de phase qu'ils soient solide-liquide, liquide-vapeur ou solide-vapeur sont bien analysés par la communauté tout du moins à l'échelle macroscopique. La problématique à développer se situe sur le passage de l'échelle micro (bulle, dendrite) à l'échelle macro, avec, pour les changements à phase liquide l'étude du couplage avec la convection et, sur ce point, les expériences en micro-gravité devront être maintenues. Un axe à privilégier est celui de la condensation où peu de thermiciens sont impliqués.

- La thermoconvection est un axe fort de la communauté thermicienne avec une collaboration très active entre numériciens et expérimentateurs. Les recherches sur cet axe s'orientent vers l'intensification et le contrôle actif des transferts et pour les micro-échelles vers une microthermohydrodynamique qui ira jusqu'au milieu pseudo-continu où l'interaction

solide-fluide nécessite des concepts nouveaux (coefficients d'accommodation, effets des arrangements moléculaires à la surface solide sur le frottement). Pour les gaz, l'étude des transferts se fera à grand nombre de Knudsen.

- Les aspects environnementaux et économiques doivent être intégrés dans la conception des systèmes thermiques. Ceci nécessite une analyse de ces systèmes à la lumière des nouveaux concepts thermodynamiques que sont, l'équipartition de la production d'entropie, la thermodynamique en temps fini et l'approche constructale, en vue d'une optimisation du système. Pour être pleinement efficace ce type d'étude devra être soutenu par la simulation numérique. En effet l'analyse locale donnée par les évolutions spatio-temporelle des différents champs (température, vitesse, etc) soutiendra les aspects globaux venant de ces nouveaux concepts.

- Comme dans d'autres disciplines, les méthodes numériques ont permis des avancées notables par la simulation directe en soutien à l'expérimentation et par les méthodes inverses pour l'identification. Sur ce point, la communauté thermicienne est bien structurée par le groupe METTI. L'évolution vers le non linéaire que l'on retrouve en conduction et convection sera confortée par les collaborations avec d'autres spécialistes venant des Mathématiques appliquées L'expérimentation virtuelle venant de la simulation numérique et les méthodes inverses, complémentaires à une métrologie adaptée, seront un soutien fort à l'analyse de phénomènes où comme pour les petites échelles, l'expérimentation devient de plus en plus complexe.

5.3 AXE EN ÉMERGENCE

La thermique des micro et nano échelles est un axe prometteur du point de vue théorique et des ruptures technologiques qu'elle peut amener. Pour des empilements atomiques de l'ordre de la centaine d'Ångströms, l'équation pertinente prolongeant l'équation de

Fourier reste un problème ouvert. De même les effets d'émission cohérente en champ proche qui permettent de concentrer l'énergie thermique sur un quantum résonnant constituent une voie prometteuse pour une amélioration notable du rendement photovoltaïque.

5.4 RECOMMANDATIONS

Pour mieux répondre à la demande sociétale il est nécessaire, d'accentuer les partenariats, et d'aller vers de nouvelles voies.

Développer le partenariat avec les autres disciplines

Les partenariats sont nécessaires à deux titres : adapter les outils et les méthodes venant d'autres disciplines et collaborer avec les spécialistes (vivants, environnement, etc) pour contribuer à la résolution de problèmes dans lesquels la connaissance des transferts est fondamentale.

La problématique scientifique de la thermique doit prendre en compte les aspects multiéchelles et multiphysique. Ceci nécessite une méthodologie adaptée (au plan des aspects numériques, méthodes inverses, simulation directe, réduction de modèles et au plan expérimental diagnostic non intrusif) qui ne peut se développer qu'en partenariat avec d'autres disciplines.

Par exemple les progrès sur les méthodes d'homogénéisation, de simulation numérique, d'approche stochastique viendront des relations avec les mathématiques appliquées. Avec la physique, la description des milieux granulaires permettra l'analyse des transferts de chaleur dans les lits fluidisés denses ou dilués. La connaissance de la physico-chimie est essentielle dans le traitement des transferts dans les colloïdes, l'intensification et le contrôle des transferts se fera avec les automaticiens.

Outre les frontières naturelles de la thermique que sont la mécanique des matériaux, et le génie des procédés, les avancées viendront aussi de partenariats forts avec la physique, la chimie, les mathématiques appliquées et les sciences du vivant.

Aller vers de nouvelles voies

Les effets thermiques jouent un rôle essentiel dans la matière vivante : cryopréservation des cellules et des tissus, traitement de certains cancers, régulation thermique des êtres vivants etc. *La biothermique* est un axe des biotechnologies qui devra être développé.

La demande industrielle va vers les matériaux à propriétés d'usages. Sur ce point les verres à propriétés optiques variables, les

milieux dont les propriétés thermiques sont ajustables etc font partie de la classe de *matériaux spécifiques à la thermique*, les études sur ces matériaux devront être menées conjointement à celles de l'intensification et du contrôle actif des transferts.

Les *nouvelles technologies de l'énergie* devront être revisitées à la lumière de la métrologie moderne couplée à la simulation numérique des évolutions spatio temporelles des champs (vitesse, température etc.).

Les verrous technologiques où l'influence de la thermique est essentielle se retrouvent dans de nombreux procédés : *usinage à grande vitesse, moulage, extrusion, formage etc.* Les avancées viendront de la prise en compte du couplage des différents mécanismes impliqués dans ces procédés industriels.

